

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**UÇUCU KÜL STABİLİZASYONUNUN KİLLİ ZEMİNLERİN  
DAYANIM VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**EMRAH DAĞLI**

**NİSAN 2021**



**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**UÇUCU KÜL STABİLİZASYONUNUN KİLLİ ZEMİNLERİN**  
**DAYANIM VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**Emrah DAĞLI**

**DANIŞMAN : Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR**

**İKİNCİ DANIŞMAN : Doç. Dr. Sedat SERT**

**ZONGULDAK**

**Nisan 2021**



**KABUL:**

Emrah DAĞLI tarafından hazırlanan “Uçucu Kül Stabilizasyonunun Killi Zeminlerin Dayanım ve Durabilite Özelliklerine Etkisi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 30/04/2021

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR .....  
Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü

**İkinci Danışman:** Doç. Dr. Sedat SERT .....  
Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Prof. Dr. İsmail Hakkı ÖZÖLÇER .....  
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği  
Bölümü

**Üye:** Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ .....  
Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Doç. Dr. Ertan BOL .....  
Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Doç. Dr. Hüseyin Suha AKSOY .....  
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜN BÜL GÜNER .....  
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği  
Bölümü

---

**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü





*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Emrah DAĞLI



## ÖZET

### Doktora Tezi

## UÇUCU KÜL STABİLİZASYONUNUN KİLLİ ZEMİNLERİN DAYANIM VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

**Emrah DAĞLI**

**Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR**

**İkinci Danışman: Doç. Dr. Sedat SERT**

**Nisan 2021, 281 sayfa**

Zemin stabilizasyonu, zayıf zeminlerin mühendislik özelliklerinin fiziksel, kimyasal, hidrolik vb. gibi yöntemler ile güçlendirilmesidir. Kimyasal stabilizasyon da bu yöntemlerden en çok uygulananlardan birisidir. Bu tez çalışmasında biri yüksek (B) ve diğeri düşük (S) plastisite özelliğine sahip olmak üzere 2 farklı zemin araştırma malzemesi olarak seçilmiştir. Kimyasal katkı olarak kullanılan F sınıfı uçucu kül (FA) ve kirecin (L) bu killerin dayanım ve durabilite özelliklerine etkisi incelenmiştir. Zeminler öncelikle çeşitli oranlarda uçucu kül (% 5, % 10, % 15, % 20 ve % 30) ile karıştırılmıştır. Daha sonra aynı zeminler üzerinde sadece kirecin etkisinin görülmesi amacıyla % 3, % 5 ve % 7 kireç ilavesi yapılmıştır. Aynı zamanda ilgili zeminlere, hem uçucu kül hem de kirecin etkisinin değerlendirilmesi amacıyla % 30 uçucu kül katkısı sabit tutularak belirtilen oranlarda (% 3, % 5 ve % 7) kireç ilavesi yapılmıştır. Kil ve ilgili katkılar üzerinde öncelikle indeks (özgül ağırlık, hidrometre, kıvam limitleri, standart kompaksiyon) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında optimum su içeriğinde hazırlanan numuneler dayanım deneylerine (serbest basınç, dolaylı çekme, ani taşıma indeksi, nemlilik şartları, Kaliforniya taşıma oranı, lineer şişme ve donma çözülme) tabi tutulmuştur.

## ÖZET (devam ediyor)

Serbest basınç ve dolaylı çekme deneylerinde kür süresi olarak 0, 7 ve 28 gün seçilmiştir. Kaliforniya taşıma oranı ve lineer şişme deneylerinde ise sadece 28 gün kür süresi mevcuttur. Donma çözülme deneyinde 28 gün kür süresi uygulanan numuneler üzerinde 2, 4, 6, 8 ve 12 donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır. Son olarak mikro yapının da incelenmesi açısından hazırlanan 28 gün kürlü numunelere mikro analizler (SEM, XRD, XRF, TGA) yapılmıştır. Donma çözülme ve mikro analizlerde sadece belirli karışımlar (S, S30FA, S30FA5L, S5L, B, B30FA, B30FA5L ve B5L) üzerinde deney gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre S ve B zemin üzerine sadece F sınıfı uçucu kül eklendiğinde, karışımların mühendislik performansları standartlarda belirtilen şartları sağlamaktan uzak kalmıştır. Sadece kireç eklenen karışımların dayanım değerleri, tüm deneylerde uçucu küle göre daha iyi olmasına rağmen, bazı karışımlar (S3L ve B3L) CBR deneyinde beklenen güçlendirmenin altında sonuçlar vermiştir. Uçucu kül ve kireç içeren her iki zemine ait tüm karışımlarda elde edilen dayanım artışı sadece kireç içerenlere göre oldukça yüksek olmuştur. En yüksek dayanım değerleri S30FA5L, S30FA7L, B30FA5L ve B30FA7L karışımlarında elde edilmiştir. S30FA5L ve B30FA5L karışımlarının hem ekonomik olması hem de standartlar tarafından belirtilen şartlara uymasından dolayı optimum karışımlar olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Dayanım ve durabilite, kil, kireç, mikro analiz, plastisite, stabilizasyon, uçucu kül.

**Bilim Kodu:** 624.01.01

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **EFFECT OF FLY ASH STABILIZATION ON STRENGTH AND DURABILITY PROPERTIES OF CLAYEY SOILS**

**Emrah DAĞLI**

**Zonguldak Bülent Ecevit University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering**

**Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Ömer Faruk ÇAPAR  
Co-Advisor: Assoc. Prof. Dr. Sedat SERT**

**April 2021, 281 pages**

Stabilizing engineering properties of weak soils with some methods such as physical, chemical and hydraulic is called as soil stabilization. Chemical stabilization is one of the most widely used methods among them. In this study, two soils (S and B) having different plasticity were chosen as a research material. Lime and F type fly ash are used as chemical additives. Soils are mixed with various amount (% 5, % 10, % 15, % 20 and % 30) of fly ash. Afterwards, lime was added to these soils with varying proportion (% 3, %5 and % 7) in order to evaluate the effect of it on same soils. Furthermore, lime was mixed with same proportions while % 30 of fly ash remains constant to interpret the effect of both fly ash and lime on soils. First, index tests (specific gravity, hydrometer, consistency limit and standard compaction) were performed on untreated and treated clays. Then, samples prepared with optimum water content were exposed to strength tests (unconfined compression, indirect tensile strength, immediate bearing index, moisture condition value, California bearing ratio, linear swelling and freezing-thawing).

## **ABSTRACT (continued)**

Curing time were selected as 0, 7 days and 28 days for unconfined compression strength and indirect tensile strength tests. California bearing ratio and linear swelling test samples were cured only for 28 days. Samples cured for 28 day curing were exposed to 2, 4, 6, 8 and 12 cycles of freezing-thawing. Freezing thawing test and microlevel analysis are performed only specified mixtures (S, S30FA, S30FA5L, S5L, B, B30FA, B30FA5L ve B5L). According to obtained results, engineering performances of S and B soils containing only fly ash additives are far away to satisfy the conditions stated in the standards. Although, strength of mixtures having only lime additives are better then fly ash treated mixtures for all tests, strength results of some mixtures (S3L and B3L) were not good enough according to expectation for CBR test. Strength increase obtained from all mixtures containing both fly ash and lime are very huge when compared with lime only treated mixtures. The maximum strength values were obtained for the mixtures of S30FA5L, S30FA7L, B30FA5L and B30FA7L. It has been concluded that S30FA5L and B30FA5L mixtures are optimum mixtures since these mixtures are economical and also meet the requirements specified by the standards.

**Keywords:** Clay, fly ash, lime, strength and durability, micro analysis, plasticity, stabilization.

**Science Code:** 624.01.01

## TEŞEKKÜR

Öğrenciliğim ve tez çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen, kendisinden ilham aldığım, iyi niyetli ve yardımsever bir karakterde olup engin bir bilgi birikimine sahip kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR'a çok teşekkür ederim.

Beni bu yaşa kadar türlü zorluk ve emekler ile getiren, sevgilerini her daim hissettiğim, arkamı yaslayacağım önemli bir güç olarak gördüğüm; zaman zaman tezim yüzünden ihmal ettiğim için üzüntü duyduğum aileme teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Doktora tezim süresince değerli katkıları ile çalışmama destek olan ve yön veren hocalarım Prof. Dr. İsmail Hakkı ÖZÖLÇER, Doç. Dr. Ertan BOL, Doç. Dr. Sedat SERT ve Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca mesai arkadaşım Arş.Grv. Dilek Cansu BOZACIOĞLU'na da katkıları için teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım süresince bana devamlı destek olan kıymetli eşim Aysun KURŞUN DAĞLI'ya, gerek laboratuvara girip deneylerle ilgili yardımlarından, gerekse bu şehirde bana en çok lazım olan huzur ve mutluluğu temin ederek manevi olarak benim yanımda durmasından dolayı çok teşekkür ederim.

Eren Enerji A.Ş. firmasına, işletme müdürü Kazım AYDIN'a ve işletme mühendisi Semih ERYILMAZ'a destek ve yardımlardan dolayı çok teşekkür ederim.

Bölümümüz geoteknik laboratuvarı sorumlusu Abdulkerim ARSLAN'a deney süreçlerinde bana verdiği destek ve yardımlardan dolayı teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2017-37891158-02 numaralı "Uçucu Kül Stabilizasyonunun Killi Zeminlerin Dayanım ve Durabilite Özelliklerine Etkisi" isimli Lisansüstü Öğrenim ve Araştırma Projesi ile desteklenmiştir.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL: .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xxiii
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
1.1 ZEMİN STABİLİZASYONU KAVRAMI .....	1
1.2 ZEMİN STABİLİZASYONU .....	2
1.3 MEKANİK STABİLİZASYON .....	3
1.4 HİDROLİK STABİLİZASYON .....	5
1.5 FİZİKSEL STABİLİZASYON .....	6
1.6 KİMYASAL STABİLİZASYON .....	6
1.7 ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI .....	9
BÖLÜM 2 UÇUCU KÜL VE KİREÇ STABİLİZASYONU .....	11
2.1 GİRİŞ .....	11
2.2 UÇUCU KÜLÜN TANIMI VE GENEL ÖZELLİKLERİ .....	11
2.3 UÇUCU KÜLLERİN SINIFLANDIRILMASI .....	12
2.3.1 ASTM C618 Standardına Göre Sınıflandırma .....	13
2.3.2 TS EN 197-1 Standardına Göre Sınıflandırma .....	14
2.4 UÇUCU KÜL KULLANIMI TARİHÇESİ .....	15
2.5 UÇUCU KÜLÜN MİNERALojİK VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ .....	16

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.6 UÇUCU KÜL STABİLİZASYONU.....	17
2.7 UÇUCU KÜL KULLANIM ALANLARI .....	18
2.8 KİRECİN TANIMI VE GENEL ÖZELLİKLERİ .....	19
2.9 KİREÇ KULLANIM TARİHÇESİ.....	20
2.10 KİREÇ STABİLİZASYONU.....	21
2.11 ÜLKEMİZDE KİREÇ STABİLİZASYONU .....	25
2.12 LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.....	27
BÖLÜM 3 MATERYAL VE METOT .....	55
3.1 MATERYAL.....	55
3.1.1 Zeminlerin ve Katkıların İndeks Özellikleri .....	56
3.1.1.1 Özgül Ağırlık Deneyleri .....	57
3.1.1.2 Hidrometre Deneyleri .....	58
3.1.1.3 Kıvam Limitleri Deneyleri.....	60
3.1.1.4 Standart Kompaksiyon Deneyleri .....	63
3.1.2 Düşük Plastisiteli Killi Zeminin Mikro Analizleri.....	70
3.1.3 Yüksek Plastisiteli Killi Zeminin Mikro Analizleri.....	72
3.1.4 Uçucu Külün Mikro Analizleri .....	75
3.1.5 Kirecin Mikro Analizleri.....	78
3.2 METOT .....	81
3.2.1 BS EN 14227 Standartları.....	82
3.2.2 Donma-Çözülme Deneyi .....	88
3.3 Uçucu Kül ve Kireç Katkı Oranlarının Belirlenmesi .....	88
3.4 DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI.....	90
3.5 DAYANIM DENEYLERİ VE MİKRO ANALİZLER .....	92
3.5.1 Ani Taşıma İndeksi (IBI) Deneyi .....	92
3.5.2 Nemlilik Şartları (MCV) Deneyi .....	93
3.5.3 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi.....	95
3.5.4 Serbest Basınç (UCS) Deneyi.....	95
3.5.5 Lineer Şişme Deneyi.....	96

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.5.6 Dolaylı Çekme (ITS) Deneyi .....	98
3.5.7 Donma Çözölmeli UCS Deneyi.....	98
3.5.8 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi .....	99
3.5.9 X Işınları Difraksiyonu (XRD) Analizi .....	99
3.5.10 X Işınları Floresansı (XRF) Analizi.....	99
3.5.11 Termogravimetri (TGA) Analizi.....	99
3.6 DENEY PROGRAMI.....	100
BÖLÜM 4 DENEYSEL SONUÇLAR .....	105
4.1 GİRİŞ.....	105
4.2 SERBEST BASINÇ DENEY SONUÇLARI.....	105
4.2.1 Düşük Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar.....	105
4.2.2 Yüksek Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar.....	116
4.3 DONMA ÇÖZÜLME SONRASI SERBEST BASINÇ DENEY SONUÇLARI .....	124
4.3.1 Düşük Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar.....	124
4.3.2 Yüksek Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar .....	127
4.4 DOLAYLI ÇEKME DENEY SONUÇLARI.....	130
4.4.1 Düşük Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar.....	130
4.4.2 Yüksek Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar.....	140
4.5 NEMLİLİK ŞARTLARI DENEY SONUÇLARI.....	150
4.5.1 Düşük Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar.....	150
4.5.2 Yüksek Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar.....	156
4.6 ANI TAŞIMA İNDEKSİ DENEY SONUÇLARI .....	162
4.6.1 Düşük Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar.....	162
4.6.2 Yüksek Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar .....	167
4.7 KALİFORNİYA TAŞIMA ORANI DENEY SONUÇLARI .....	171
4.7.1 Düşük Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar.....	171
4.7.2 Yüksek Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar .....	175
4.8 LİNEER ŞİŞME DENEY SONUÇLARI.....	179

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
4.8.1 Düşük Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar.....	179
4.8.2 Yüksek Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar.....	182
<b>BÖLÜM 5 BULGULARIN TARTIŞILMASI.....</b>	<b>187</b>
5.1 GİRİŞ.....	187
5.2 SERBEST BASINÇ DAYANIMI BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	187
5.2.1 S Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması .....	188
5.2.2 B Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması .....	194
5.3 DONMA-ÇÖZÜLME SONRASI SERBEST BASINÇ DAYANIMI BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	201
5.3.1 S Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması .....	202
5.3.2 B Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması .....	204
5.4 DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	207
5.4.1 S Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması .....	207
5.4.2 B Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması .....	211
5.5 NEMLİLİK ŞARTLARI BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	215
5.5.1 S Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması .....	216
5.5.2 B Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması .....	219
5.6 ANİ TAŞIMA İNDEKSİ BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	222
5.6.1 S Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması .....	222
5.6.2 B Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması .....	225
5.7 KALİFORNİYA TAŞIMA ORANI BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ...	229
5.7.1 S Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması .....	229
5.7.2 B Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması .....	234
5.8 LİNEER ŞİŞME BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	240
5.8.1 S Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması .....	240
5.8.2 B Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması .....	243
5.9 MİKROANALİZ BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	248
5.9.1 SEM Bulgularının Karşılaştırılması.....	249

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
5.9.2 XRD Bulgularının Karşılaştırılması .....	251
5.9.3 XRF Bulgularının Karşılaştırılması .....	256
5.9.4 TGA Bulgularının Karşılaştırılması.....	258
BÖLÜM 6 DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER .....	263
6.1 DEĞERLENDİRME .....	263
6.2 ÖNERİLER .....	266
KAYNAKLAR.....	267
BİBLİYOGRAFYA .....	279
ÖZGEÇMİŞ .....	281



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Zemin tipine göre uygulanabilir stabilizasyon yöntemleri .....	4
Şekil 2.1 Kirecin zeminlerin serbest basınç dayanımına etkisi .....	23
Şekil 2.2 % 5 kireç katkılı çeşitli zeminlerde yaşlanmanın serbest basınç dayanımına etkisi. ....	24
Şekil 2.3 Kür sıcaklığının yüksek plastisiteli killerin serbest basınç dayanımına etkisi.....	24
Şekil 3.1 S zemin ve karışımları ile uçucu küle ait gradasyon eğrileri. ....	58
Şekil 3.2 B zemin ve karışımları ile uçucu küle ait gradasyon eğrileri.....	59
Şekil 3.3 Plastisite kartında zeminler ile karışımların yeri a) S zemin b) B zemin.....	62
Şekil 3.4 Uçucu kül katkısının S zeminin kompaksiyon karakteristiğine etkisi. ....	64
Şekil 3.5 Kireç katkısının S zeminin kompaksiyon karakteristiğine etkisi.....	65
Şekil 3.6 % 30 sabit uçucu kül katkısı ve değişen oranlarda kirecin S zeminin kompaksiyon karakteristiklerine etkisi.....	66
Şekil 3.7 Uçucu kül katkısının B zeminin kompaksiyon karakteristiğine etkisi.....	67
Şekil 3.8 Kireç katkısının B zeminin kompaksiyon karakteristiğine etkisi. ....	68
Şekil 3.9 % 30 sabit uçucu kül katkısı ve değişen oranlarda kirecin B zeminin kompaksiyon karakteristiklerine etkisi.....	69
Şekil 3.10 S zemine ait SEM görüntüsü (x10000). ....	70
Şekil 3.11 S zemine ait XRD analiz sonucu.....	71
Şekil 3.12 S zemine ait TGA analiz sonucu.....	72
Şekil 3.13 B zemine ait SEM görüntüsü (x20000).....	72
Şekil 3.14 B zemine ait XRD analiz sonucu. ....	74
Şekil 3.15 B zemine ait TGA analiz sonucu. ....	74
Şekil 3.16 Uçucu küle ait SEM görüntüsü (x10000). ....	75
Şekil 3.17 Uçucu küle ait XRD analiz sonucu. ....	76
Şekil 3.18 Uçucu küle ait TGA analiz sonucu. ....	77
Şekil 3.19 Kirece ait SEM görüntüsü (x10000). ....	79
Şekil 3.20 Kirece ait XRD analiz sonucu.....	80

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.21 Kirece ait TGA analiz sonucu.....	81
Şekil 3.22 Harvard numune hazırlama süreci a) Harvard mini kompaktör kalıbı b) Tokmak c) Numunenin sıkıştırılması d) Numunenin çıkarılması e) Numune boyut ölçümü. ....	91
Şekil 3.23 Nemlilik şartları değeri deney süreci a) deney ekipmanı b) numune ve ahşap diskin kalıpla ekipmana sabitlenmesi c) penetrasyon ölçümü d) deney sonunda numune.	93
Şekil 3.24 Tipik nemlilik şartları deneyi vuruş-penetrasyon farkı grafiği. ....	94
Şekil 3.25 CBR deney düzeneği a) CBR deney ekipmanı b) Numunelerin birinci kütleme adımı için kür havuzuna yerleştirilmesi c) Numunelerin 4 gün boyunca suda bekleme süreci. ....	95
Şekil 3.26 UCS deney düzeneği a) UCS deney cihazı b) Deney hızının sisteme girilmesi c) Örnek bir numunenin devam eden deneydeki grafiği.....	96
Şekil 3.27 Şişme ölçümü için kalıpların suya gömülmesi. ....	97
Şekil 4.1 UCS deney sonuçları a) S b) S5FA c) S10FA d) S15FA e) S20FA f) S30FA .....	108
Şekil 4.2 UCS deney sonuçları a) S b) S3L c) S5L d) S7L.....	112
Şekil 4.3 UCS deney sonuçları a) S b) S30FA3L c) S30FA5L d) S30FA7L. ....	115
Şekil 4.4 UCS deney sonuçları a) B b) B5FA c) B10FA d) B15FA e) B20FA f) B30FA. ...	118
Şekil 4.5 UCS deney sonuçları a) B b) B3L c) B5L d) B7L.....	121
Şekil 4.6 UCS deney sonuçları a) B b) B30FA3L c) B30FA5L d) B30FA7L. ....	123
Şekil 4.7 Donma-çözülme sonrası UCS deney sonuçları a) S b) S30FA c) S5L d) S30FA5L. ....	125
Şekil 4.8 Donma-çözülme sonrası UCS deney sonuçları a) B b) B30FA c) B5L d) B30FA5L.....	128
Şekil 4.9 ITS deney sonuçları a) S b) S5FA c) S10FA d) S15FA e) S20FA f) S30FA. ....	132
Şekil 4.10 ITS deney sonuçları a) S b) S3L c) S5L d) S7L. ....	136
Şekil 4.11 ITS deney sonuçları a) S b) S30FA3L c) S30FA5L d) S30FA7L.....	138
Şekil 4.12 ITS deney sonuçları a) B b) B5FA c) B10FA d) B15FA e) B20FA f) B30FA. ...	142
Şekil 4.13 ITS deney sonuçları a) B b) B3L c) B5L d) B7L.....	146
Şekil 4.14 ITS deney sonuçları a) B b) B30FA3L c) B30FA5L d) B30FA7L. ....	148
Şekil 4.15 MCV deney sonuçları a) S b) S5FA c) S10FA d) S15FA e) S20FA f) S30FA....	151
Şekil 4.16 MCV deney sonuçları a) S b) S3L c) S5L d) S7L. ....	154
Şekil 4.17 MCV deney sonuçları a) S b) S30FA3L c) S30FA5L d) S30FA7L.....	156
Şekil 4.18 MCV deney sonuçları a) B b) B5FA c) B10FA d) B15FA e) B20FA f) B30FA. ...	157

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.19 MCV deney sonuçları a) B b) B3L c) B5L d) B7L. ....	160
Şekil 4.20 MCV deney sonuçları a) B b) B30FA3L c) B30FA5L d) B30FA7L. ....	161
Şekil 4.21 Uçucu kül katkılı ve katkısız S zeminin IBI deney sonuçları. ....	164
Şekil 4.22 Kireç katkılı ve katkısız S zeminin IBI deney sonuçları. ....	165
Şekil 4.23 % 30 Uçucu kül katkısı sabit farklı kireç katkıları ile katkısız S zeminin IBI deney sonuçları. ....	166
Şekil 4.24 Uçucu kül katkılı ve katkısız B zeminin IBI deney sonuçları. ....	168
Şekil 4.25 Kireç katkılı ve katkısız B zeminin IBI deney sonuçları. ....	169
Şekil 4.26 % 30 Uçucu kül katkısı sabit farklı kireç katkıları ile katkısız B zeminin IBI deney sonuçları. ....	170
Şekil 4.27 Uçucu kül katkılı ve katkısız S zeminin CBR deney sonuçları. ....	172
Şekil 4.28 Kireç katkılı ve katkısız S zeminin CBR deney sonuçları. ....	173
Şekil 4.29 % 30 Uçucu kül katkısı sabit farklı kireç katkıları ile katkısız S zeminin CBR deney sonuçları. ....	174
Şekil 4.30 Uçucu kül katkılı ve katkısız B zeminin CBR deney sonuçları. ....	176
Şekil 4.31 Kireç katkılı ve katkısız B zeminin CBR deney sonuçları. ....	177
Şekil 4.32 % 30 Uçucu kül katkısı sabit farklı kireç katkıları ile katkısız B zeminin CBR deney sonuçları. ....	178
Şekil 4.33 Uçucu kül katkılı ve katkısız S zemine ait lineer şişme deney sonucu. ....	180
Şekil 4.34 Kireç katkılı ve katkısız S zemine ait lineer şişme deney sonucu. ....	181
Şekil 4.35 % 30 Uçucu kül katkısı sabit farklı kireç katkıları ile katkısız S zeminine ait lineer şişme deney sonucu. ....	182
Şekil 4.36 Uçucu kül katkılı ve katkısız B zemine ait lineer şişme deney sonucu. ....	183
Şekil 4.37 Kireç katkılı ve katkısız B zemine ait lineer şişme deney sonucu. ....	184
Şekil 4.38 % 30 Uçucu kül katkısı sabit farklı kireç katkıları ile katkısız B zeminine ait lineer şişme deney sonucu. ....	185
Şekil 5.1 Uçucu külün S zeminin serbest basınç dayanımına etkisi. ....	188
Şekil 5.2 Kirecin S zeminin serbest basınç dayanımına etkisi. ....	191
Şekil 5.3 % 30 Uçucu kül ve kirecin S zeminin serbest basınç dayanımına etkisi. ....	193
Şekil 5.4 Uçucu külün B zeminin serbest basınç dayanımına etkisi. ....	194
Şekil 5.5 Kirecin B zeminin serbest basınç dayanımına etkisi. ....	197
Şekil 5.6 % 30 Uçucu kül ve kirecin B zeminin serbest basınç dayanımına etkisi. ....	198

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.7 S zemin ve karışımlarına ait donma-çözülme sonrası serbest basınç dayanımları.	203
Şekil 5.8 B zemin ve karışımlarına ait donma-çözülme sonrası serbest basınç dayanımları.	205
Şekil 5.9 Uçucu külün S zeminin dolaylı çekme dayanımına etkisi. ....	208
Şekil 5.10 Kirecin S zeminin dolaylı çekme dayanımına etkisi.....	209
Şekil 5.11 % 30 Uçucu kül ve kirecin S zeminin dolaylı çekme dayanımına etkisi. ....	211
Şekil 5.12 Uçucu külün B zeminin dolaylı çekme dayanımına etkisi.....	212
Şekil 5.13 Kirecin B zeminin dolaylı çekme dayanımına etkisi. ....	213
Şekil 5.14 % 30 Uçucu kül ve kirecin B zeminin dolaylı çekme dayanımına etkisi. ....	214
Şekil 5.15 Uçucu külün S zeminin MCV değerine etkisi. ....	216
Şekil 5.16 Kirecin S zeminin MCV değerine etkisi.....	217
Şekil 5.17 % 30 Uçucu kül ve kirecin S zeminin MCV değerine etkisi. ....	218
Şekil 5.18 Uçucu külün B zeminin MCV değerine etkisi.....	219
Şekil 5.19 Kirecin B zeminin MCV değerine etkisi.....	220
Şekil 5.20 % 30 Uçucu kül ve kirecin B zeminin MCV değerine etkisi.....	221
Şekil 5.21 Uçucu külün S zeminin ani taşıma indeksine etkisi.....	223
Şekil 5.22 Kirecin S zeminin ani taşıma indeksine etkisi. ....	224
Şekil 5.23 % 30 Uçucu kül ve kirecin S zeminin ani taşıma indeksine etkisi. ....	225
Şekil 5.24 Uçucu külün B zeminin ani taşıma indeksine etkisi. ....	226
Şekil 5.25 Kirecin B zeminin ani taşıma indeksine etkisi.....	227
Şekil 5.26 % 30 Uçucu kül ve kirecin B zeminin ani taşıma indeksine etkisi. ....	228
Şekil 5.27 Uçucu külün S zeminin CBR değerine etkisi.....	229
Şekil 5.28 Kirecin S zeminin CBR değerine etkisi. ....	231
Şekil 5.29 % 30 Uçucu kül ve kirecin S zeminin CBR değerine etkisi. ....	233
Şekil 5.30 Uçucu külün B zeminin CBR değerine etkisi. ....	234
Şekil 5.31 Kirecin B zeminin CBR değerine etkisi.....	236
Şekil 5.32 % 30 Uçucu kül ve kirecin B zeminin CBR değerine etkisi.....	238
Şekil 5.33 Uçucu külün S zeminin lineer şişmesine etkisi.....	241
Şekil 5.34 Kirecin S zeminin lineer şişmesine etkisi. ....	241
Şekil 5.35 % 30 Uçucu kül ve kirecin S zeminin lineer şişmesine etkisi. ....	242
Şekil 5.36 Uçucu külün B zeminin lineer şişmesine etkisi. ....	244
Şekil 5.37 Kirecin B zeminin lineer şişmesine etkisi.....	245

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.38 % 30 Uçucu kül ve kirecin B zeminin lineer şişmesine etkisi. ....	246
Şekil 5.39 SEM görüntüleri a) S zemin b) S30FA c) S30FA5L d) S5L. ....	250
Şekil 5.40 SEM görüntüleri a) B zemin b) B30FA c) B30FA5L d) B5L. ....	251
Şekil 5.41 XRD analiz sonuçları a) S zemin b) S30FA c) S30FA5L d) S5L. ....	253
Şekil 5.42 XRD analiz sonuçları a) B zemin b) B30FA c) B30FA5L d) B5L.....	255
Şekil 5.43 S zemin ve karışımlarına ait TGA analiz sonuçları. ....	259
Şekil 5.44 B zemin ve karışımlarına ait TGA analiz sonuçları. ....	261





## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 Yol dolguları için stabilizasyon yöntemleri .....	7
Çizelge 2.1 ASTM C618 (2019) standardına göre uçucu kül sınıflandırması. ....	13
Çizelge 2.2 TS EN 197-1 (2012) standardına göre uçucu kül sınıflandırması. ....	15
Çizelge 2.3 Uçucu kül temel bileşenlerinin yaklaşık miktarları .....	16
Çizelge 2.4 Kireç ile stabilizasyon sonucu elde edilmesi gereken dayanımlar.....	26
Çizelge 3.1 Tez çalışmasında kullanılan zemin karışımlarının kodları ve açıklaması.....	56
Çizelge 3.2 S ve B zeminler ile karışımlarına ait özgül ağırlık sonuçları. ....	57
Çizelge 3.3 S ve B zeminler ile karışımlarına ait hidrometre deney sonuçları. ....	59
Çizelge 3.4 S ve B zeminler ile karışımlarına ait kıvam limitleri deney sonuçları. ....	60
Çizelge 3.6 B zemine ait XRF analiz sonuçları. ....	73
Çizelge 3.7 Uçucu küle ait XRF analiz sonuçları .....	76
Çizelge 3.8 Farklı standartlara göre uçucu külün uyması gereken değerler. ....	78
Çizelge 3.9 Kirece ait XRF analiz sonuçları. ....	79
Çizelge 3.10 EN 14227 Standartları listesi .....	82
Çizelge 3.11 Ani taşıma indeksi kategorisi .....	83
Çizelge 3.12 Nemlilik şartları kategorisi.....	84
Çizelge 3.13 Kaliforniya taşıma oranı kategorisi.....	85
Çizelge 3.14 Serbest basınç dayanımı sınıfları .....	86
Çizelge 3.15 Şişme sınıfları . ....	87
Çizelge 3.16 Optimum kireç katkısı için S zemin ve B zemine ait pH analiz sonuçları.....	89
Çizelge 3.17 Dayanım deneyleri ve mikro analizler. ....	101
Çizelge 3.18 Dayanım deney detayı ve kür süreleri.....	102
Çizelge 3.19 Mikro analiz sayısı ve kür süresi detayları.....	103
Çizelge 4.1 S zemine ve seçili karışımlarına ait serbest basınç deney sonuçları. ....	107
Çizelge 4.2 B zemine ve seçili karışımlarına ait serbest basınç deney sonuçları.....	117

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.3 S zemin ve S30FA5L karışımları donma-çözülme sonrası serbest basınç deney sonuçları.....	124
Çizelge 4.4 B zemin ve B30FA5L karışımları donma-çözülme sonrası serbest basınç deney sonuçları.....	127
Çizelge 4.5 S zemin ve seçili karışımları için dolaylı çekme deney sonuçları.....	131
Çizelge 4.6 B zemin ve seçili karışımları için dolaylı çekme deney sonuçları.....	141
Çizelge 4.7 S zemin ve bazı karışımlarına ait MCV deney sonuçları.....	150
Çizelge 4.8 B zemin ve bazı karışımlarına ait MCV deney sonuçları.....	156
Çizelge 4.9 S zemin ve bazı karışımlarına ait IBI deney sonuçları.....	163
Çizelge 4.10 B zemin ve bazı karışımlarına ait IBI deney sonuçları.....	167
Çizelge 4.11 S zemin ve bazı karışımlarına ait CBR deney sonuçları.....	171
Çizelge 4.12 B zemin ve bazı karışımlarına ait CBR deney sonuçları.....	175
Çizelge 4.13 S zemin ve bazı karışımlarına ait lineer şişme deney sonuçları.....	179
Çizelge 4.14 B zemin ve bazı karışımlarına ait lineer şişme deney sonuçları.....	182
Çizelge 5.1 UCS deney sonuçlarında kullanılan kodların açıklamaları.....	188
Çizelge 5.2 Serbest basınç dayanımı sonuçlarının özeti.....	200
Çizelge 5.2 Serbest basınç dayanımı sonuçlarının özeti (devam ediyor).....	201
Çizelge 5.3 Donma-çözülmeli serbest basınç dayanımı sonuçlarının özeti.....	206
Çizelge 5.4 ITS deney sonuçlarında kullanılan kodların açıklamaları.....	207
Çizelge 5.5 Dolaylı çekme dayanımı sonuçlarının özeti.....	215
Çizelge 5.6 Nemlilik şartları sonuçlarının özeti.....	222
Çizelge 5.7 Ani taşıma indeksi sonuçlarının özeti.....	228
Çizelge 5.8 Kaliforniya taşıma oranı sonuçlarının özeti.....	239
Çizelge 5.9 Lineer şişme sonuçlarının özeti.....	248
Çizelge 5.10 XRD analizinde kullanılan minerallerin kimyasal formülleri ve kısaltmaları..	252
Çizelge 5.11 Düşük plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait XRF sonuçları.....	257
Çizelge 5.12 Yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait XRF sonuçları.....	257
Çizelge 6.1 Dayanım deneyleri sonucu elde edilen optimum karışımlar.....	266

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

A	: Alüminyum Oksit ( $Al_2O_3$ )
B	: Yüksek Plastisiteli Killi Zemin
BaO	: Baryum Oksit
BFA	: Uçucu Kül Katkılı ve Katkısız B Zemin ve Karışımları
BFA <sub>0</sub>	: Kürsüz Durumda Uçucu Kül Katkılı ve Katkısız B Zemin ve Karışımları
BFA <sub>7</sub>	: 7 Gün Kür Durumda Uçucu Kül Katkılı ve Katkısız B Zemin ve Karışımları
BFA <sub>28</sub>	: 28 Gün Kür Durumda Uçucu Kül Katkılı ve Katkısız B Zemin ve Karışımları
BFA	: Kireç Katkılı ve Katkısız B Zemin ve Karışımları
BL <sub>0</sub>	: Kürsüz Durumda Kireç Katkılı ve Katkısız B Zemin ve Karışımları
BL <sub>7</sub>	: 7 Gün Kür Durumda Kireç Katkılı ve Katkısız B Zemin ve Karışımları
BL <sub>28</sub>	: 28 Gün Kür Durumda Kireç Katkılı ve Katkısız B Zemin ve Karışımları
B5FA	: Yüksek Plastisiteli Killi Zemin + % 5 Uçucu Kül
B10FA	: Yüksek Plastisiteli Killi Zemin + % 10 Uçucu Kül
B15FA	: Yüksek Plastisiteli Killi Zemin + % 15 Uçucu Kül
B20FA	: Yüksek Plastisiteli Killi Zemin + % 20 Uçucu Kül
B30FA	: Yüksek Plastisiteli Killi Zemin + % 30 Uçucu Kül
B30FA3L	: Yüksek Plastisiteli Killi Zemin + % 30 Uçucu Kül + % 3 Kireç
B30FA5L	: Yüksek Plastisiteli Killi Zemin + % 30 Uçucu Kül + % 5 Kireç
B30FA7L	: Yüksek Plastisiteli Killi Zemin + % 30 Uçucu Kül + % 7 Kireç
B30FA_L	: % 30 Uçucu Kül ve Kireç Katkılı ve Katkısız B Zemin ve Karışımları
B30FA_L <sub>0</sub>	: % 30 Uçucu Kül + Kireç İçeren 0 Gün Kürlü B Zemin ve Karışımları
B30FA_L <sub>7</sub>	: % 30 Uçucu Kül + Kireç İçeren 7 Gün Kürlü B Zemin ve Karışımları
B30FA_L <sub>28</sub>	: % 30 Uçucu Kül + Kireç İçeren 28 Gün Kürlü B Zemin ve Karışımları
B3L	: Yüksek Plastisiteli Killi Zemin + % 3 Kireç
B5L	: Yüksek Plastisiteli Killi Zemin + % 5 Kireç
B7L	: Yüksek Plastisiteli Killi Zemin + % 7 Kireç

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

B9L	: Yüksek Plastisiteli Killi Zemin + % 9 Kireç
C	: Kalsiyum Oksit (CaO)
C <sub>2</sub> S	: Dikalsiyum Silikat
C <sub>3</sub> A	: Trikalsiyum Alüminat
C <sub>4</sub> A	: Tetrakalsiyum Alümino Ferrit
C <sub>3</sub> S	: Trikalsiyum Silikat
Ca	: Kalsiyum
CaCO <sub>3</sub>	: Kalsiyum Karbonat
Ca(OH) <sub>2</sub>	: Kalsiyum Hidroksit (Portlandit=Sönmüş Kireç)
CaSO <sub>4</sub>	: Anhidrit
CEM	: Çimento
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
Cl	: Klor
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Kromyum (III) Oksit
Cu	: Bakır
C <sub>u</sub>	: Drenajsız Kayma Mukavemeti
D	: Numune Çapı
E	: Elastisite Modülü
F	: Demir Oksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
F	: Numuneye Uygulanan Maksimum Kuvvet
FA	: Uçucu Kül
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	: Magnetit Oksit
G <sub>s</sub>	: Özgül Ağırlık
H	: Hidrojen
H	: Numune Yüksekliği
H <sub>2</sub> O	: Su
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	: Karbonit Asit
I	: İllit

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

ITS_Bavg <sub>0</sub>	: 0 Gün Kür Süreli B zeminin Ortalama Dolaylı Çekme Dayanımı
ITS_BFA	: Uçucu Kül Katkılı ve Katkısız B Zemine Ait Tüm Kür Sürelerinde Bulunan ITS Değeri
ITS_BL	: Kireç Katkılı ve Katkısız B Zemine Ait Tüm Kür Sürelerinde Bulunan ITS Değeri
ITS_B30FA_L	: % 30 Uçucu Kül ile Kireç Katkılı ve Katkısız B Zemine Ait Tüm Kür Sürelerinde Bulunan ITS Değeri
ITS_Savg <sub>0</sub>	: 0 Gün Kür Süreli S zeminin Ortalama Dolaylı Çekme Dayanımı
ITS_SFA	: Uçucu Kül Katkılı ve Katkısız S Zemine Ait Tüm Kür Sürelerinde Bulunan ITS Değeri
ITS_SL	: Kireç Katkılı ve Katkısız S Zemine Ait Tüm Kür Sürelerinde Bulunan ITS Değeri
ITS_S30FA_L	: % 30 Uçucu Kül ile Kireç Katkılı ve Katkısız S Zemine Ait Tüm Kür Sürelerinde Bulunan ITS Değeri
K	: Potasyum
K	: Kaolinit ( $Al_2Si_2O_5OH_4$ )
K	: İllit
K <sub>2</sub> O	: Potasyum Oksit
L	: Kireç (Lime)
M	: Magnezyum Oksit
M	: Montmorillonit
Mg	: Magnezyum
MgO	: Magnezyum Oksit
MI	: Orta Plastisiteli Silt
ML	: Düşük Plastisiteli Silt
Mu	: Mullit
Na	: Sodyum
Na <sub>2</sub> O	: Sodyum Oksit
OH	: Hidroksil
Q	: Kuvars (Quartz)
P	: Portlandit
P	: Potasyum Dioksit

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

PbO	: Kurşun (II) Oksit
Rb <sub>2</sub> O	: Rubidyum Oksit
R <sub>c</sub>	: Serbest Basınç Dayanımı
R <sub>it</sub>	: Dolaylı Çekme Dayanımı
S	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin
SAF	: SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
SC	: Killi Kum
S5FA	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 5 Uçucu Kül
S10FA	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 10 Uçucu Kül
S15FA	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 15 Uçucu Kül
S20FA	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 20 Uçucu Kül
S30FA	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 30 Uçucu Kül
S30FA3L	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 30 Uçucu Kül + % 3 Kireç
S30FA5L	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 30 Uçucu Kül + % 5 Kireç
S30FA7L	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 30 Uçucu Kül + % 7 Kireç
S30FA_L	: % 30 Uçucu Kül ve Kireç Katkılı ve Katkısız S Zemin ve Karışımları
S30FA_L0	: % 30 Uçucu Kül + Kireç İçeren 0 Gün Kürlü S Zemin ve Karışımları
S30FA_L7	: % 30 Uçucu Kül + Kireç İçeren 7 Gün Kürlü S Zemin ve Karışımları
S30FA_L28	: % 30 Uçucu Kül + Kireç İçeren 28 Gün Kürlü S Zemin ve Karışımları
S2L	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 2 Kireç
S3L	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 3 Kireç
S4L	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 4 Kireç
S5L	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 5 Kireç
S6L	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 6 Kireç
S7L	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 7 Kireç
S8L	: Düşük Plastisiteli Killi Zemin + % 8 Kireç
SFA	: Uçucu Kül Katkılı ve Katkısız S Zemin ve Karışımları
SFA <sub>0</sub>	: Kürsüz (0 gün) durumda uçucu kül katkılı ve katkısız S zemin ve karışımları
SFA <sub>7</sub>	: 7 gün kür durumda uçucu kül katkılı ve katkısız S zemin ve karışımları
SFA <sub>28</sub>	: 28 gün kür durumda uçucu kül katkılı ve katkısız S zemin ve karışımları
SiO <sub>2</sub>	: Silisyum Dioksit (Quartz)
SL	: Kireç Katkılı ve Katkısız S Zemin ve Karışımları

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

SL <sub>0</sub>	: Kürsüz (0 gün) durumda kireç katkılı ve katkısız S zemin ve karışımları
SL <sub>7</sub>	: 7 gün kür durumda kireç katkılı ve katkısız S zemin ve karışımları
SL <sub>28</sub>	: 28 gün kür durumda kireç katkılı ve katkısız S zemin ve karışımları
SO <sub>3</sub>	: Kükürt Trioksit (Sülfat)
SrO	: Stronsiyum Oksit
T	: Titanyum Dioksit
TiO <sub>2</sub>	: Titanyum Dioksit
UCS_Bavg <sub>0</sub>	: 0 Gün Kür Süreli B zeminin Ortalama Serbest Basınç Dayanımı
UCS_BFA	: Uçucu Kül Katkılı ve Katkısız B Zemine Ait Tüm Kür Sürelerinde Bulunan UCS Değeri
UCS_BL	: Kireç Katkılı ve Katkısız B Zemine Ait Tüm Kür Sürelerinde Bulunan UCS Değeri
UCS_B30FA_L	: % 30 Uçucu Kül ile Kireç Katkılı ve Katkısız B Zemine Ait Tüm Kür Sürelerinde Bulunan UCS Değeri
UCS_Savg <sub>0</sub>	: 0 Gün Kür Süreli S zeminin Ortalama Serbest Basınç Dayanımı
UCS_SFA	: Uçucu Kül Katkılı ve Katkısız S Zemine Ait Tüm Kür Sürelerinde Bulunan UCS Değeri
UCS_SL	: Kireç Katkılı ve Katkısız S Zemine Ait Tüm Kür Sürelerinde Bulunan UCS Değeri
UCS_S30FA_L	: % 30 Uçucu Kül ile Kireç Katkılı ve Katkısız S Zemine Ait Tüm Kür Sürelerinde Bulunan UCS Değeri
ZnO	: Çinko Oksit
ZrO <sub>2</sub>	: Zirkonyum Oksit
w <sub>opt</sub>	: Optimum Su İçeriği
ρ <sub>kmaks</sub>	: Maksimum Kuru Yoğunluk
γ <sub>kmaks</sub>	: Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık
σ	: Gerilme
ε	: Yer Değiştirme
θ	: Pik Geliş Açısı

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

### KISALTMALAR

<b>ACAA</b>	: Amerika Kömür Külü Topluluğu
<b>ASCE</b>	: Amerika İnşaat Mühendisleri Topluluğu
<b>ASTM</b>	: Amerika Malzeme ve Deney Topluluğu
<b>BS</b>	: İngiliz Standardı
<b>CAH</b>	: Kalsiyum Alumina Hidrat
<b>CBR</b>	: Kaliforniya Taşıma Oranı
<b>CSH=C-S-H</b>	: Kalsiyum Silikat Hidrat
<b>CYC</b>	: Donma Çözülme Çevrimi
<b>DSİ</b>	: Devlet Su İşleri
<b>EDS</b>	: Elektro Dispersif Spektroskopy
<b>EIE</b>	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
<b>EN</b>	: Avrupa Normu
<b>EPA</b>	: Çevre Koruma Kurumu
<b>IBI</b>	: Ani Taşıma İndeksi
<b>ITS</b>	: Dolaylı Çekme Dayanımı
<b>KGM</b>	: Karayolları Genel Müdürlüğü
<b>KK</b>	: Kızdırma Kaybı
<b>KTŞ</b>	: Karayolları Teknik Şartnamesi
<b>LL</b>	: Likit Limit
<b>LS</b>	: Lineer Şişme
<b>MCV</b>	: Nemlilik Şartları Değeri
<b>PI</b>	: Plastisite İndeksi
<b>PL</b>	: Plastik Limit
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>TCK</b>	: Türkiye Cumhuriyeti Karayolları
<b>TG</b>	: Termogravimetrik Analiz Sonucu Kütle Miktarı
<b>TGA</b>	: Termogravimetrik Analiz
<b>TS</b>	: Türk Standartları
<b>UCS</b>	: Serbest Basınç Dayanımı

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

<b>USCS</b>	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
<b>UU</b>	: Konsolidasyonsuz Drenajsız
<b>XRD</b>	: X Işını Kırınım Yöntemi
<b>XRF</b>	: X Işını Floresans





## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

#### 1.1 ZEMİN STABİLİZASYONU KAVRAMI

Mühendislik parametreleri açısından zayıf zeminler, teknik standartlar ve şartnameler tarafından belirtilen yeterliliğe sahip değildir. Bu tip zeminlerin çeşitli yöntemler ile dayanım ve durabilite özelliklerinin iyileştirilerek üzerine gelecek tüm yüklere karşı dirençli olması gerekmektedir. Zeminlerin mühendislik parametrelerinin değiştirilmesine yönelik yapılan bu işlemlerin adlandırılmasında kavram karmaşası olabilmektedir. Zeminlerin mühendislik özelliklerinin değiştirilmesi 3 ana başlıkta incelenmektedir. Bunlar zeminin ıslahı, stabilizasyonu ve iyileştirmesi olarak sıralanabilir.

Islah, zeminin mühendislik parametrelerinin ani değişime uğraması durumudur. Islah edilmiş zeminin taşıma gücünün artması, sıkışabilirliğinin ve plastisitenin azalması vb. şekilde özelliklerinin değişmesi beklenir. Ayrıca ıslah işleminin aşağıda belirtilen özelliklerden bir ya da birkaçını sağlaması gerekmektedir (BS EN 14227-11 2006).

- Geleneksel hafriyat ekipmanları ile taşınabilme
- Tabaka tabaka sıkıştırılabilme
- İlave tabaka için çalışma platformu sağlayabilme
- Cüruf, uçucu kül, çimento, hidrolik yol bağlayıcısı veya başka bir malzeme ile bir sonraki işlem için zeminin hazırlanması

Stabilizasyon, zemine ait özelliklerin (dayanım ve durabilite parametreleri), mühendislik gereksinimlerine uygun hale getirilmesi amacıyla değiştirilmesidir (Ingles ve Metcalf 1972). Stabilize edilen bir zeminin mekanik performansı, stabilitesi, suya ve donmaya karşı reaksiyonu gibi orta-uzun süreli özelliklerinin önemli miktarda artması beklenmektedir (BS EN 14227-11 2006).

İyileştirme ise genel bir terim olup katkı malzemesinin eklenmesinden başlayıp zeminin amaçlanan bütün özelliklere sahip olmasının tamamlanmasına kadar geçen sürede yapılan tüm işlemlere denir. Dolayısıyla iyileştirme, ıslah ve stabilizasyon işlemlerinin tamamını kapsayan geniş bir tanımlama olmaktadır (BS EN 14227-11 2006).

Yol dolgusu gibi mühendislik yapılarının projelendirilmesinde, dolgu zeminin dayanım ve durabilite özelliklerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu durum değerlendirildiğinde özelliklerin yetersiz kalması durumunda ilgili zeminin ıslahı, stabilizasyonu ve iyileştirilmesi kavramları arasında stabilizasyon ve iyileştirme metotları ön plana çıkmaktadır. Islah, çoğunlukla zeminin indeks özelliklerinin değişimine yöneliktir. Stabilizasyonda ise şartname tarafından da belirtilen ve yapılacak yapının ömrünü doğrudan etkileyecek hedef zemin parametrelerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır.

## 1.2 ZEMİN STABİLİZASYONU

Değişen ve gelişen dünya düzeninde, atık malzemelerin değerlendirilmesi ve çevreye karşı duyarlılık düşüncesi gittikçe yaygınlaşmıştır. Bu konunun önemi gerek dünyada gerekse ülkemizde özellikle son yıllarda oldukça artmıştır. Dünyada var olan kısıtlı imkanlardan faydalanacak insan sayısının her geçen gün yükselmesi, doğal kaynakların azalması ve doğanın tahribatı, bu artışın en önemli sebeplerindedir. İnsanların en önemli ihtiyaçlarından birisi olan barınma ihtiyacı, Maslow ihtiyaçlar piramidinde güvenlik gereksinimi adı altında "mülkiyet güvenliği" olarak 2. basamakta yer almaktadır (Maslow 1943). Bu ihtiyacı karşılamak için kişiye özel güvenli yaşam alanları (binalar, yol, su ve elektrik gibi) oluşturulmalıdır. Bu yaşam alanlarının sağlam zeminler üzerine inşa edilmesi gerekmektedir. Fakat, mevcut olan zeminlerin mühendislik özellikleri, ilgili alan üzerinde veya içinde yapılacak inşaat yapılarını (yol dolgusu, baraj ve bina inşaatları, tünel, vb.) güvenle taşımaktan uzak olabilir. Bu durumda, yapılacak inşaat işi için, aşağıdaki seçeneklerden birisi tercih edilerek problemin çözümüne yönelik olarak uygulanmalıdır (Ingles ve Metcalf 1972).

- Araziye mevcut olan zemini değiştirmeden, ilgili bölgenin yönetmeliklerindeki gereksinim ve kısıtlamaları karşılayabilecek şekilde bir tasarım yapmak
- Arazideki malzemenin kaldırılarak yerine daha mukavemetli bir zeminin yerleştirilmesi

- Mevcut zeminin kısa ve uzun dönem dayanımlarını artıracak şekilde özelliklerini değiştirerek, yapılması planlanan yapılar için yeterli bir yeni malzeme üretmek

Bu üç seçenek üzerinde analiz yapan mühendis, emniyet ve ekonomiyi dikkate alarak seçimini gerçekleştirecektir. Her üç madde birlikte değerlendirildiğinde, her madde kendine özgü projede kullanılabileceği gibi, özellikle üçüncü maddede belirtilen zemin stabilizasyonunun arazi üzerinde uygulandığı örneklere de sıklıkla rastlanmaktadır.

Zemin stabilizasyonu için zemin özelliklerini değiştirmenin çok farklı yöntemleri mevcuttur. Fakat, zemin özelliklerinin farklılık göstermesi ve karmaşık yapısı nedeniyle tüm zemin tiplerinin stabilizasyonunu uygun bir şekilde sağlayacak tek bir yöntem mevcut değildir. Bu zamana kadar elde edilen tecrübeler, zemin özelliklerinin aynı arazi üzerinde dahi birkaç metreden birkaç km'ye büyük farklılıklar gösterebileceğini ortaya koymaktadır (Ingles ve Metcalf 1972).

Zemin stabilizasyonu yöntemleri, 4 ana kategoriye ayrılmaktadır (Hausmann 1990).

- Mekanik stabilizasyon
- Hidrolik stabilizasyon
- Fiziksel stabilizasyon
- Kimyasal stabilizasyon

Zemin stabilizasyon yöntemlerinin seçilmesinde, zemin tiplerinin dikkate alınarak karar verilmesi gerekmektedir. Örnek verilecek olursa, patlatmalı sıkıştırma ile stabilizasyon yüksek tabaka kalınlıklarına sahip gevşek çakıllarda, kumlarda ve bazı siltlerde (dane çapı 0.06 mm-0.075 mm arası) kullanılabilmektedir. Dinamik kompaksiyon ile stabilizasyon da tıpkı patlatmalı olan gibi yüksek katmanlı tabaka kalınlıklarına sahip ve geniş alana yayılan çakıllarda, kumlarda ve bazı siltlerde (0.05 mm-0.075 mm arası) tercih edilebilmektedir. Kimyasal katkı ile stabilizasyon ise killi ve siltli zeminlerde daha etkilidir.

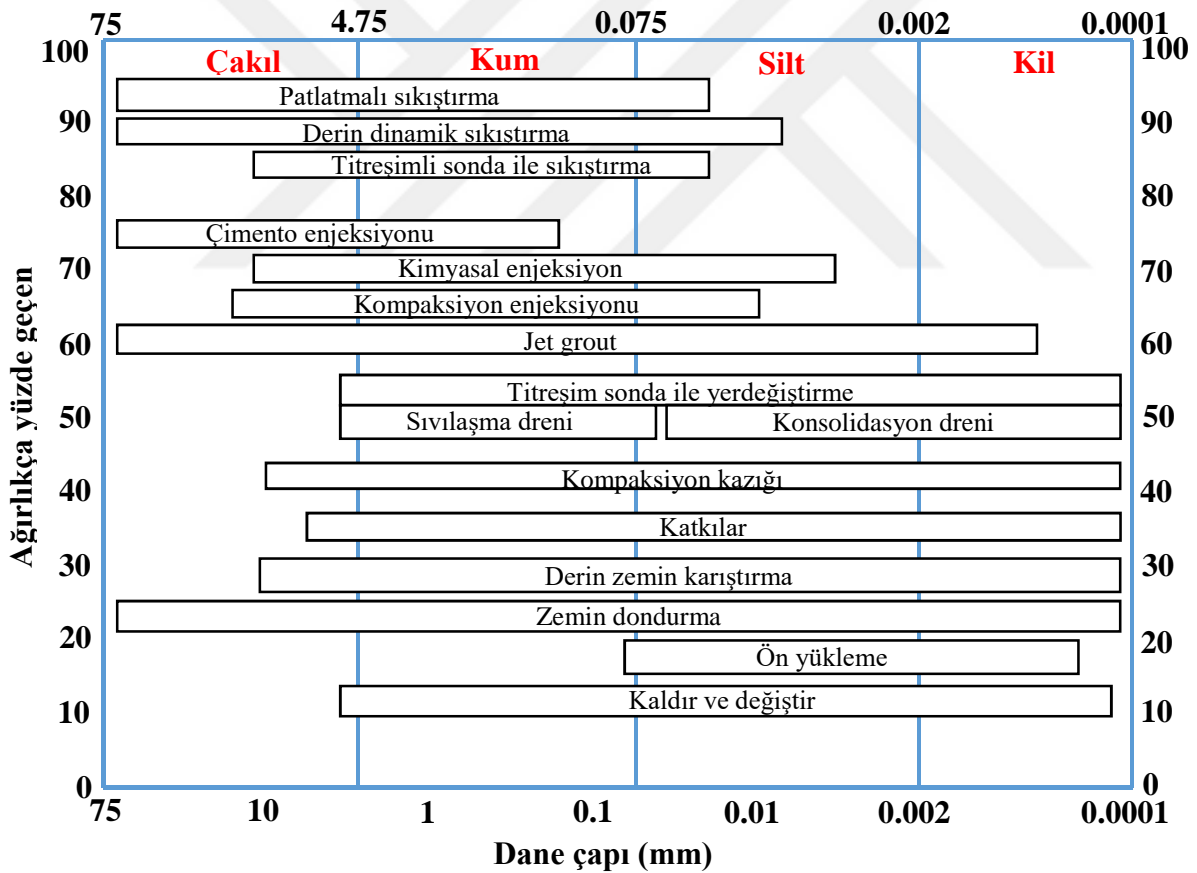
### **1.3 MEKANİK STABİLİZASYON**

Mekanik stabilizasyon, zeminin mühendislik dolgusu olarak kullanılabilmesi için kompakte edilerek sıkılaştırılması (yoğunlaştırılması) ile fiziksel özelliklerinin değiştirilmesidir. Başka bir ifade ile zemin danelerinin yeniden düzenlenmesi ya da zemin gradasyonunun iyileştirilmesi

yöntemleri ile zemin özelliklerinin değiştirilmesini içermektedir. Partiküllerin yeniden düzenlenmesinin birçok yolu mevcuttur. Bu yöntemler, örnek olarak zemin tabakalarının karıştırılması, zeminin yoğurulması ve zeminin sıkılaştırılmasıdır (Raj 2005).

Mekanik stabilizasyon ile güçlendirilecek olan zemin, üzerine inşa edilecek yapıdan gelen yük altında yüksek deformasyon oluşturmayacak bir dayanıma sahip olmalıdır. Buna ilaveten kısa ve uzun dönem dayanım ve durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi de mekanik stabilizasyon ile hedeflenen bir durumdur.

Mekanik stabilizasyon çeşitli yöntemler ile yapılabilmektedir. Bu yöntemler, Şekil 1.1'de de görüldüğü gibi dane çapı ve ağırlıkça yüzde geçen esas alınarak zemin tipine göre belirlenmiştir.



Şekil 1.1 Zemin tipine göre uygulanabilir stabilizasyon yöntemleri (Nicholson 2015).

Çakıllı zeminler için patlatmalı sıkıştırma, derin dinamik sıkıştırma, çimento enjeksiyonu, jet grout ve zemin dondurma yöntemleri daha geniş dane çapı aralığı için uygulanabilir. Killi

zeminlerde ise katkılar, derin zemin karıştırma, zemin dondurma, kompaksiyon kazığı, konsolidasyon dreni, titreşimli sonda ile yerdeğiştirme ve ön yükleme metotları kullanılabilir. Jet grout yöntemi ise dane çapı 0.001 ile 0.002 mm arasındaki killer için daha etkili olmaktadır. Kumlu zeminlerde tüm yöntemler verimli olarak görünmekte olup, siltlerde ise sıvılaşma dreni ve çimento enjeksiyonu haricindeki yöntemler kullanışlıdır.

#### 1.4 HİDROLİK STABİLİZASYON

Hidrolik stabilizasyon, boşluk suyu basıncının azaltılması amacı ile gerçekleştirilen işlemler bütünüdür. Bu kapsamda, su seviyesinin düşürülmesi, sızmanın yönlendirilmesi veya su içeriğinin azaltılması ile zemin özelliklerinin güçlendirilmesi sağlanabilir. Hidrolik stabilizasyon bu yönü ile özellikle sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu bölgelerde de etkin bir şekilde kullanılabilir. Su seviyesinin düşürülmesi zeminlerin taşıma gücünün de artmasını sağlar. Susuzlaştırma (dewatering), ön yükleme, düşey dren kullanımı, düşey drensiz ön yükleme gibi farklı yöntemler ile hidrolik stabilizasyon gerçekleştirilebilir. Hidrolik stabilizasyonda kullanılacak olan yöntem, zemin tipine göre farklılık gösterebilir. İnce daneli zeminler için gravite drenajı yavaş olup verimli değildir, bu tip zeminlerde susuzlaştırma süreci ön yükleme veya elektro osmoz gibi yöntemler ile benzerdir. Zeminin susuzlaştırılması, inşaat mühendisliği projelerinde genellikle aşağıda madde madde belirtilmiş olan durumlardan bir veya birkaçı için gerçekleştirilebilir (Hausmann 1990).

- Bina temelleri, barajlar ve tüneller gibi mühendislik yapılarının kazıları için kuru bir çalışma alanı oluşturmak
- Doğal ya da imal edilmiş şevlerin stabilizasyonu
- İstinat duvarlarına gelen yanal basınçların azaltılması
- İnce dane içeren zeminlerin sıkışabilirliğinin azaltılması
- Temel taşıma gücünün artırılması
- Ariyet malzemesinin işlenebilirliğini iyileştirmek
- Depremde oluşacak sıvılaşma potansiyelini düşürmek
- Yüzey erozyonunu engellemek
- Don kabarması hasarını azaltmak veya engellemek

## 1.5 FİZİKSEL STABİLİZASYON

Fiziksel stabilizasyon, ısıl işlemler ve dondurma gibi yöntemler ile zeminlerin mühendislik parametrelerinin amaca yönelik olarak değiştirilmesini içermektedir. Isıl stabilizasyonda, sıcaklık 400°C'nin üstüne çıktığında ilgili zeminin mühendislik özelliklerinde kalıcı değişimler olmaktadır. Bu yöntemde zeminin ısıtılmasında maalesef çok enerji harcanmaktadır. Literatürde yaklaşık olarak 1 m<sup>3</sup> zeminin stabilize edilmesi için ortalama 50 ile 100 lt yakıt gerektiği bildirilmektedir. Zemin dondurma yöntemi, dayanımda önemli bir artışa yol açması ile zorlu temel problemlerinin çözülmesi açısından önemlidir. Dondurma yöntemi, açık kazılar için istinat yapılarında, tünel inşaatı boyunca sızmanın kontrolü amacıyla, heyelana karşı geçici stabilizasyon için, kohezyonsuz zeminlerde örselenmemiş numune alınması amacıyla ve yer altı borularındaki sızıntıların kapatılması amacıyla farklı uygulamalarda kullanılabilir (Hausmann 1990).

## 1.6 KİMYASAL STABİLİZASYON

Kimyasal stabilizasyon, mühendislik özellikleri yeterli düzeyde olmayan zeminlerin çeşitli kimyasal katkıları (uçucu kül, kireç, çimento, bitüm, polimer vb.) ile dayanım ve durabilite performanslarının güçlendirilmesidir. Özellikle yol dolgularında kireç, uçucu kül, çimento, bitüm gibi katkıların kullanılması dünya çapında yaygınlaşmıştır. Bununla birlikte, stabilizasyon sonrasında elde edilen dayanım ve durabilite değerlerinin de standartlar ve yönetmelikler açısından beklenen şartları sağlayıp sağlamadığına dikkat edilmelidir. Konu hakkında yapılan çalışmalar arttıkça, stabilize edilecek olan zemin için kullanılacak olan kimyasal katkının isabetli bir şekilde belirlenmesinin önemi anlaşılmıştır. Çizelge 1.1 incelendiğinde farklı kimyasal katkıları için yol dolgularında kullanılmak üzere hazırlanmış stabilizasyon yöntemleri mevcuttur. Yoğun olarak kullanılan portland çimentosu, kireç, kireç- uçucu kül, kireç- uçucu kül- çimento, bitüm ve kimyasallar ele alınmıştır. Buna göre farklı gradasyon ve plastisite durumu göz önüne alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.

**Çizelge 1.1** Yol dolguları için stabilizasyon yöntemleri (FHWA 2006).

Stabilizasyon Metodu	Zemin Tipi	İyileştirme	Notlar
<b>Katkı</b>			
Portland Çimentosu	Plastik		Çimento hidratasyonu daha az
	Kaba daneli		Çimento hidratasyonu
Kireç	Plastik	Kurutma	Hızlı
		Dayanım kazanımı	Hızlı
		Plastisite azalımı	Hızlı
		İrileşen doku	Hızlı
		Uzun dönem puzolanik çimentolaşma	Yavaş
	İnce dane içeren kaba	Plastik ile aynı	Plastik ince danelerin miktarına bağlı
	Non-plastik	Yok	Reaktif malzeme yok
Kireç-uçucu kül	Kireç ile aynı	Kireç ile aynı	Daha geniş aralığı kapsar
Kireç-çimento-uçucu kül	Kireç ile aynı	Kireç ile aynı	Daha geniş aralığı kapsar
Bitüm	Kaba	Su sızdırmazlığı güçlendirir	Asfalt çimentosu veya sıvı asfalt
	Biraz ince	Kaba ile aynı	Sıvı asfalt
	İnce	Yok	Karıştırılmaz
Puzolanik ve cüruflar	Siltler ve kaba	Filler gibi davranır	Sıkı ve güçlü
		Danelerin çimentolaşması	Çimentodan daha yavaş
Kimyasallar	Plastik	Dayanım artışı ve hacim stabilitesi	Karıştırılması zor

Yapılan değerlendirmeye göre puzolanlar ve cüruflar, özellikle siltli ve kaba daneli zeminlerin gradasyonunu düzeltmek ve daneler arasında çimentolaşmayı sağlamak amacıyla kullanılırlar. Puzolanik malzemeler (uçucu kül vb.) ve cüruflar daneler arasında dolgu gibi davranmakta olup gradasyon derecesini artırılırlar. Böylelikle, zeminin boşluklarının azalmasına, yoğunluğunun artmasına ve puzolanik yapılarından dolayı yavaş da olsa çimentolaşmaya yardımcı olurlar.

Bitüm stabilizasyonu ise özellikle kaba daneli zeminlerde daha uygun olmak ile birlikte zeminlere ait su sızdırmazlık özelliğini güçlendirirler. Bitüm malzemesi, kaba daneli zeminlerde asfalt çimentosu veya sıvı asfalt olarak kullanılırken, ince danelilerde ise sadece sıvı asfaltta değerlendirilmektedir.

Kireç stabilizasyonunda ise plastik durumdaki killi zeminlerin plastisitesinin azaltılması ve dayanım kazanımı şeklinde mühendislik özelliklerinin güçlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bunun yanında, uzun dönem dayanımı (durabilite) temsil eden puzolanik çimentolaşma ise daha yavaş olmaktadır. Kireç katkısının yanına uçucu kül eklendiği durumda elde edilen mühendislik davranışı neredeyse kireç katkısı ile aynıdır, fakat kirece göre daha geniş bir aralığı kapsamaktadır. Kireç-uçucu kül-çimento kombinasyonu da kireç-uçucu kül karışımı ile benzer dayanım ve durabilite davranışı göstermektedir.

Hicks (2002) tarafından kireç stabilizasyonunun, danelerinin ağırlıkça % 25'inin 200 numaralı elekten geçtiği bilinen ve plastisite indeksinin 10'dan büyük olduğu zeminlerde uygun olduğu belirtilmiştir. Engineering Corps tarafından yayınlanan yollarda zemin stabilizasyonu (TM 5-822-14 1994) isimli teknik kılavuzda, düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli killi zeminler için çimento ve kirecin etkili olduğu belirtilmektedir. Başarılı bir güçlendirme için, kireç stabilizasyonu uygulanacak olan zeminin plastisite indeksi 12 ve daha büyük olmalı iken; çimento stabilizasyonunda ise likit limitin 40'dan ve plastisite indeksinin 20'den küçük olmasının gerekliliği ifade edilmiştir.

İnce daneli zeminlerin zemin karakteristikleri, (mineraloji, gradasyon ve fiziko-kimyasal özellikler) zemin-katkı etkileşimine etki etmektedir. Bu yüzden stabilizör seçimi için, zeminin fiziko-kimyasal özelliklerini güçlendirebilecek bir stabilizörü belirlemek önemlidir. Kimyasal stabilizasyonda uygun katkıyı seçmek için yapılması gereken ilk iş, bir ön çalışma yürütmektir. Bu ön çalışma, aşağıdaki 6 maddenin irdelenmesini içermektedir (Little ve Nair 2009).

- Zeminin kıvamı ve gradasyonu
- Zeminin mineralojisi ve kompozisyonu
- Tasarlanan mühendislik özellikleri
- İyileştirmenin amacı
- Stabilizasyon mekanizması
- Çevresel koşullar ve mühendislik ekonomisi

## 1.7 ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Ülkemizde özellikle termik santrallerden dolayı oldukça fazla miktarda (yıllık en az 15 milyon ton) uçucu kül açığa çıkmaktadır. Ortaya çıkan yüksek miktarda uçucu külün depolanması önemli bir sorundur. Depolama için, seddeler, uçucu kül dağları ve katı atık depolama sahaları kullanılmaktadır. Bu yan ürün bir çok endüstriyel imalatlarda kullanılmasına rağmen her yıl depolanan miktar artmaktadır. Çalışmanın ana amacı yüksek miktarda uçucu külün geri dönüşüm açısından kullanılabilirliğinin (yol alt dolgu malzemesi) tespit edilmesidir. Kullanılabilirliği ise özellikle kil gibi taşıma gücünün zayıf olduğu zeminlerin dayanım ve durabilite özelliklerinin uçucu kül katkısıyla güçlendirilmesi yolu ile kontrol edilecektir.

Çalışma kapsamında düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli kil numuneleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan uçucu kül ve kireç karışım oranlarının ilgili zeminlerin dayanım ve durabilite özelliklerine etkisi belirlenmiştir. Deneysel çalışmada BS EN 14227-11 (2006) ve BS EN 14227-14 (2006) standartları dikkate alınarak hazırlanan deney kurgusunda öncelikle fiziksel tanımlama deneyleri (özgül ağırlık, hidrometre, kıvam limitleri ve standart kompaksiyon) gerçekleştirilmiştir. Daha sonra dayanım ve durabilite deneyleri (serbest basınç, dolaylı çekme, ani taşıma indeksi, nemlilik şartları, CBR, lineer şişme, donma-çözülme sonrası serbest basınç deneyi) yapılmıştır. Dayanım ve durabilite deneylerinden sonra seçilmiş karışımlar (S30FA, S30FA5L, S5L, B30FA, B30FA5L ve B5L) üzerinde mikroanalizler (SEM, XRD, TGA, XRF) gerçekleştirilmiştir. Dayanım ve durabilite deneyleri sonucunda elde edilen parametreler yorumlanmıştır. Mikro analizler sonucunda seçili karışımların killi zeminin mineral ve mikro yapısında yaptığı değişimler gözlenmiştir. Tüm deney ve analizlerin sonucunda her iki zemin grubu için optimum karışım oranları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan ilgili numunelerin yol alt dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği konusunda değerlendirmeler yapılmıştır.



## BÖLÜM 2

### UÇUCU KÜL VE KİREÇ STABİLİZASYONU

#### 2.1 GİRİŞ

Bu bölümde hem uçucu kül hem de kireç ile stabilizasyona yönelik konular yer almaktadır. Öncelikle, uçucu külün tanımı ve genel özellikleri, kullanım tarihçesi, mineralojik ve kimyasal özellikleri ile kullanım alanları hakkında bilgiler sunulmuştur. Sonrasında kireç ile ilgili açıklamalar mevcuttur. Bölümün son kısmında ise uçucu kül ve kireç stabilizasyonu içeren literatür değerlendirilmiştir.

#### 2.2 UÇUCU KÜLÜN TANIMI VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Uçucu kül, kömürün yanması ile oluşan ve baca gazı ile taşınarak elektofiltrelerde veya siklonlarda toplanan bir yan üründür (by-product). Çapı 0.001 mm ve 0.1 mm arasında değişen camsı küre ve 0.01 mm ile 0.3 mm arasında değişen karbon partiküllerinden oluşmaktadır. Kömürün 1400 derece civarı yüksek bir sıcaklıkta yanması kömürle ilişkili minerallerin erimesine ve küresel şeklin oluşmasına yol açmaktadır. İnce küller fırından geçerken ani bir ısı kaybına uğradıkları için bu şekilde amorf ve camsı malzeme gibi sertleşirler. Bu durum uçucu külün özelliklerini değiştirebilmektedir (Türker vd. 2009). Uçucu külün özellikleri çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Uçucu külün kimyasal ve fiziksel kompozisyonunu etkileyen özellikler 4 ana başlıkta değerlendirilebilir (Hausmann 1990).

- Kömür kaynağı ve safsızlığı
- Kömürün pulverizasyon derecesi
- Kazan tipi ve yanma koşulları
- İşlenme ve muhafaza yöntemleri

Bu özelliklerden birinin ya da bir kaçının farklı olması uçucu külün özelliklerini bütünüyle değiştirebilir. Bu yüzden farklı termik santrallerden elde edilen uçucu küller arasında önemli farklar bulunmaktadır. Hatta, aynı termik santrallerde bile farklılıklar söz konusu olabilmektedir. Uçucu küllerin özellikleri arasında oluşan bu değişimlerden dolayı uçucu küllerin sınıflandırılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda uçucu küller, ASTM C618 (2019) standardına göre N, F ve C olmak üzere 3 sınıfa ayrılmaktadırlar. Bir alt bölümde uçucu küllerin nasıl sınıflandırıldığı konusu üzerinde durulmuştur.

Uçucu küller, genellikle, uçucu kül havuzu (ponds), sedde, katı atık depolama sahası gibi çevrelerde depolanmaktadır. Bu durum uçucu külün sadece taşıma maliyetini artırmakla kalmamakta, bununla beraber çevre kirliliği gibi ciddi problemlere de sebep olmaktadır (Ferguson ve Levorson 1999; White vd. 2005; Yeboah ve Burns 2011). Uçucu külün faydalı geri kullanımı ise hem çevreci hem de ekonomik olmaktadır. Son yıllarda derin zemin karıştırma ve zemin stabilizasyonu gibi geoteknik mühendisliği uygulamalarında uçucu külün yeniden kullanımı önem kazanmıştır (Ferguson 1993). Zemine C sınıfı uçucu külün eklenmesi, zeminin gradasyonunu değiştirir, zemin partiküllerini birleştirir ve puzolanik reaksiyonlar sonucunda mikro yapıyı değiştirir. Bu sayede mühendislik özelliklerinin güçlenmesini sağlar. Bu özelliklerinden dolayı C sınıfı uçucu küller geleneksel geoteknik mühendisliği uygulamalarında kapsamlı olarak kullanılmaktadır. Fakat, F sınıfı uçucu külün geri kullanım oranı düşük çimentolaşma etkisinden dolayı C sınıfı uçucu küle göre daha azdır (Yeboah ve Burns 2011). F sınıfı uçucu küller, kısıtlı puzolanik malzeme (kalsiyum, silika, alumina) içermekte olup puzolanik sürecin aktif edilebilmesi kireç ya da çimento gibi bağlayıcı özelliği güçlü olan malzemelere ihtiyaç duyar. Geleneksel stabilizörler (kireç/çimento) ile F sınıfı uçucu kül birlikte kullanıldığında uçucu külün kullanım hacmi ağırlıkça % 20'den daha azdır (Ferguson 1993, White vd. 2005).

### **2.3 UÇUCU KÜLLERİN SINIFLANDIRILMASI**

Uçucu küllerin sınıflandırılması, küllerin içerdikleri oksit yüzdeleri ve bazı fiziksel özelliklerine dayalı gerçekleştirilir. Uçucu küllerin sınıflandırılmasına yönelik ülkemizde TS EN 197-1 (2012) standardı geliştirilmiştir. Amerikan standardı da 2019 yılında güncellenen ASTM C618 standardıdır. Her iki standart da birbirine benzer özellikler göstermesine rağmen farklılıkları da mevcuttur.

### 2.3.1 ASTM C618 Standardına Göre Sınıflandırma

Külün sınıflandırılmasında ASTM C618 (2019) standardına göre ilk üç bileşenin ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) toplamı dikkate alınmaktadır. Çizelge 2.1 bir uçucu külün sınıflandırılmasında baz alınan özellikleri göstermektedir.

**Çizelge 2.1** ASTM C618 (2019) standardına göre uçucu kül sınıflandırması.

Özellikler	N Sınıfı	F Sınıfı	C Sınıfı
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq \% 70$	$\geq \% 50$	$\geq \% 50$
CaO	Sadece rapor ile	$\leq \% 18$	$> \% 18$
$\text{SO}_3$	$\leq \% 4$	$\leq \% 5$	$\leq \% 5$
Nem içeriği	$\leq \% 3$	$\leq \% 3$	$\leq \% 3$
Kızdırma kaybı	$\leq \% 10$	$\leq \% 6$	$\leq \% 6$

Uçucu kül, ASTM C618 (2019) standardına göre N, F ve C olmak üzere 3 sınıfa ayrılmaktadır. Tüfler ve volkanik küller N sınıfı uçucu küller grubuna girmektedir. N sınıfı uçucu küllerde  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (SAF) miktarının minimum % 70 olması gerekmektedir. Ayrıca kükürt trioksit ( $\text{SO}_3$ ) miktarı maksimum % 4 ile sınırlandırılırken, kızdırma kaybının % 10'dan ve nem içeriğinin % 3'den fazla olmaması gerekmektedir.

F sınıfı uçucu küllerin puzolanik özellikleri mevcuttur, fakat çimentolaşma özellikleri zayıftır. Bu sınıftaki uçucu küllerde SAF miktarının minimum % 50 olması gerekmektedir. Ayrıca kükürt trioksit miktarı maksimum % 5 ile sınırlandırılırken, kızdırma kaybının % 6'dan ve nem içeriğinin % 3'den fazla olmaması gerekmektedir. F sınıfı uçucu küllerin içerdikleri CaO miktarı maksimum % 18'dir. Genellikle bu sınıftaki (F) uçucu küllerin kendi başlarına ana bağlayıcı olma özelliği yoktur. Çimentolaşma miktarı, kireç ve çimentoya göre daha azdır. Bu miktar özellikle uçucu külün içerisinde bulunan CaO miktarından doğrudan etkilenmektedir. Çimentolaşma etkisi için yanlarına mutlaka aktivatör etkisi görmesi açısından çimento, kireç vb. gibi CaO yüzdesi yüksek bağlayıcıların ilavesine ihtiyaç duyarlar. Uçucu kül ile stabilize edilmiş zeminlerde şişme potansiyelinin azalması, kil mineralleri arasındaki iyon değişiminden daha çok mekanik bağlayıcılık ile ilişkilidir (Mackiewicz ve Ferguson 2005).

C sınıfı uçucu küller, F sınıfı uçucu küllere göre daha yüksek miktarda kalsiyum oksit (CaO) içerdikleri için puzolanik özelliklerinin yanında çimentolaşma özellikleri de mevcuttur. Bu yüzden bu sınıfa giren uçucu küller kireç gibi bir aktivatöre ihtiyaç duymazlar. C sınıfı uçucu küllerde SAF miktarının minimum % 50 olması gerekmektedir. Ayrıca kükürt trioksit miktarı maksimum % 5 ile sınırlandırılırken, kızdırma kaybının % 6'dan ve nem içeriğinin % 3'den fazla olmaması gerekmektedir. C sınıfı uçucu küllerin CaO miktarı da % 18'den fazla olmalıdır.

ASTM C618 (2019) standardında 2015'teki sürümüne göre bazı değişiklikler yapılmıştır. 2015 yılında yayınlanan standartta F sınıfı uçucu küllerin SAF miktarının minimum % 70 olması gerekirken ilgili standartta 2019 yılında yapılan değişim ile SAF miktarının olması gereken minimum değer % 50'ye inmiştir. Ayrıca C sınıfı ve F sınıfının ayırt edilmesinde 2015 yılında mevcut olmayan CaO, 2019 yılında belirleyici olmuştur. Standartta göre C sınıfı uçucu küllerin CaO miktarı % 18'den fazla iken, F sınıfı uçucu küllerde ise CaO miktarı % 18'e eşit veya daha azdır.

### **2.3.2 TS EN 197-1 Standardına Göre Sınıflandırma**

TS EN 197-1 (2012) standardında V sınıfı ile W sınıfı uçucu küller mevcuttur. V sınıfı küller genellikle puzolanik özellikler göstermekte olup küresel taneciklerden meydana gelmektedir. Silisyumlu uçucu kül olarak da isimlendirilmektedir. Bu küller çoğunlukla reaktif silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) ve alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) içermektedir. Geri kalan kısmı ise demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve diğer bileşenler oluşturur. Reaktif kalsiyum oksit (CaO) miktarı kütlece % 10'dan az olmalıdır (serbest kalsiyum oksit yüzdesi). Reaktif SiO<sub>2</sub> miktarı da kütlece % 25'i geçmemelidir. W sınıfı küller ise hem puzolanik hem de çimentolaşma özellikleri gösterirler. Kalkerli (kireçli) uçucu kül olarak da isimlendirilmektedir. Reaktif kalsiyum oksit (CaO) miktarı kütlece en az % 10 olmalıdır. Kütlece % 10 ile % 15 arasında reaktif kalsiyum oksit içeren kireçli uçucu küller için reaktif SiO<sub>2</sub> miktarları da % 25'den az olmamalıdır.

Kireçli uçucu kül ve silisyumlu uçucu küller arasında bazı farklar mevcuttur. Çizelge 2.2 incelendiğinde uçucu külleri ayırt eden tek özelliğin reaktif CaO miktarı olduğu görülmektedir. V sınıfı uçucu küller düşük kalsiyum oksit içermekte olup ASTM C618 standardındaki F sınıfı uçucu küle karşılık gelirken, W sınıfı küller ise aynı standarttaki C sınıfı uçucu külleri temsil etmektedir.

**Çizelge 2.2** TS EN 197-1 (2012) standardına göre uçucu kül sınıflandırması.

Özellikler	V Sınıfı	W Sınıfı
Reaktif SiO <sub>2</sub>	≥ % 25	≥ % 25
Reaktif CaO	< % 10	≥ % 10
Kızdırma kaybı	≤ % 9	≤ % 9

Kızdırma kaybı, ASTM standardında C ve F sınıfı küllerde maksimum % 6 kabul edilirken bunlara karşılık TS EN 197-1 (2012) standardındaki V ve W sınıfı küller için kızdırma kaybının en fazla % 9 olması gerekmektedir. ASTM C618 (2019) standardında sınıflandırmada uçucu külün nem içeriği ve SO<sub>3</sub> oranı önemli iken TS EN 197-1 (2012) standardında ilgili değerlere yer verilmemiştir.

## 2.4 UÇUCU KÜL KULLANIMI TARİHÇESİ

Uçucu külün puzolanik etki oluşturması amacı ile kullanılması 1914 yılına dayanmaktadır. Kayda değer ilk kullanım ise 1937 yılında olmuştur (Halstead 1986). Amerika Birleşik Devletleri'nde 1931 yılında başlayıp 1935 yılında açılan Hoover ve 1948 yılında inşaatına başlanıp 1953 yılında bitirilen Hungry Horse barajlarında uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül şehir içi ve eyaletler arası yollarda 1950'li yılların başlarından itibaren kullanılmaya başlanmıştır. 1974 yılında Federal Karayolu İdaresi eyaletleri beton kaplamalarda çimento ile kullanılmak üzere fizibilitesi uygun olduğu miktarda uçucu kül kullanılmasını teşvik etmiştir. Ayrıca 1983 yılının Ocak ayında Çevre Koruma Kurumu (EPA), uçucu kül kullanımını özendirmek amacıyla uçucu kül içeren çimento ve betonun anlatıldığı kapsamlı bir kılavuz yayınlamıştır (FHWA 2003). 1987 yılında açılan Sunshine Skyway Köprüsü'ndeki tabliye ve köprü ayaklarında uçucu kül kullanılmıştır. Kaplamanın sızdırmazlığı için uçucu kül enjeksiyonu uygulanmıştır (FHWA 2003).

Ülkemizde uçucu küllerin kullanımı ile ilgili olarak Devlet Su İşleri ve Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilen bazı çalışmalar mevcuttur. DSİ tarafından bazı barajlarda uçucu kül kullanımının denemesi için Eskişehir ilinde bulunan Gökçekaya ve Porsuk barajları seçilmiştir. Bu barajlarda kullanılan uçucu kül katkısı baraj için olumlu olmuştur (Türker vd. 2009). Uçucu külün çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılabileceğine ilişkin çalışmalar çoğaldıktan sonra Türk Standartları Enstitüsü tarafından

1975 yılında "uçucu küller-çimentoda kullanılan" isimli bir standart (TS 639 1975) yayınlanmıştır. Daha sonra iptal edilen bu standart yerine 2008 yılında uygulamaya konan "uçucu kül-betonda kullanılan - bölüm 1: tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri" isimli yeni bir standart (TS EN 450-1 2013) aktif olarak kullanılmaktadır. Yol yapımındaki örneklerinden bazıları İzmir'in Turgutlu ilçesi, Kütahya'nın Çamlık ilçesi, Soma-Bergama ve Bursa'nın Mudanya ilçesindeki taş ocağından alınan malzemelerin uçucu kül ile stabilizasyonundan sonra yol yapımında kullanımı olmuştur. Bu konudaki örnek çalışma, Atanur (1971) tarafından "Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Vasıfları ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması" ismi ile gerçekleştirilmiş olup stabilize edilmiş olan malzeme yol inşaatında kullanılmıştır (Alkaya 2002). 1979 yılında ise Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından başlatılan çalışmada Devlet Su İşleri, Çitosan, TCK ve diğer katılımcılardan oluşan geniş bir çalışma grubu oluşturulmuştur. Bu çalışma grubu, Türkiye'deki uçucu küllerin üretimi ve kullanım alanlarını belirten "Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanım Özellikleri" isimli bir rapor hazırlamıştır (EİE 1979).

## 2.5 UÇUCU KÜLÜN MİNERALojİK VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Uçucu külün üç ana elementi mevcut olup bunlar silisyum, alüminyum ve demirdir. Bu elementler, uçucu külün oksitlerinin % 75-85'ini oluşturur. Uçucu kül mineralojik olarak camsı küresel şekle sahip olup bir miktar kristal madde ve yanmamış karbon içerir. Kömürdeki mineraller uçucu külün mineralojik yapısını belirlemektedir. Camsı fazda en çok silisyum ve alüminyum bulunurken bir miktar kuvars ve mulliti ( $3Al_2O_3, 2SiO_2$ ) de içerir. Demirin bir kısmı magnetit oksit ( $Fe_3O_4$ ) ve hematit oksit ( $Fe_2O_3$ ) olarak bulunurken geri kalanı ise camsı fazdan oluşur (Sear 2001). Uçucu külün kimyasal bileşenleri incelendiğinde, büyük bileşenlerinin  $SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3$  ve  $CaO$  olduğu görülür. Uçucu külün tipine ve diğer koşullara göre değişmekle birlikte, uçucu külden bulunan temel oksitlerin miktarı yaklaşık olarak Çizelge 2.3'de sunulmuştur.

**Çizelge 2.3** Uçucu kül temel bileşenlerinin yaklaşık miktarları (Türker vd. 2009).

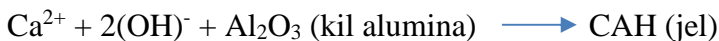
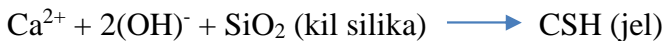
Bileşenler	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$
Miktar (%)	25-60	10-30	1-15	1-40

Genellikle, düşük CaO içeren uçucu küller başta camsı faz ve minör olarak da kuvars (SiO<sub>2</sub>), mullit (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>), manyetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) içermekte; yüksek CaO içeren uçucu küller kuvars, hematit, anhidrit (CaSO<sub>4</sub>), serbest kireç, C3A (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), CS (CaO. SiO<sub>2</sub>), C<sub>2</sub>S (2CaO.SiO<sub>2</sub>), gehlenit (Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>), mellilit (Ca<sub>2</sub>(Mg, Al)(AlSi)<sub>2</sub>O<sub>7</sub>), merwinit (Ca<sub>3</sub>(Mg)(SiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>) gibi mineraller ve camsı faz içermektedir. Bu bileşenlerin yanısıra yüksek kireçli uçucu küllerde kalsit, portlandit (Ca(OH)<sub>2</sub>), trisülfoalüminat (4CaO.3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.32H<sub>2</sub>O) ve mullit minerali de bulunabilir. Düşük ve yüksek kireç içeren uçucu küllerde ayrıca alkali feldispatlara rastlanmaktadır. Düşük ve yüksek kireçli uçucu küllerin X ışınları difraktometre (XRD) analizlerinde pik değer yaptığı açılar da birbirinden farklıdır. Kireç oranı düşük küllerin camsı fazda XRD analizi sonucu pik yaptığı aralık 22-27 (2θ) bölgesinde iken, yüksek kireç içeren küllerde bu aralık 30-34 bölgesine kaymaktadır (Türker vd. 2009).

## 2.6 UÇUCU KÜL STABİLİZASYONU

Uçucu kül stabilizasyonu, kimyasal stabilizasyon yöntemlerinden biridir. Zemin ve uçucu kül karıştırıldığında birçok reaksiyon meydana gelir. Uçucu külden kireç, silika ve alümina ile reaksiyona girerek, çimentolaşma bileşenleri olan kalsiyum silikat jeli ve kalsiyum alüminat jelleri oluşturur (Turner 1997). Bu bileşenler katı mineralleri birbirine bağlar ve bu da stabilize edilmiş karışımların uzun dönem dayanımlarının artmasını sağlar (Dermatas ve Meng 2003). Dayanım ve durabilite, puzolanik reaksiyon sonucu oluşan çimentolaşma miktarına bağlıdır (Terrei vd. 1979, Bergado vd. 1996).

Zeminle stabilize edilmiş uçucu külden puzolanik reaksiyon, Portland çimentosunun hidratasyon davranışı ile benzerlik göstermektedir, fakat reaksiyon daha yavaş olup hidratasyon için daha çok süreye ihtiyaç duyulmaktadır (Arman ve Munfakh 1970). Puzolanik reaksiyonlar aşağıda gösterilmektedir.



F sınıfı uçucu kül kullanıldığında, yukarıda basitleştirilmiş sunumu verilen reaksiyon sürecinin tamamlanması için kireç mineralinin temin edilmesi amacıyla kireç ilavesi yapılmalıdır. Kireç ile uçucu küldeki alümina ve silika bileşenlerinin girdiği reaksiyonlara ek olarak, kireç stabilize edilmiş zemindeki ince daneler ile de reaksiyona girebilir. Bu reaksiyonlar; katyon değişimi, flokulasyon-aglomerasyon ve zemin-kireç puzolanik reaksiyonlarıdır (Terrei vd. 1979). Katyon değişimi reaksiyonunda, uçucu küldeki ya da kireçteki iki değerlikli kalsiyum iyonları ( $Ca^{2+}$ ), kil partikülündeki tek değerlikli sodyum ( $Na^+$ ), potasyum ( $K^+$ ) ve hidrojen ( $H^+$ ) iyonları ile yer değiştirir ve bu sayede kil partikülleri arasında daha güçlü bir etkileşim oluşur. Zemin partiküllerinde yığın (küme) oluşur ve flokulasyon-aglomerasyon reaksiyonları ile daha büyük agregalar meydana gelirler. Zemin ve uçucu kül karıştırıldığında katyon değişimi ve flokulasyon-aglomerasyon reaksiyonları hızlıca gerçekleşir ve bu durum zeminin plastisitesinde azalmaya ve ilk dayanımındaki artışa katkı sağlar. Plastisitedeki azalma da işlenebilirliği iyileştirmektedir (Terrei vd. 1979, Bergado vd. 1996).

C sınıfı uçucu külün eklenmesi; zeminin işlenebilirliğini artırır, segregasyonu azaltır, permeabiliteyi ve sıkışabilirliği azaltır, rijitliği ve dayanımı ise artırır (Ferguson 1993; Ferguson ve Levorson 1999; White vd. 2005; Yeboah ve Burns 2011; Kang vd. 2015). Amerika Kömür Külü Topluluğu (ACAA 2013) tarafından yayınlanan rapora göre uçucu külün geoteknik uygulamalarındaki geri kullanım miktarı görece düşüktür. Örneğin, uçucu külün dolgu, yol temeli/alttemel ve zemin modifikasyonu/stabilizasyonu malzemesi olarak kullanımı toplam uçucu kül miktarının sırasıyla % 1.2, % 0.6 ve % 12.8'idir. Bu oranlar da betondaki kullanımın (% 50) oldukça altındadır.

## **2.7 UÇUCU KÜL KULLANIM ALANLARI**

Uçucu kül, Portland çimentolu beton uygulamalarında puzolan olarak kullanılmaktadır. Puzolanlar silisyumlu ve alüminyumlu malzemeler olup ortamda su bulunduğunda uygun sıcaklıklarda kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girdiklerinde çimentolaşmış bileşenler oluşturmaktadır. Uçucu külün küresel şekli ve dane çapı dağılımı, bu malzemeye hem sıcak karışım asfalt uygulamalarında iyi bir minerale sahip filler malzemesi işlevi kazandırmakta hem de akışkan dolgu ve enjeksiyonların akışkanlığını artırmaktadır. Uçucu külün kıvamı ve çoğu bölgede bolca bulunması, bu malzemenin yapısal dolgu ve diğer karayolu uygulamalarında kullanımı için önemli fırsatlar sunmaktadır (Hicks 2002).

Uçucu kül, yol alttemel zemin tabakasında kireç ile birlikte kullanılabilir. Stabilize edilmiş temel tabakalarında kullanılmak üzere tipik uçucu kül yüzdesi 12 ile 14 arasında, kireç yüzdesi ise 3 ile 5 arasında değişmektedir. Kısa dönem (erken) dayanımı arttırmak için kireç yerine Portland çimentosu da kullanılabilir. Uygun oranda kireç ve uçucu kül ile karıştırılmış karışımlar puzolanik-stabilize karışımlar ismini almaktadır. Bu karışımların önemli avantajları mevcuttur. Bu avantajlar sırasıyla; malzemelerin lokal olarak elde edilebilir olması, düşük maliyet, enerji verimliliğinin artması, geri dönüşüm malzemesi olarak kullanımının uygun olması, dayanımı ve durabilitesinin yüksek olmasıdır (Hicks 2002).

Bu özelliklerinin yanında uçucu kül ile gerçekleştirilen stabilizasyonda da dikkat edilmesi gereken hususlar mevcuttur. Örneğin, uçucu küldeki sülfür içeriği zemin-uçucu kül karışımlarında şişebilen minerallerin oluşmasına sebep olduğu için uzun dönem dayanım ve durabilite değerlerinde azalma yol açabilmektedir (White vd. 2005). Tez çalışmasında kullanılan uçucu külün sülfür içeriğinin ise oldukça düşük (% 0.10) olduğu görülmektedir.

## **2.8 KİREÇİN TANIMI VE GENEL ÖZELLİKLERİ**

Kireç, kalsiyum karbonatın fırında karbondioksitten arınana kadar ısıtılması ile hazırlanır. Fırındaki ısıdan kaynaklı olarak ortamdan uzaklaşan karbondioksit sonrasında kalan malzeme sönmemiş kireç olarak bilinir. Ayrıca topaklı olup yüksek hidrasyon ısısına ( $\Delta H = - 15.6$  kcal/mol) sahiptir. Bu durum, özellikle nemli iklimlerde bu malzemenin, korunması ve depolanması hususunda soruna yol açmaktadır. Sönmemiş kirecin, sönmüş kireç haline (kalsiyum hidroksit) döndürülmeye çalışılması yaygın bir çözümdür. Hidrasyon süreci, yoğunlukta büyük bir azalmaya ( $3.3 \text{ g/cm}^3$ 'den  $2.3 \text{ g/cm}^3$ 'ye) sebep olur. Sönmüş kireçte depolama problemi vardır, çünkü neme karşı hassastır (Ingles ve Metcalf, 1972). Sönmüş kireçle yapılan stabilizasyon ile çimento stabilizasyonu gerek deneysel gerekse inşaat teknikleri açısından benzerlik göstermektedir, fakat iki önemli hususta birbirinden farklılık gösterirler. Sönmüş kireç, yüksek plastisiteli killi zeminlerin stabilizasyonunda uygulanabilmekte iken granüler zeminler için ise çimento stabilizasyonu daha uygundur. İkinci önemli farklılık ise sönmüş kirecin inşaat işlerinde tedbir amaçlı kullanılabilmesidir. Yani, inşaat trafiğini desteklemek için yeterli stabilizasyonu sağlamak ve zemini daha sonraki stabilizasyonlara hazır hale getirmektedir. Sönmüş kireç veya kireç bulamacı, sırasıyla aşırı ıslak veya kuru zemin koşullarında kullanılabilir. Bu açıdan çok yönlü bir stabilizördür. Sönmüş kireç üretimi için saf

kireçtaşı gerekmez. Yaygın safsızlık ise dolomitik kirecin oluştuğu dolomitik kayalardaki magnezyum karbonatlarda mevcuttur. (Ingles ve Metcalf 1972).

## 2.9 KİREÇ KULLANIM TARİHÇESİ

Stabilize edilmiş toprak yolların tarihçesi eski zamanlara kadar uzanmaktadır. Antik Mezopotamya ve Mısır'da bazı stabilizasyon teknikleri kullanılmıştır. Yunan ve Roma İmparatorluğu, kireç ile stabilizasyon yönteminden faydalanmıştır (Kezdi 1979).

Zemin sıkılaştırma, drenaj ve katkı kullanımı gibi zemin stabilizasyonunun temel prensipleri binlerce yıldan beri mevcuttur. Kerpiç yapılar için kereste ve saman ile çamurun karıştırılması uygulamasının antik Mezopotamya ve Mısır dönemlerinde uygulandığı bilinmektedir. Çin uygarlıklarındaki yazılarda (M.Ö 3000-2000) ahşap ve taşın kullanımı tasvir edilmiştir (ASCE, 1978). Roma'da yaklaşık 600 yılında inşa edilen meşhur Appian yolu inşaatındaki zemin kireç ile karıştırılmıştır. Bu yol inşaatı üzerinden geçen 1400 yıla rağmen hala işlevselliğini devam ettirmektedir.

Malzeme ilave edilerek yapılan zemin stabilizasyonunun ilk uygulamalarından birisi de 1900'lü yıllarda Mısır'da inşa edilen çakıllı kaya dolgu barajda ince daneli zeminin kaba çakıla doğru akıp permeabiliteyi düşürdüğü yerde yapılan sızma kontrolü olarak rapor edilmiştir (Nicholson 2015).

Engineering Corps tarafından 1994 yılında yayınlanan "Yol dolgularında zemin stabilizasyonu" isimli kılavuzda kireç, kireç-uçucu kül ve kireç-uçucu kül-çimento karışımlarının yol stabilizasyonunda kullanımı ve stabilizasyon sonrasında sağlanması gereken mühendislik özellikleri belirtilmiştir. Ülkemizde 2005 yılında Kireç Stabilizasyonu Teknik Şartnamesi mevcut iken, 2013 yılında yapılan değerlendirme sonucu Karayolları Teknik Şartnamesi içinde bir bölüm olarak verilmiştir. Konu hakkında yapılan çalışmalar detaylandırıldıkça kireç stabilizasyonunun yol dolgularında kullanımına yönelik uygulamalar gerçekleştirilmiştir. 2018 yılında İzmir'de yaklaşık 16.5 milyon TL tutarında proje bedeli olan 750000 m<sup>3</sup> kireç stabilizasyonu ile zemin güçlendirilmesi yapılmıştır. Türkiye'de yapımı devam eden 1915 Çanakkale köprüsü ve otoyolu projesi kapsamında 176 + 000 ve 181 + 000 km'ler arasında zemin güçlendirilmesi amacı ile kireç stabilizasyonu yapılmıştır.

## 2.10 KİREÇ STABİLİZASYONU

Kireç stabilizasyonu kalsiyum hidroksit "Ca(OH)<sub>2</sub>" veya kalsiyum oksit "CaO" ile yapılabilir. Stabilizasyon, zemindeki kil mineralleri ile kireç bazlı kimyasal reaksiyondan etkilenir ve çimentolu bileşen (kalsiyum silikat) oluşur ama kalsiyum karbonat "CaCO<sub>3</sub>" bunu gerçekleştirmez. Kireç ile stabilize edilmiş kilin dayanımını artıran ana etkenler 3 reaksiyon sürecinde özetlenebilir. Bunlar sırasıyla zeminin dehidrasyonu, iyon değişimi ve puzolanik reaksiyon olarak bilinmektedir. Karbonlaşma ise dayanımda ihmal edilebilecek küçük bir artışa yol açmaktadır. Kısa dönem reaksiyonları hidratasyon (sönmemiş kireç için) ve flokülasyondur (iyon değişimi). Uzun dönem reaksiyonları ise çimentolaşma ve karbonlaşmadır. Kohezyonlu zeminler için doğal stabilizör birimleri kalsiyum hidroksit, sönmüş kireç ve sönmemiş kireçtir. Kalsiyum hidroksit kendi başına stabilizör değildir ama kohezyonlu zeminlerin kil minerallerindeki silikalar ile girdiği kimyasal reaksiyon ile çoğunluğu kalsiyum silika hidratları olan bir bağlayıcı oluşturur (Assarson vd. 1974).

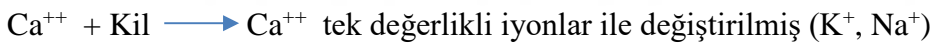
Sönmemiş kireç, kil ile karıştırıldığından yüksek ısı ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi ise sönmemiş kirecin kilin boşluklarında bulunan su ile hidrate olmasıdır. Sönmemiş kireç ve kohezyonlu zemin karıştırıldığında hidratasyon sürecinde suyun harcanmasından dolayı doğal su içeriğinde ani düşüş olur. Assarson vd. (1974), kirecin söndürülmesinde yaklaşık 0.3 kg/kg CaO harcandığını belirtmiştir. Ayrıca yoğun ısı ortaya çıktığı için yüksek miktarda boşluk suyu basınçları gelişir. Sönmemiş kirecin hidratasyonu devam ederken sıcaklık artmakta ve boşluk suyunun miktarı azalmaktadır. Yaş kilin stabilizasyonu için kuruma etkisi oldukça faydalıdır. Kohezyonlu zeminin doğal su içeriği yüksek miktarda değilse, kalsiyum hidroksit yerine sönmemiş kireç kullanılabilir. Sönmemiş kirecin tamamen söndürülmesi için kilin su içeriğinin yeterli olması durumu önemlidir. Sönmüş kirecin kalsiyum iyonları ve kil minerallerinin alkali iyonları arasında iyon değişimi olması için sönmemiş kirecin söndürülme sürecinde ortaya çıkan ısıdan dolayı buharlaşmadan sonra yeterli miktarda suyun kalmış olması gerekir (Bergado vd. 1996).



Sönmemiş kirecin hidratasyonu veya kalsiyum hidroksitin stabilizör olarak kullanımı sonucunda oluşan CaOH<sub>2</sub> suda ayrışır, elektrolitik konsantrasyonunu ve boşluk suyunun pH değerini artırır ve kil partikülünden SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşenlerini eritir.



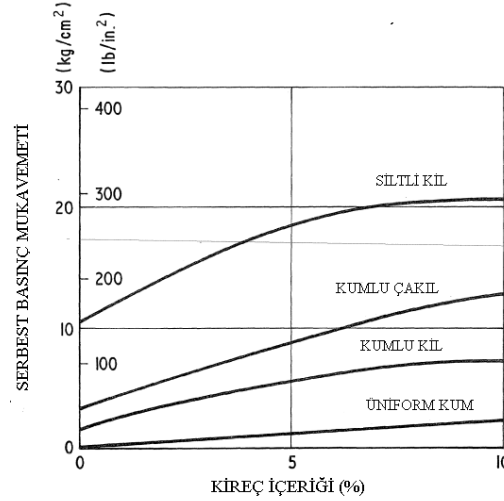
Bu sürecin sonunda iyon değişimi, flokülasyon ve puzolanik reaksiyonlar oluşur. Kil ve kireç karıştırıldığında, kilin mineral yüzeyindeki adsorbe olmuş sodyum ve diğer katyonlar ile kalsiyum değişimi gerçekleşir. Bu katyon değişimi, kil mineralinin yapısal bileşenlerini etkiler. Karıştırılma sonrası birkaç dakikadan birkaç saate kadar zeminde mevcut olan karbonik asite ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) bağlı olarak kalsiyum hidroksite dönüşür. Zemindeki karbonik asit varlığı ise havadaki  $\text{CO}_2$  ve serbest suyun reaksiyonuna bağlıdır. Reaksiyon sonucunda kireç  $\text{Ca}^{++}$  (veya  $\text{Mg}^{++}$ ) ve  $(\text{OH})^-$  elementlerine çözünür ve bu durum kil mineralinin elektrik yüzey kuvvetlerinde değişime yol açar. Zemin yapısında dönüşüm başlar. Zemin partiküllerinin flokülasyon ve koagülasyonu zemini daha büyük çaplı agrega ve danelere dönüştürür ve bunun sonucunda da plastik limitte artış olur. Kireç, kilin koagülasyonuna, agregalaşmasına veya floküle olmasına yol açar. Kilin plastisitesinin azalması, işlenebilirliğini artırmanın yanı sıra dayanım ve rijitliğini de artırır. İki değerlikli kalsiyum iyonlarının boşluk suyunda çözülmesi ve negatif yüklü kil partikülünde tek değerlikli alkali iyonlar ile yer değiştirmesi sonucunda oluşan katyon değişimi zemin yapısında farklılığa yol açar. Bu durum kil partiküllerinin flokülasyonudur (Bergado vd. 1996).



Kirecin, yüksek organik zeminlerde ve hemen hemen hiç kil içermeyen zeminlerde etkisi çok azdır. Killi çakıllarda, çimentoya göre çok daha etkili sonuç vermekte olup yüksek plastisiteli killi zeminlerin stabilizasyonunda iyi sonuç verebilmektedir. Böyle zeminlerde, kireç gevrek (öğütülmesi kolay) bir yapı oluşturacaktır. Bu da kompaksiyonun daha kolay yapılmasını sağlar. Bu yüzden, çimento ve kirecin ilave edileceği durumlarda kireç sadece ön iyileştirme malzemesi olarak kullanılabilir. Zemin tipine göre kireç kullanımı ile kısıtlamalar mevcuttur. Her bir durum için katkı malzemesinin etkisi incelenerek çimento ile de karşılaştırması yapılmalıdır. Kirecin montmorillonitli kille reaksiyonu, kaolinitik kille reaksiyonuna göre daha hızlı olmasına rağmen fark birkaç hafta düzeyindedir. Montmorillonitik killerde plastisite azalır, ancak bu durum kaolinitik killerde oluşmaz.

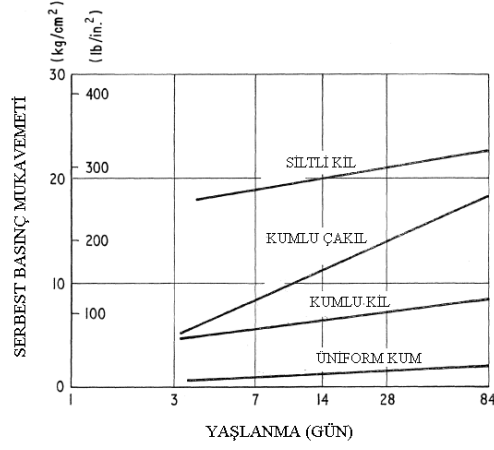
şekil 2.1 incelendiğinde, kireç içeriği yaklaşık % 8'e kadar zemin-kireç karışımının serbest basınç dayanımında artış gözlemlenmektedir (Ingles ve Metcalf, 1972). Daha sonra kireç içeriğindeki artış, dayanımı fazla arttırmamaktadır. Özellikle siltli kil ve kumlu kil grubunda bu

durum açıkça görünmektedir. Siltli kilde kireç oranı % 5 olduğunda serbest basınç dayanımı grafiğinin başlangıç kısmında görünen artan trend yavaşlama ve sabitlenme eğilimine girmeye başlamıştır. Kumlu çakıl ve üniform kumda ise artış bir miktar daha devam etse de ivmesi azalmaktadır.



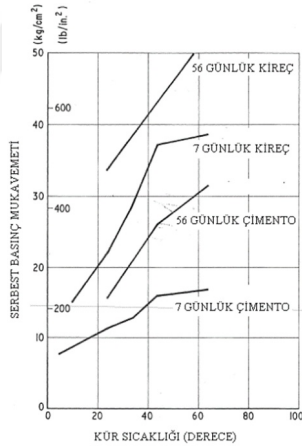
Şekil 2.1 Kirecin zeminlerin serbest basınç dayanımına etkisi (Ingles ve Metcalf 1972).

Şekil 2.2'de % 5 oranında sönmüş kireç ile stabilize edilmiş farklı zeminler (siltli kil, kumlu çakıl, kumlu kil ve üniform kum) için serbest basınç dayanımı artışında yaş (kür) etkisi görülmektedir. Artış hızının kumlu çakılda daha fazla olduğu göze çarpmaktadır. İlgili zemin grubunda 7 ve 28 gün kür süresindeki dayanımlar karşılaştırıldığında 28 gün kürlü durumdaki serbest basınç dayanımı değeri 7 gündekinin yaklaşık 2 katı olarak görülmektedir. Siltli kil ve kumlu kilde ise 28 gün ve 7 gün kür süresinde dayanım değerleri birbirine yakındır. Bu sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile uyum göstermektedir (Bell 1996; Kate 2005; Zha vd. 2008, Modarres ve Nosoudy 2015, Yılmaz 2015, Dayıoğlu vd. 2017).



**Şekil 2.2** % 5 kireç katkılı çeşitli zeminlerde yaşlanmanın serbest basınç dayanımına etkisi (Ingles ve Metcalf 1972).

Ayrıca kür sıcaklığının da serbest basınç dayanımına etkisi bulunmaktadır. Şekil 2.3'de Metcalf (1963) tarafından yapılan çalışmada 7 günlük ve 56 günlük kireç ve çimento içeren yüksek plastisiteli killer çeşitli kür sıcaklıklarında deneye tabi tutulmuştur.



**Şekil 2.3** Kür sıcaklığının yüksek plastisiteli killerin serbest basınç dayanımına etkisi (Ingles ve Metcalf 1972).

Şekil 2.3 incelendiğinde kür sıcaklığı arttıkça hem kireç hem de çimento katkılı numunelerde dayanımının arttığı gözlemlenmektedir. Kireçli karışımda 20 derecede kürlenmiş numunelerin serbest basınç dayanımı 7 gün kür süresinde 20 kg/cm<sup>2</sup> iken, 40 derecede kürlenmiş olanlarda bu değer 1.75 katına çıkmıştır. Sıcaklığın 45 derecenin üzerine çıkması ile dayanım artış hızında belirgin bir yavaşlama gözlenmiştir. Kireçli ve çimentolu karışımda kür süresinin 56 gün olduğu durumda ise artan sıcaklık ile daha farklı bir davranış ortaya çıkmıştır. Kireç karışımında 25 derece sıcaklıkta kürlenmiş numuneler 35 kg/cm<sup>2</sup> dayanıma sahipken sıcaklık arttıkça

dayanım artış hızı aynı kalmış ve dayanım 60 derecede kürlenmiş numunelerde yaklaşık % 50 artarak 50 kg/cm<sup>2</sup> değerine yükselmiştir.

Kireç ile gerçekleştirilen stabilizasyonda genellikle tavsiye edilen kireç içeriği zemin tipine göre farklılık göstermektedir. Kireç katkısının, düşük plastisiteli killerde zeminin kuru ağırlığına göre % 3 ile % 8 aralığında, yüksek plastisiteli killerde ise % 3 ile % 10 aralığında yaklaşık olarak optimum sonuç verdiği bilinmektedir (TM 5-822-14 1994).

## 2.11 ÜLKEMİZDE KİREÇ STABİLİZASYONU

Ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından 2013 yılında hazırlanmış olan Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ), karayollarında yapılacak olan bütün mühendislik yapılarına ait uygunluk, yapım, kontrol aşamalarını içeren bir standarttır. Kullanılması gereken malzemelerin seçiminde, zeminlerin likit limiti, plastisite indeksi, maksimum kuru yoğunluğu, yaş CBR (Kaliforniya taşıma oranı) değeri, Şişme yüzdesi, serbest basınç dayanımı gibi mühendislik parametrelerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu değerlerin sınır Şartları zemin ve karışımın kullanılacağı yol tabakasına göre (alttemel, üstyapı tabanı, dolgu, vb.) değişim göstermektedir. Kullanılan zeminin dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi için KTŞ'ye göre 4 Şart mevcuttur. Bu Şartlar aşağıda sıralanmıştır.

- $LL \leq \% 60$
- $PI \leq \% 35$
- $\rho_{kmax} \geq 1.45 \text{ ton/m}^3$
- Yaş Şişme yüzdesi  $\leq \% 3$

Karayolları Teknik Şartnamesi içinde kireç ile stabilizasyon konusu da detaylıca değerlendirilmiştir. Buna göre KGM (2013), kireç ile stabilize edilecek zeminlere ait gerek karışımda kullanılan malzemelerin sahip olması gereken Şartları gerekse de stabilizasyondan beklenen hedefi açık bir Şekilde belirtmiştir. Buna göre karışımda esas olan kireç, su ve zeminin sahip olması gereken özellikler aşağıda özetlenmiştir.

- Suyun SO<sub>3</sub> miktarı < 200 ppm
- Zeminin organik madde miktarı < % 4
- Zemindeki sülfat miktarı < % 3

- Sönmüş ve sönmemiş kireçte  $SO_3 \leq \% 2$
- Sönmüş ve sönmemiş kireçte kızdırma kaybı ( $CO_2$ )  $\leq \% 7$
- Sönmüş ve sönmemiş kireçte  $CaO + MgO \geq \% 80$
- Sönmüş ve sönmemiş kireçte  $MgO \leq \% 5$
- Sönmemiş kireçte parçalar  $\leq 2$  mm
- Sönmüş kireçte 0.09 mm elekten kalan  $\leq \% 7$ , 0.2 mm elekten kalan  $\leq \% 2$

Karışımda bu şartları sağlayan malzemeler kullanılarak yapılan CBR, şişme, likit limit, plastik limit, serbest basınç (UCS) ve donma-çözünme sonrası serbest basınç deneyleri sonucunda yolun her tabakasında beklenen dayanım değerleri farklılık göstermektedir. Yapılan kireç stabilizasyonundan sonra ise karışımların sahip olması gereken mühendislik parametreleri Çizelge 2.4'de verilmiştir.

**Çizelge 2.4** Kireç ile stabilizasyon sonucu elde edilmesi gereken dayanımlar (KGM 2013).

Mühendislik Parametresi	Dolgu	Üstyapı Tabanı	Alt temel
CBR (%)	$\geq 15$	$\geq 20$	$\geq 50$
Şişme (%)	$< 2$	$< 1$	$< 0.5$
Plastisite İndeksi (%)	$< 20$	$< 10$	$< 6$
UCS (7 gün kür) (kPa)	.....	$> 490.5$	.....
UCS (7gün kür)* (kPa)	.....	$> 147.15$	.....
* Sadece dona hassas bölgelerde -20 derecede donma ve +20 derecede çözünme sürecinin en az 5 kez ve 12'şer saat tekrar edilmesi sonrasında yapılan serbest basınç deneyi			

Buna göre CBR değeri dolgularda, üstyapı tabanında ve alt temelde sırasıyla en az % 15, % 20 ve % 50 olmalıdır. Şişme ise dolgularda % 2'den, üstyapı taban zemininde % 1'den ve alttemelde % 0.5'den az olmalıdır. Serbest basınç dayanımı değeri ise sadece üstyapı tabanında değerlendirme kriterindedir. Buna göre 7 gün küre tabii tutulmuş kireç katkılı bir karışımın serbest basınç dayanımı  $5 \text{ kg/cm}^2$  (490.5 kPa) değerinden büyük olmalıdır. Dona hassas bölgelerde ise serbest basınç deneyine ilaveten donma-çözünme durumunun da irdelenmesi gerekmektedir. KTŞ'ye göre ilgili karışım 7 gün kürelendikten sonra  $-20^\circ\text{C}$ 'de donma ve sonrasında  $+20^\circ\text{C}$ 'de çözülme sürecine tabii tutulur. Donma-çözülme süreci en az 5 kez tekrarlanmalı ve bu sürecin her iki aşaması da minimum 12'şer saat olmalıdır. Bu koşullar

altında gerçekleştirilen serbest basınç deneyinden sonra elde edilen dayanımın en az  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  ( $147.15 \text{ kPa}$ ) olması gerekmektedir.

## 2.12 LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Goecker vd. (1956), kireç ve uçucu kül katkısının buzul tillerinin, buzul-akarsu birikintilerinin, alüvyonel çakılların, nehir çökellerinin, gevrek lös ve Beaumont killerinin serbest basınç dayanımı büzülme ve kıvam özelliklerini iyileştirdiğini göstermişlerdir.

Viskochil vd. (1957), kireç ve uçucu kül ile stabilize edilmiş kum, silt ve killerin mühendislik özelliklerini inceleyerek, kireç ve uçucu kül katkı oranının çok hassas olmadığını, ancak kireç- uçucu kül oranının  $1/9$  ve  $2/8$  olduğu durumlarda daha yüksek dayanım değerlerinin elde edildiğini bulmuşlardır.

Uppal ve Dhawan (1968), çeşitli Hindistan zeminleri (CL, ML, SC ve CH) ile yaptıkları araştırmada kireç ve uçucu kül katkısının, ilgili zeminlerin stabilizasyonunda faydalı olduğunu belirtmişlerdir.

Bell (1996) farklı killi zeminlere, çeşitli oranlarda (% 2, % 4, % 6 ve % 8) kireç karıştırarak karışımlara ait kıvam limitleri, CBR ve serbest basınç dayanımı değişimlerini incelemiştir. Yapılan deneylere göre düşük plastisiteli killi zemine eklenen kireç likit limiti artırırken, yüksek plastisiteli zemine eklenen kireç likit limiti azaltmıştır. Plastisite indeksi ise düşük plastisiteli killi zeminde önemli bir değişme göstermemiştir (% 2 ve % 4 katkıda 16'dan 17'ye çıkarken, % 6 katkıda 20 ve % 8 katkıda 19 değeri elde edilmiş). Yüksek plastisiteli killi zeminde ise % 2 katkıda dahi 32'den 19'a düşmüş, sonrasında eklenen katkı sonucu çok değiştirmemiş, en düşük plastisite indeksi % 6 katkıda 17 olarak gerçekleşmiştir. 7 gün kür süresindeki serbest basınç deneyi sonuçları incelendiğinde eklenen % 6 kireç serbest basınç dayanımı düşük plastisiteli katkısız zeminin dayanımını 2.97 katına çıkartmıştır. Yüksek plastisiteli killi zemine eklenen % 4 kireç ise serbest basınç dayanımını katkısız zeminin 4.99 katına çıkarmıştır. % 6 oranında eklenen kireç CBR değerini kaolinitte 1'den 14'e, kuvarsta 1'den 22'ye çıkarmıştır. Montmorillonite eklenen % 4 kireç ise CBR değerini 9'dan 18'e yükseltmiştir.

Indraratna (1996) tarafından yapılan çalışmada 1 adet CL sınıfı zemin ve 1 adet F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül katkı oranları % 5, 9, 12 ve 15; kireç ve cüruf oranları % 2, 5, 7

ve 10 olarak seçilmiştir. Uçucu kül oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlıkta % 6.75 oranında azalma olmuştur. Optimum su içeriğinde ise sadece % 1 kadar önemli olmayan bir artış olmuştur. 28 gün kürlü numunelerde serbest basınç dayanımları karşılaştırıldığında % 0 katkıda değer 2200 kPa olup % 5 katkıda artış % 11.36 olmuştur. Ancak daha fazla uçucu kül katkısı dayanımı 750 kPa değerine düşürerek (% 15 uçucu kül katkısında) % 65.91 oranında bir azalima yol açmıştır.

Tan ve İyisan (1996), CL sınıfı kilin Seyitömer termik santralinden alınmış C sınıfı uçucu kül ile stabilize edilmesi sonucu dayanım özelliklerindeki değişimi incelemiştir. 1 günlük kür sonrası 3 eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Kohezyon 160 kPa değerinden 140 kPa'a düşerken numunenin içsel sürtünme açısı 9 dereceden 22 dereceye çıkmıştır. Deformasyon modülü önemli bir değişime uğramamış ancak malzemenin yenildiği deformasyon % 13'ten % 10'a düşmüştür.

Sridharan vd. (1997), bir yüksek plastisiteli zemini F sınıfı uçucu kül ile karıştırarak stabilize etmeye çalışmışlardır. Ayrıca kirecin etkisini görmek için de yüksek plastisiteli kili farklı oranlarda kireç kullanarak stabilize etmişlerdir. Buna göre zemine eklenen % 9 oranında F sınıfı uçucu kül, zeminin serbest basınç dayanımını 7 gün kür süresi sonunda 1.40 katına çıkarmıştır. Katkı oranının % 22 olduğu durumda dayanım zeminin dayanımının 1.68 katı olmuştur. % 35 katkı oranında dayanım artış hızı azalmış, dayanım kontrol zeminin dayanımının 1.80 katına yükselmiştir. Kür süresinin 28 güne çıkması ile % 9 uçucu kül, dayanımı katkısız zeminin 1.68 katına çıkarmıştır. Katkı oranının % 22 olduğu durumda dayanım 2.08 katına ve % 35 katkıda 2.20 katına gelmiştir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, kür süresinin dayanım artış hızına ilk 7 gündeki etkisi, 7 gün ile 28 gün arasındaki dayanım artışına göre daha yüksek olmuştur. Kireçli karışımlarda ise eklenen % 1 kireç, dayanımı 7 gün kür süresinde zeminin 1.12 katına çıkarırken, katkı oranının % 2 olduğu durumda 1.60 katına ve % 3 olduğunda 4 katına yükseltmiştir. Kür süresinin 28 güne çıkması ile % 1 kireç katkılı karışımın dayanımı, zeminin 1.40 katına çıkmıştır. Katkı oranının % 2 olması ile dayanım zeminin 2 katına ve % 3 olduğu durumda 6 katına çıkmıştır. Kür süresi ile ilgili olarak kireç karışımında süre arttıkça özellikle % 3 kireç katkısında dayanım artışı oldukça hızlıdır.

Kamon vd. (2000), yaptıkları çalışmada atık uçucu külü, kömür külü ile stabilize etmişlerdir. Buna göre eklenen % 20 katkı, uçucu külün serbest basınç dayanımını 7 gün kür süresinde 1.25 katına çıkarmıştır. Kür süresinin artması ile dayanım neredeyse hiç değişmeyerek katkısız halin

1.26 katı olmuştur. Ayrıca bu atığa sadece çimento eklendiği zaman, yüksek alkalin seviyesinden dolayı sadece ağır metallerin etkisini sönmümlenirken, hem çimento hem de kömür külü kullanıldığında bu duruma ek olarak dayanım artışının da daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Çokça (2001), yüksek plastisiteli killi zemini C sınıfı (Soma) ve F sınıfı (Tunçbilek) uçucu kül ve ayrıca sönmüş kireç ile stabilize etmiştir. Uçucu kül katkı oranları % 3, 5, 8, 10, 15, 20 ve 25 olarak, sönmüş kireç oranları da % 1, 3, 5 ve 8 olarak seçilmiştir. F sınıfında likit limit 74'ten 46'ya (% 25 katkı % 37.83 azalma), plastisite indeksi 52'den 26'ya (% 25 katkı % 50 azalma) düşmüştür. Şişme potansiyeli ise 0 gün kürlü numunelerde % 25 C sınıfı uçucu kül katkısında % 33'den % 11'e düşerek % 66.67 azalmıştır. Ayrıca uçucu kül katkısının % 20'den % 25'e yükseldiği durumda şişme potansiyelinde önemli bir değişim olmamıştır. % 20 C sınıfı uçucu kül katkısının şişme potansiyelini azaltma etkisi ile % 8 kireç katkısının şişme potansiyelini azaltma etkisi aynı çıkmıştır.

Pandian vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada yüksek plastisiteli kil numunesi (CH) ile F sınıfı uçucu külü çeşitli oranlarda karıştırılmıştır. Katkı oranları % 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 ve 100 olarak seçilmiştir. Bu katkı oranlarında yapılan deneyler neticesinde, % 20 katkıya sahip numunelerde en yüksek CBR dayanımı görülmektedir. CBR değeri % 10 katkılı karışımda zemine göre % 127 artmıştır. % 20 katkı oranında CBR değerindeki artış oranı katkısız duruma göre yaklaşık % 200 olmuştur. Daha sonra eklenen uçucu kül CBR değerini bir miktar düşürse de % 30 katkılı karışımdaki CBR değeri de katkısız zemine göre % 116 daha fazladır.

Sahu (2001) tarafından yapılan çalışmada kum, kalkrit, SM, MI, ML ve CH sınıfı zeminler F sınıfı uçucu kül (CaO % 6.45) ile stabilize edilmeye çalışılmıştır. Uçucu kül katkı oranı olarak % 0, 4, 8, 16 ve 24 tercih edilmiştir. Uçucu kül katkı oranı arttıkça, özellikle yüksek plastisiteli zeminde optimum su içeriği % 20'den % 23.5'e yükselirken, maksimum kuru yoğunlukta ise önemli bir değişim olmamıştır (sırasıyla % 0.39, 1.30, 2.59, -2.33). Uçucu kül malzemesi, % 8 katkı oranına kadar CBR değerinde önemli bir artış oluşturmamışken, % 16 katkı oranından sonra CBR değeri, ilk değerinin yaklaşık 5 katı olmuştur. % 24 katkıda CBR değeri en yüksek değerine ulaşmış, katkısız zeminin 25 katına yükselmiştir.

Nalbantoğlu ve Güçbilmez (2002) tarafından yapılan çalışmada CH sınıfı zemine % 15 ve % 25 oranında F sınıfı (CaO = % 14.80) uçucu kül eklenmiştir. Buna göre eklenen uçucu küller, zeminin şişmesini 0 gün kür süresinde dahi % 19.6'dan sırasıyla % 4.8 ve % 3.7'ye dşrmştir. Kr süresinin 30 güne çıkması ile şişme değerleri neredeyse % 0'a dşmştir. Ayrıca % 15 uçucu kül ve % 3 kireç içeren karışımda ise 0 gün kür süresinde dahi şişme % 0.9'a kadar azalmıştır. XRD analizi ile aynı karışımların mikro yapıları da incelenmiştir. Buna göre kireç etkisi ile çimentolaşma bileşeni olan C-S-H görülmüş ve kuvars pikinde azalma gözlenmiştir.

Petry ve Little (2002) tarafından yapılan çalışmada  farklı yüksek plastisiteli kil malzemesi kireç ile karıştırılarak çeşitli yollarda alt temelde (subgrade) kullanılmıştır. Bu durum için laboratuvar ortamında doğal numuneler üzerinde gerçekleştirilen serbest basınç deneyi sonucunda elde edilen dayanım 10 ile 50 kPa arasında iken aynı killerin kireç ile stabilize edilmiş haldeki dayanım değerleri, zeminin yaklaşık 38 ile 195 katı arasında değişmiştir. Arazide de bu karışımlar uygulanmış ve yapılan imalat üzerinde dinamik konik penetrasyon deneyi ile bulunan CBR değerleri ise kireç katkılı karışımlar için katkısız zeminin 9 ile 40 katı arasında oluşmuş ve ilgili değerler % 133 ile % 500 arasında değişmiştir.

Nalbantoğlu (2004) tarafından yapılan çalışmada CH sınıfı (Değirmenlik) ve CL sınıfı (Tuzla) zeminleri % 15 ve % 25 oranlarında C sınıfı uçucu kül katkısı ile stabilize edilmiştir. Yüksek plastisiteli zeminde likit limit % 25 uçucu kül katkısında 68'den 48'e düşerek % 29.41 oranında azalmıştır. Plastisite indeksi ise 46'dan 16'ya düşerek % 65.2 azalmıştır. Düşük plastisiteli zeminde ise önemli bir değişme gerçekleşmemiş, zeminin likit limiti 48 iken eklenen % 15 uçucu kül, likit limiti % 8.33 artırarak 52'ye yükseltmiştir. % 15 katkıdan sonra neredeyse değişmeyen likit limit % 25 katkı oranında 51 olarak tespit edilmiştir. Plastisite indeksi ise % 15 katkıda fazla değişmez iken, katkı oranının % 25 olduğu durumda 23'den 18'e düşerek % 21.7 oranında azalmıştır. şişme açısından yapılan değerlendirmede CH sınıfı zeminin şişme değeri yaklaşık % 19 iken zemine eklenen % 15 uçucu kül katkısı ile şişme değeri % 0.5'e dşmştir. Katkı oranının % 25'e çıkması ile de şişme neredeyse % 0 değerine gerilemiştir. CL sınıfı zeminde ise CH zemine göre daha farklı bir durum oluşmuştur. CL sınıfı zeminde şişme değeri % 6.5'tir. Zemine eklenen % 15 uçucu kül, şişme değerini yaklaşık % 2 seviyesine dşrmştir. Katkı oranının % 25 olduğu durumda da şişme değerinde önemli bir değişim olmamış ve % 2 civarında kalmıştır.

Kumar ve Sharma (2004), yüksek plastisiteli CH sınıfı zemini F sınıfı uçucu kül ile karıştırmışlardır. Zemine katılan uçucu kül oranı arttıkça optimum su içeriği azalırken (% 20 katkıda % 22.5 azalma) maksimum kuru birim hacim ağırlıkta önemli bir değişim olmamıştır (% 20 katkıda % 4 artış). Uçucu kül katkısı arttıkça serbest şişme indeksi, şişme basıncı ve şişme potansiyelinde azalma gerçekleşmiştir. Şişme potansiyeli % 5, % 10 ve % 15 katkılı karışımlarda zemine göre sırasıyla %14.22, % 33.34 ve % 44.45 oranında azalmıştır. En büyük azalma yüzdesi, % 20 katkıda % 50 olarak gerçekleşmiştir.

Şenol ve Edil (2004), C sınıfı uçucu kül ile CL ve ML sınıfı zeminleri stabilize etmişlerdir. CL sınıfı zemin % 12, 16 ve 20; ML sınıfı zemin ise % 10, 14 ve 18 oranında uçucu kül ile karıştırılmıştır. CL zemin numunesi (katkısız) % 27 su içeriğine ve % 1 CBR değerine sahiptir. Uçucu kül içeriği arttıkça CBR değeri çok önemli artışlar göstermiştir. Buna göre eklenen % 12, % 16 ve % 20 uçucu kül zeminin CBR değerini sırasıyla % 34, % 51 ve % 56'ya yükseltmiştir. ML zeminde ise artış oranları daha düşük olup, aynı oranda eklenen uçucu kül katkıları ilgili zeminin CBR değerini % 3'den % 32, % 36 ve % 38 değerlerine getirmiştir.

Arora ve Aydılek (2005) tarafından yapılan çalışmada siltli kum zemine eklenen % 60 F sınıfı uçucu kül ve % 7 kirecin, donma-çözülme sonrası serbest basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Buna göre ilgili karışımda 2 donma-çözülme çevriminde dayanım yaklaşık 1.4 katına çıkmıştır. Donma çözülme çevriminin 4 olduğu durumda dahi dayanım donma-çözülmesiz durumun 1.1 katıdır. Donma-çözülme çevrimi arttıkça dayanım azalarak, ilk durumun 0.4 katına gerilemiştir. Aynı durum için kireç yerine aynı oranda çimento kullanıldığında donma-çözülme çevrimi arttıkça dayanımda ilk 4 çevrimde önemli bir artış olmuş daha sonra ise yaklaşık olarak sabit devam etmiştir.

Das ve Yudbir (2005) tarafından yapılan çalışmada uçucu kül malzemesine eklenen farklı uçucu küllerin ve uçucu kül-kireç katkısının etkisi değerlendirilmiştir. Buna göre CaO oranı % 2.40 olan bir uçucu küle, CaO oranı % 16.85 olan başka bir uçucu kül % 20 oranında eklenmiştir. Bu durumda yapılan serbest basınç deneyi sonucunda dayanım 3 günlük kür süresinde dahi 6 katına çıkmıştır. Aynı uçucu küle eklenen % 6 kireç ise dayanımı 28 günde ancak 2 katına getirmiştir.

Kolias vd. (2005), CL ve CH sınıf zeminleri değişen oranlarda uçucu küller (% 5, % 10, ve % 20) ile karıştırarak stabilize etmişlerdir. CL zemine eklenen uçucu kül katkısının artan kür süresi

ile serbest basınç dayanımını ciddi bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir. Katkısız zeminin dayanımı neredeyse tüm kür süreleri için 200 kPa civarı iken eklenen % 5 uçucu kül, dayanımı 7 gün kür süresinde 2.5 katına ve 28 gün kür süresinde ise 3.75 katına çıkarmıştır. % 20 katkılı karışımın 28 gün kür süresindeki dayanımı, zeminin yaklaşık 9 katı olmuştur. En yüksek dayanım yine % 20 katkılı karışımında ve kür süresinin 90 güne çıktığı durumda elde edilmiş ve bu durumda dayanım zeminin 15 katına yükselmiştir. Eklenen uçucu kül, ayrıca zeminin dolaylı çekme dayanımını da yükseltmiştir. Katkısız CH zeminin dolaylı çekmesi 0.2 MPa iken, % 5 katkıda neredeyse 2.5 katına çıkmıştır. En yüksek değerine % 20 katkılı karışımında ulaşmış olup, bu katkıdaki dayanım zeminin 9 katı civarındadır.

Misra vd. (2005), kaolinit sınıfı zemine % 0, % 2, % 4 ve % 6 oranında bentonit karıştırarak yüksek plastisiteli zemin numuneleri oluşturmuş ve bu zeminlere C sınıfı uçucu kül (% 5, % 10 ve % 20) ekleyerek stabilize etmişlerdir. Uçucu kül katkısı arttıkça serbest basınç dayanımının arttığı görülmüş, kür süresi ile serbest basınç dayanımı grafikleri incelendiğinde 7 günlük kürden sonra önemli bir değişim gözlenmemiştir. Hatta bazı zemin karışımlarında dayanımda azalma da gözlenmiştir. % 4 bentonit içeren kaolin-bentonit karışımında % 20 uçucu kül ilavesinde serbest basınç dayanımında kür süresinin 1 günden 56 güne gelene kadar dayanım azalışı % 33.3 olarak gerçekleşmiştir. CBR deneyinde 7 ve 14 gün kür süresi olarak seçilmiş olup suda bekleme durumu uygulanmamıştır. CBR deneyi sonucunda 7 günlük kürlü numunede CBR değeri 41 iken 14 günlük kürlü numunede 37 olarak gerçekleşmiştir.

Parsons ve Kneebone (2005) tarafından yapılan çalışmada uçucu kül ile stabilize edilmiş alt temellerin arazide CBR performansları değerlendirilmiştir. Buna göre, uçucu kül ile stabilize edilmiş tabakaların CBR değerleri stabilize edilmemişlerin yaklaşık 2 ile 4 katına çıkarak % 15 ile % 46 değerleri arasına yükselmiştir. Bu değerlerin ortalaması alındığında stabilize edilmemiş tabakanın CBR değeri yaklaşık % 9 iken, uçucu kül ile stabilizasyondan sonra CBR % 24'e çıkmıştır.

Aksoy vd. (2006), yaptıkları çalışmada C tipi uçucu külün yüksek plastisiteli killi zeminlerin dayanımına etkisi incelenmiştir. Uçucu kül katkıları % 0, % 3, % 5 ve % 10 olarak belirlenmiştir. 1 günlük ve 7 günlük kür süresine göre elde edilen mukavemet değerleri incelenmiştir. Uçucu kül arttıkça numunelerin optimum su muhtevaları artmış maksimum kuru birim hacim ağırlıkları azalmıştır. Kıvam indekslerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Katkısız zeminin likit limit değeri 49 iken uçucu kül katkılı karışımlarda sadece % 5 katkıda 50

olup diğer katkılarda zemin ile aynı değerdedir. Plastik limit katkısız zeminde % 24.5 iken % 3 uçucu kül katkılı karışımda % 21'e düşmüştür. Diğer katkı oranlarında (% 5 ve % 10) ise plastik limit % 3 uçucu kül katkılı olan ile aynı kalmıştır. Serbest basınç açısından yapılan değerlendirmeye göre 1 gün kür süresinde % 3 uçucu kül katkılı karışımın serbest basınç dayanımı katkısız zeminin yaklaşık 1.6 katıdır. Uçucu kül katkısı % 5 olduğunda serbest basınç dayanımı (UCS) değeri zeminin 1.33 katına düşmüştür. En düşük değer % 10 uçucu kül katkılı karışımda elde edilmiş ve bu değer katkısız zeminin 0.80 katı olmuştur. 7 gün kür süresinde ise daha farklı bir durum göze çarpmaktadır. Buna göre % 3 uçucu kül katkılı karışımın UCS değeri, katkısız zeminin 1.4 katıdır. Diğer katkı oranları olan % 5 ve % 10 uçucu kül katkısının serbest basınç dayanımı değerleri ise zeminin sırasıyla 1.53 ve 1.02 katıdır. 1 günlük kür süresinde en yüksek dayanım % 3 uçucu kül katkılı karışımda iken, 7 gün kürde en yüksek değer % 5 katkıda elde edilmiştir.

Şenol vd. (2006), OH, CH, CL ve ML sınıfı zeminlere ayrı ayrı 2 farklı C sınıfı ve 2 farklı da standartta tanımlanamayan sınıfta olan uçucu külleri ekleyerek katkıların zeminin dayanım özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Dayanım parametrelerini bulmak amacıyla serbest basınç ve Kaliforniya taşıma oranı deneyi yapılmıştır. Hem serbest basınç hem de Kaliforniya taşıma oranı deneyinde 7 günlük kürlü numuneler kullanılmıştır. Kaliforniya taşıma oranı deneyinde kullanılan karışımlara suda bekleme süreci uygulanmamıştır. Düşük plastisiteli kil (CL) numunesine eklenen % 12 oranındaki uçucu kül katkısı, zeminin serbest basınç dayanımını önemli miktarda (% 451) arttırmıştır. % 16 ve % 20 uçucu kül katkılarında dayanım artış oranları % 491 ve % 516 olmuştur. Burada dayanımın önemli miktarda artmasının nedeni kullanılan uçucu külün yüksek oranda (% 23) CaO içermesinden dolayı stabilize edilmek istenen kilde çimentolaşmanın daha yüksek olmasıdır. CBR sonuçları incelendiğinde ise uçucu kül katkısı ile CBR değerinin yüksek oranda arttığı (% 1033 ile % 1833 arası) bulunmuştur. Yüksek plastisiteli (CH) kil numunesine % 10, 14 ve 18 oranında Dewey uçucu kül (standartta tanımlanamayan uçucu kül (CaO % 9.8)) karıştırılmıştır. Numuneye eklenen, uçucu kül katkısı CBR değerini arttırmış olup artış oranı sırasıyla % 17.65, 17.65 ve 47.05 olarak bulunmuştur. Bu duruma CH kili için kullanılan uçucu külün CaO oranının, CL kili için kullanılan uçucu külün CaO oranından daha düşük olması etkili olmuştur. Ayrıca özellikle CH kiline eklenen uçucu kül katkılarında (% 10 ve 18) yapılan CBR deneyinde optimumdan daha yüksek su içeriklerinde de (optimum + % 7) karışımlar hazırlanarak deneyleri yapılmıştır. Bu durumda Columbia uçucu külü (% 23 CaO) eklenen karışıma ait CBR değeri, % 10 katkıda % 300 artış sağlarken; % 18 katkı oranı ise % 400 artış sağlamıştır. Katkısız CH kilinin 7 günlük kürlü

numunesinin CBR değeri % 3 iken, % 18 uçucu kül eklendikten sonra değer % 15'e çıkmıştır. Bu artış % 400 olmasına rağmen stabilize zeminin taşıma gücü istenilen seviyeye çıkamamıştır.

Dewey uçucu külü (% 9.8 CaO) ile stabilize edilmiş CH ile katkısız CH kil örneklerinin CBR değerleri dikkate alındığında CBR artış oranları sırasıyla % 233 ve % 933 iken; King uçucu külünde (% 23.7 CaO) aynı oranlar sırasıyla % 200 ve % 567 olmuştur. Katkısız CH kili ve uçucu kül katkılı karışımlar için optimumdan daha yüksek su içeriğinde (optimum + % 7) serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bu durumda ise Columbia uçucu külü (% 23 CaO) eklenen karışıma ait serbest basınç değerinde, % 10 katkı oranı % 236 artış sağlarken; % 18 katkı oranı ise % 325 artış sağlamıştır. Dewey uçucu külünde (% 9.8 CaO) aynı oranlar sırasıyla % 194 ve % 350 iken; King uçucu külünde (% 23.7 CaO) aynı oranlar sırasıyla % 130 ve % 228 olmuştur.

Edil vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada ikisi tanımlanmayan diğer ikisi ise C sınıfı olmak üzere 4 adet farklı termik santrale ait uçucu külün 7 farklı zeminin CBR değerine etkisi incelenmiştir. Zeminlere eklenen uçucu kül katkıları % 10 ve % 18 olarak belirlenmiştir. CBR değerleri hesaplanırken, karışımların optimum su içeriği ve optimum + % 7 su içeriğindeki performansları değerlendirilmiştir. Buna göre kırmızı siltli kil tilinde (CL) eklenen % 10 uçucu kül katkısı CBR değerini katkısız zeminin 2-3 katı (kullanılan farklı termik santrallere göre) arasında artırmıştır. Katkı oranının % 18'e çıkması ile 4-6 kat arasına yükseltmiştir. CH sınıfı zeminde ise % 10 uçucu kül katkılı numunenin CBR değeri doğal zeminin 4-7 katı arası iken, CBR % 18 uçucu kül katkısında 12-14 katı arası bir değerde elde edilmiştir. CH zeminde ise % 10 uçucu kül katkılı numunenin CBR değeri doğal zeminin 3-4 katı arası iken, % 18 uçucu kül katkısında bu değer 5-11 katı arasına yükselmiştir.

Ghosh ve Subbarao (2006), F sınıfı uçucu külün dayanım özelliklerinin kireç ve jips ile stabilizasyonuna yönelik bir araştırma yapmışlardır. Buna göre uçucu küle eklenen % 4 oranında kirecin, uçucu külün 7 gün kürlü serbest basınç dayanımını (126 kPa) 28 gün kür süresinde 2.55 ve 90 günde 9.53 katına (1201 kPa) çıkardığı gözlenmiştir. Kireç oranının % 6'ya çıkması dayanımı 28 gün kür süresinde 3.26 katına ve % 10 olması ise 4.38 katına çıkarmaktadır. En yüksek dayanım % 10 katkılı karışımın 90 gün kür süresinde gerçekleşmiştir. İlgili durumdaki dayanım uçucu külün 7 günlük kürlü durumunun 46.84 katına çıkarak yaklaşık 5906 kPa değerine ulaşmıştır. CBR deneyinde ise 7 gün kürden sonra 4 gün suda bekleme sürecine tabi tutulan karışımların CBR değerlerine bakıldığında, uçucu külün kendi CBR değeri

yaklaşık % 10 iken eklenen % 4 kireç CBR değerini % 15'e yükseltmiştir. Kireç oranının % 6'ya çıkması ile CBR % 25'e yükselmiş ve daha fazla eklenen kireç CBR değerini değiştirmemiştir.

Osinubi ve Nwaiwu (2006) tarafından yapılan çalışmada CL zemine eklenen % 3 kireç, katkısız zeminin CBR değerini % 8'den 8.25 katına çıkararak % 66'ya yükseltmiştir. Artan kireç oranı ile CBR değerleri artmaya devam etmiş olup % 5 kireç katkısında % 70'e ve % 8 kireç katkısında % 75'e ulaşmıştır. Böylece katkısız zeminin CBR değeri sırasıyla 8.75 ve 9.38 katına kadar çıkmıştır. Aynı çalışmada serbest basınç dayanımına kirecin etkisi de incelenmiştir. Buna göre 7 gün kür süresinde % 3 kireç katkısına ait serbest basınç dayanımı killi zeminin 1.85 katıdır. Katkı oranının % 5'e çıkması ile dayanım katkısız zeminin 2.58 katına yükselmiştir. Daha fazla eklenen kireç ise serbest basınç dayanım artış hızını düşürmüştür ve % 8 katkılı zeminde serbest basınç dayanımı katkısız zeminin 2.82 katı olmuştur. 28 gün kür süresi sonunda ise % 3 kireç katkılı karışımın serbest basınç dayanımı katkısız killi zeminin serbest basınç değerinin 4.35 katına ulaşmıştır. En yüksek dayanım % 5 kireçli karışımda elde edilmiş olup bu karışımda serbest basınç dayanımı değeri, katkısız zemine ait dayanım değerinin 4.68 katına çıkmıştır. Katkı oranı % 8'e yükseldiğinde serbest basınç dayanımı % 5 katkılı karışımın değerine göre azalmış olup kontrol zemininin 3.79 katına düşmüştür.

Sezer vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada yüksek plastisiteli (CH) kil numunesine standartta tanımlanamayan sınıfta Soma uçucu külü (CaO % 42.25) çeşitli oranlarda (% 0, % 5, 10, 15 ve 20) karıştırılmıştır. Karışımlar üzerinde serbest basınç ve direkt kesme deneyleri yapılmıştır. Yapılan serbest basınç deneyinde kür süreleri 1 gün, 7 gün, 1 ay ve 3 ay olarak seçilmiştir. 1 günlük kürlü numunelere ait serbest basınç deneyi sonuçlarına göre % 10 ve % 15 katkı oranlarında serbest basınç dayanımı yaklaşık % 50 artarken diğer katkı oranlarında yaklaşık olarak saf durumla aynı olmuştur. Kür süresi arttıkça dayanım artışı % 150 değerlerine yükselmiş olup, en yüksek dayanım değerlerine % 20 katkıda ulaşılmıştır. Katkı oranı arttıkça aynı katkı oranı ve farklı kür süresine sahip karışımlardaki serbest basınç dayanımı değerleri arasındaki fark, kür süresi 1 ay ile 3 ay olan karışımlarda zamanla azalmıştır. İçsel sürtünme açıları da katkı oranı arttıkça doğrusal olarak artış göstermiş, en yüksek artışlar % 20 katkı oranlı karışımlarda yaklaşık olarak % 40 olmuştur.

Değirmenci vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada yüksek plastisiteli kil (CH) zemine değişen oranlarda (% 5, % 10 ve % 15) F sınıfı uçucu kül katılmıştır. Eklenen % 5 uçucu kül zeminin

optimum su içeriğini ( $w_{opt}$ ) % 43.58'ten % 32.40 değerine düşürmüştür. Daha fazla eklenen uçucu kül  $w_{opt}$  değerini değiştirmemiş ve diğer iki karışımda da % 32.50 olmuştur. Likit limit açısından ise % 5 uçucu kül katkısı zeminin likit limitini % 72.46'ten % 76.20 değerine yükseltmiştir. % 10 uçucu kül ise likit limit değerinde önemli bir değişim oluşturarak değeri % 58.36'ya indirmiştir. Daha fazla eklenen uçucu kül ise likit limiti değiştirmeyerek % 58.84 düzeyine getirmiştir. Serbest basınç deneyleri için kür süresi 2 gün olarak tercih edilmiştir. Zemine eklenen % 5 uçucu kül, dayanımı 1.6 katına çıkarmıştır. Katkı oranının % 10'a çıkması ile dayanım 2 katına çıkarken en yüksek dayanım % 15 katkılı karışımda gerçekleşmiş ve ilgili karışımın dayanımı zeminin 2.4 katına çıkmıştır.

Ghosh ve Subbarao (2007), farklı hücre basınçlarında konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli kesme deneyi (UU) yaparak jips ve kireç ile stabilize edilmiş uçucu kül malzemesinin deviyatör gerilme değerlerinin nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Buna göre 7 gün kür süresinde uçucu külün 200 kPa hücre basıncı altında maksimum deviyatör gerilmesi 287 kPa olmuştur. Aynı hücre basıncında % 4 kireç katkılı karışımın maksimum deviyatör gerilmesi uçucu külün değerinin 1.54 katına, % 6 kireç katkısında ise 2.72 katına çıkmıştır. Kür süresinin 28 güne çıkması ile maksimum deviyatör gerilme % 4 kireçli karışımda uçucu külün 2.22 katına ve % 6 katkıda 3.03 katına çıkmıştır. Küle eklenen kireç hem içsel sürtünme açılarını hem de kohezyon değerlerini ciddi şekilde artırmıştır. İçsel sürtünme açısı uçucu kül için  $25^\circ$  olup % 10 kireç katkılı karışımda  $36^\circ$ 'ye kadar yükselmiş ve kohezyon ise 0 iken 50 kPa değerine ulaşmıştır.

Cömert ve Fırat (2008) tarafından yapılan çalışmada % 100 Bilecik kili, % 10 oranında bentonit ve % 90 oranında Bilecik kili içeren numuneler kontrol amaçlı kullanılmıştır. Daha sonra hem zeminlere % 5 kireç içeriği sabit kalmak koşulu ile öncelikle % 5, 10 ve 15 oranlarında ayrı ayrı olacak şekilde çimento ve uçucu kül ilavesinin dayanıma etkisi incelenmiştir. Hava sızdırmaz ortamda 28 gün bekletilen numuneler sonrasında 4 gün su havuzunda bekletilerek şişmeleri ölçülmüştür. Kile eklenen uçucu kül, kireç ve çimento silt miktarının artmasına ve kilin azalmasına yol açmıştır. Serbest basınç deneylerinde % 10 uçucu kül içeren bentonit katkılı kil ile bentonitsiz % 15 çimento içeren numunelerin maksimum dayanım verdiği görülmüştür. Bentonit içeren numunelerde kür süresi arttıkça CBR değeri artmıştır. 28 günlük kür süresinde uçucu kül katkılı karışımda artış varken çimento katkılı karışımda azalma görülmüştür. Küre tabii tutulan karışımların CBR değerleri % 10 uçucu kül oranına kadar artmış ve % 15 katkıda bir miktar azalış görülmüştür. Bentonit içermeyen karışımlarda CBR değeri

katkı yüzdesiyle artarken değer % 9'dan sırasıyla % 19, % 21 ve % 25'e yükselmiştir. Bentonitli karışımlarda ise % 19, % 20 ve % 26 değerleri görülmüştür. 28 gün havada kürlenip ardından 4 gün de suda bekleme durumu için CBR artış oranı bentonitli olanlarda bentonitsiz olanları geçmiştir.

Göktepe vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada yüksek plastisiteli (CH) kil numunesine 1 adet C sınıfı (Yatağan) ve 1 adet de standartta tanımlanamayan sınıfta (Soma) olan uçucu külleri çeşitli oranlarda (% 0, % 5, 10, 15 ve 20) karıştırılmıştır. Kür süresi olarak 1, 7, 28 ve 90 gün seçilmiştir. 1 günlük kürlü numunelerde C sınıfı külün kullanıldığı durumda uçucu kül katkısı ile serbest basınç dayanımı artışı % 5, % 10, % 15 ve % 20 katkılar için sırasıyla % 4.16, % 47.68, % 112.96 ve % 126.85 olarak gerçekleşmiştir. Kür süresinin 7 gün olması ile artış oranları sırasıyla % 58.33, 71.29, 108.26, 188.25 olmuştur. 28 günlük kür durumunda ise artış daha da hızlanarak % 195.36 ve % 329.63 aralığına yükselmiştir. 28 günden sonra da dayanımda artış gözlenirse bile ilk 28 güne göre artış hızında önemli bir yavaşlama olmuştur.

Yılmaz vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada 2 adet düşük plastisiteli killi zemin örneği ve değişen oranlarda uçucu kül (% 10, % 20 ve % 50) içeren killi karışımlar üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kür süresinin de etkisinin gözlenmesi açısından 1, 7, 28 ve 90 gün kür süreleri seçilmiştir. Serbest basınç deneyleri sonucunda, numunelerin dayanımlarının 28 günde % 70-80 arasında arttığı, 90 günde ise maksimuma ulaştığı gözlenmiştir. Deneyler sonucunda bir zeminde % 10, diğer zeminde ise % 20 uçucu kül katkı oranında maksimum serbest basınç dayanımı değerine ulaşılmıştır.

Zha vd. (2008), şişen zeminlerin sadece uçucu kül ve uçucu kül-kireç kombinasyonu ile stabilizasyonu sonucunda şişme potansiyelleri ve serbest basınçlarının nasıl değiştiğini gözlemlemiştir. Kireç içerikleri % 0, 1 ve 2 oranlarında seçilmiştir. Ayrıca ağırlıkça % 3, 6, 9, 12 ve 15 katkı oranlarında uçucu kül kullanılmıştır. Serbest basınç deneyinde kür süresi 0 ve 7 gün tercih edilmiştir. Buna göre sıfır gün kür süresinde sadece uçucu kül katkısı içeren tüm karışımların serbest basınç dayanımı (UCS) katkısız zemin ile neredeyse aynıdır. Kür süresi 7 gün olduğunda ise UCS değerlerinde artan katkı ile artış gözlenmiştir. Uçucu kül katkılı karışımlarda en düşük UCS değeri % 3 katkıda katkısız zeminin 1.11 katı iken daha sonra en yüksek değerine % 9 katkılı karışımda ulaşmıştır. % 9 uçucu kül katkılı karışımın 7 gün kür süresindeki UCS değeri zeminin 1.22 katı olmuştur ve diğer katkı oranlarında (% 12 ve % 15) serbest basınç dayanımları neredeyse aynı kalmıştır. Bunun yanında % 1 kireç sabit olmak üzere

değişen oranlarda uçucu kül içeren karışımlarda ise 0 gün kür süresinde UCS değerleri artan uçucu kül ile aynı kalıp zeminin yaklaşık 1.02 katı olmuştur. Diğer kireç oranları olan % 2 ve % 3 için ise artan uçucu kül ile 0 gün kür süresinde dayanım değerleri neredeyse aynı kalmış ve sırasıyla katkısız zeminin 1.05 ve 1.10 katı olmuştur. Kür süreleri 7 gün olduğunda en yüksek dayanım değerleri uçucu kül + kireç içeren karışımların hepsinde de % 9 uçucu kül içeren karışımlarda elde edilmiştir. % 1, % 2 ve % 3 kireç ile % 9 da uçucu kül içeren karışımların serbest basınç değerleri sırasıyla katkısız zeminin 1.47, 1.70 ve 1.83 katıdır. Şişme potansiyelleri ise katkısız zeminde yaklaşık % 10.6 iken artan uçucu kül katkısı ile azalmıştır. Uçucu kül katkılı karışımlar arasında en düşük şişme değeri % 15 katkılı karışımda % 6.8 civarında bulunmuştur. Sadece kireç içeren karışımların şişme potansiyelleri % 1, % 2 ve % 3 katkıları için sırasıyla % 9.70, % 8.5 ve % 7.25'tir. Hem kireç hem de uçucu kül içeren karışımlarda da artan uçucu kül ve kireç miktarları ile de şişme potansiyelinde önemli azalmalar gözlenmiştir. En düşük şişme potansiyelleri % 15 uçucu kül içeren kireçli karışımlarda elde edilmiştir. Buna göre % 1 kireç + % 15 uçucu küllü karışımın şişme potansiyeli % 5.75 iken, en düşük şişme potansiyeli % 3 kireç + % 15 uçucu kül katkılı karışımda bulunmuştur. Bu katkı için şişme potansiyeli % 4.5 seviyesindedir.

Altun vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada ML sınıfı zemine eklenen % 10, % 20 ve % 30 C sınıfı uçucu kül katkısının zeminin serbest basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Buna göre 7 gün kür süresinde % 10 uçucu kül katkısında serbest basınç dayanımı katkısız zemine göre yaklaşık % 200 oranında artmıştır. Eklenen uçucu kül katkısı, serbest basınç değerini artırmaya devam etmiş ve en yüksek artış % 30 katkılı karışımda gerçekleşmiştir. İlgili durumda serbest basınç dayanımı zemine göre % 417 artmıştır. Kür süresinin 28 güne çıkması ile % 10 katkılı karışımda serbest basınç artış hızı ilk 7 güne göre daha yavaş olmuş ve katkısız zemine göre artış % 232 oranında elde edilmiştir. Katkı oranının % 30 olduğu durumda ise dayanım katkısız duruma göre % 858 oranında artmış olup, dayanım artış hızı ilk 7 güne yakındır. Aynı çalışmada donma-çözülme durumunda % 10 ve % 30 uçucu kül katkılı karışımlar için 1, 3 ve 7 çevrim uygulanmıştır. Her iki durumda en düşük değer 7 donma-çözülme çevriminde elde edilmiştir. Buna göre % 10 katkılı karışımın serbest basınç dayanımı donma-çözülmesiz halinin 0.88 katı iken, % 30 katkılı durumda 0.93 katı olmuştur. Kullanılan uçucu külün CaO yüzdesinin fazla olması bu duruma etki eden başlıca faktör olarak anlaşılmaktadır.

Solanki vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada kireç katkısının CL zeminin serbest basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Buna göre 28 gün kür süresinde zeminin dayanımı eklenen %

3 kireç ile 1.52 katına çıkarken, kireç katkısının % 6'ya çıkması ile dayanım neredeyse aynı kalarak zeminin 1.6 katına gelmiştir. En yüksek dayanım ise % 9 kireç katkılı karışımda gerçekleşmiş olup, karışımın serbest basınç dayanım kontrol zemininin 2 katı olmuştur.

Bin-Shafique vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada yumuşak killi zemin (CL) ve şişen killi zemin (CH) C sınıfı uçucu kül ile stabilize edilmiştir. Uçucu kül % 5, % 10, % 15 ve % 20 katkı oranlarında kullanılmıştır. CL zemine yapılan serbest basınç deneyi sonrasında katkısız zeminin serbest basınç dayanımı 212 kPa olarak tespit edilmiştir. % 5 uçucu kül katkılı karışımın serbest basınç dayanımı (UCS) katkısız zeminin 2.42 katı iken artan katkı oranı ile de dayanım artış göstermiştir. En yüksek UCS değeri % 20 katkılı karışımda, katkısız zeminin 3.79 katı olarak bulunmuştur. CH zeminde ise serbest basınç değeri katkısız zemin için 180 kPa'dır. Artan uçucu kül katkısı ile UCS değeri artarak en yüksek değerine % 20 katkılı karışımda ulaşmıştır. % 20 uçucu kül katkılı CH zeminin UCS değeri, katkısız zeminin 3.15 katı olmuştur. Her iki zemin ve karışımları için de ayrıca 12 donma-çözülme çevrimi sonrasında UCS deneyleri yapılmıştır. Buna göre, katkısız CL ve CH zeminin 12 donma-çözülme çevrimi sonrasında serbest basınç dayanımları, donma-çözülmesiz durumlarının sırasıyla 0.64 ve 0.52 katıdır. CL zeminde % 5, % 10 ve % 20 uçucu kül katkılı karışımların, 12 donma-çözülme çevrimleri sonrası UCS değerleri, donma-çözülmesiz durumlarının sırasıyla 0.75, 0.64 ve 0.85 katlarıdır. CH zeminde ise % 5, % 10 ve % 20 uçucu kül katkılı karışımların, 12 donma-çözülme çevrimleri sonrası UCS değerleri, donma-çözülmesiz durumlarının sırasıyla 0.58, 0.67 ve 0.61 katlarıdır. Her iki zemin grubu için geçerli olmak üzere dikkat çekici sonuçlardan biri de donma-çözülme çevriminden sonra bile stabilize edilmiş olan zeminlerin katkısız zeminlerden daha yüksek dayanıma sahip olmasıdır. Şişme deneyi ise sadece CH zemin ve karışımlarına uygulanmıştır. Katkısız zeminin şişmesi % 17.20 iken artan uçucu kül katkısı ile şişme değerlerinde önemli azalmalar olmuştur. % 5 katkılı karışımın şişme değeri % 9.8 iken, en düşük şişme, % 20 katkılı karışımda % 4.1 olarak bulunmuştur.

Çetin vd. (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı zeminlere eklenen % 10 ve % 20 oranlarında F sınıfı uçucu kül ile değişen oranlarda kireç fırın tozunun (% 60 CaO), zeminlerin 1, 7 ve 28 gün kür süresindeki CBR ve rezilyans değerine etkisi incelenmiştir. CBR değerleri kür süresi ile artış göstermiştir. Kumlu zeminlerde en düşük karışım oranında dahi 28 gün kür süresinde CBR değerlerinin % 100'ün üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Rezilyans dayanımında ise en yüksek değerlerin 28 gün kür süresinde özellikle % 5 kireç ve % 20 uçucu kül içeren karışımlarda olduğu bulunmuştur.

Jongpradist vd. (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yüksek su içeriklerindeki CH zemin üzerine eklenen farklı miktarlarda (% 5, % 10, % 15, % 20 ve % 30) F sınıfı uçucu kül katkılarının farklı su içeriği ve kür koşullarında serbest basınç dayanımına nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Buna göre, su içeriğinin % 130 olduğu durumda % 15 çimento ve % 15 uçucu kül içeren bir karışımın serbest basınç dayanımı 7 günde 320 kPa iken 28 günde bu değer 2.5 katına çıkmaktadır. Su içeriğinin % 200 olması ile 7 gün kürlü dayanım 100 kPa değerine kadar düşmüş ve ilgili su içeriğinde kür süresi 28 güne çıktığında dayanım artışı aynı diğer su içeriğinde olduğu gibi 7 günlük kürlü halin 2.5 katı olmuştur. Uçucu kül katkısının üzerine bir de çimento eklendiği durumda serbest basınç dayanımları oldukça yükselmiştir. Uçucu kül sabitken çimento oranının % 5'ten % 35'e çıkması dayanımın yaklaşık 17 kata çıkmasını sağlamıştır.

Yılmaz ve Sevensan (2010), yüksek plastisiteli killi zemin üzerine değişik oranlarda (% 10, 20 ve 30) F sınıfı uçucu kül (CaO = % 13.1) ekleyerek deneyler yapmışlardır. Araştırmacılar, kür süresini 1, 7, 14 ve 28 olarak tercih etmişlerdir. Numunelerdeki uçucu kül miktarı arttıkça optimum su içeriği azalmış, maksimum kuru yoğunluk artmıştır. 1 günlük kür süresinde dayanım 231 kPa iken % 10 uçucu kül içeren kilin dayanımı 294.1 kPa olmuştur. % 20 ve % 30 katkı oranları dayanımı azaltsa da numuneler katkısız halden daha yüksek bir dayanıma (% 20 katkıda 301.5 ve % 30 katkıda 306.1 kPa) sahiptir. 7, 14 ve 28 gün kür durumu için ise en yüksek dayanımlar % 30 katkı oranında sırasıyla 355.5, 491 ve 546.2 kPa olarak elde edilmiştir.

Brooks vd. (2011), iki farklı CL sınıfı zemin F sınıfı (CaO %12) uçucu kül ile stabilize edilmiştir. Ayrıca kireç taşı tozu da stabilizasyon amacıyla kullanılmıştır. Katkı oranları uçucu kül için % 15 ve % 25 iken; kireç taşı tozu için % 3, 6 ve 9 olarak seçilmiştir. Serbest basınç deneyi için 1, 7 ve 28 günlük kür süreleri kullanılmıştır. Uçucu kül katkısı arttıkça zeminlerden 1 numaralı CL zeminde serbest basınç dayanımında azalmalar gözlenmiştir. % 15 katkılı karışımın serbest basınç dayanımı 1 gün kür süresinde katkısız zeminin 0.55 katına kadar düşmüştür. Katkı oranı % 25'e ulaştığında ise UCS değeri daha da azalarak zeminin 0.49 katına gerilemiştir. Kür süresi 7 ve 28 gün olduğu durumda % 15 katkılı karışımın serbest basınç dayanımı değerleri katkısız zeminin sırasıyla 0.65 ve 0.80 katına ulaşmıştır. % 25 katkılı karışım için ise 7 gün ve 28 gün kür süresi için bulunan UCS değerleri zeminin 0.55 ve 0.64 katı olmuştur. Burada kür süresine göre dayanımlarda artış olmasına rağmen uçucu kül katkılı karışımların dayanımı, tüm kür sürelerinde geçerli olmak üzere katkısız zeminden daha düşük olmuştur. Ancak 2 numaralı CL zeminde % 15 katkılı durumda 1 numaralı zemine göre önemli

farklılıklar oluşmuştur. İlgili zeminin % 15 uçucu kül katkılı durumunda 1, 7 ve 28 gün kürlü durumlarındaki UCS değerleri katkısız zeminin sırasıyla 1.05, 1.11 ve 1.44 katı olmuştur. Ayrıca 1 numaralı zeminin CBR değeri % 2.5 iken, % 15 ve % 25 katkılı karışımlarda ise % 3.5 ve % 4 olarak tespit edilmiştir. 2 numaralı zeminde ise CBR değeri % 4.0 iken zemine eklenen uçucu kül ile CBR değerlerinde önemli bir değişim olmamıştır. % 15 ve % 25 uçucu kül katkılı karışımlarda CBR sırasıyla % 4.5 ve % 5.0 olmuştur. Kireç fırın tozu karışımları değerlendirildiğinde ise uçucu küle göre daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. 1 numaralı zemine eklenen % 3 katkıda zeminin dayanımı 1, 7 ve 28 gün kürlü sırasıyla katkısız zeminin 0.72, 0.90 ve 1.57 katı olmuştur. Katkı oranının % 6 olduğu durumda zeminin dayanımı 1, 7 ve 28 gün kürlü sırasıyla katkısız zeminin 0.80, 1.10 ve 1.93 katı olmuştur. En yüksek serbest basınç dayanımı % 9 katkılı karışımın 28 gün kürlü süresinde elde edilmiş ve bu durumdaki UCS değeri zeminin 3.20 katı olmuştur. CBR değerleri açısından ise 1 numaralı zeminin CBR değeri artan kireç katkısı ile en yüksek değerine % 9 katkıda ulaşmış ve ilgili katkıdaki CBR değeri % 6.80 olmuştur. Benzer durum 2 numaralı zeminde de gerçekleşmiş ve katkısız zeminin CBR değeri % 4.00 iken en yüksek CBR yine % 9 katkılı karışımda olmuştur. Bu karışım için değer % 9.00 olarak tespit edilmiştir.

Santos vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada 2 adet düşük plastisiteli CL sınıfı zemin ile 1 adet standartta tanımlanamayan sınıfta olan uçucu kül (CaO % 19.2) kullanılarak zemin stabilize edilmiştir. Uçucu kül katkı oranları olarak % 20, 40, 60 ve 100 kullanılmıştır. Uçucu kül katkı oranı arttıkça, optimum su içeriği % 225 artarken (% 14'den % 45.5'e) maksimum kuru birim hacim ağırlığı (17.9 kN/m<sup>3</sup>'den 10.4 kN/m<sup>3</sup>'e) % 41.90 azalmıştır. % 20 katkıda ise optimum su içeriği % 14'den % 22.5'e (% 60.71) artarken; maksimum kuru birim hacim ağırlığı da 17.9 kN/m<sup>3</sup>'den 15.5 kN/m<sup>3</sup>'e düşerek % 13.41 azalmıştır. % 20, % 40 ve % 60 katkı oranında 14 günlük serbest basınç dayanımı değerleri sırasıyla 940, 2536 ve 9365 kPa olmuştur. % 0'a ait 14 günlük kürlü serbest basınç dayanımı 200 kPa olarak görünmektedir. Uçucu kül katkısı arttıkça, serbest basınç dayanımındaki artış oranı % 20 katkı oranı referans alındığında % 40 için % 140.21; % 60 için % 169.79; % 100 için % 896.28 olmuştur. % 0 katkı oranı referans alındığında ise % 20 için % 370; % 40 için % 1029; % 60 için % 1168; % 100 için % 4582.5 olmuştur.

Seco vd. (2011), farklı katkıların CH zeminin şişmesine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla tanımlanamayan uçucu kül % 5 ve kireç % 2 ile % 4 oranlarında kullanılmıştır. Buna göre zemine eklenen % 5 uçucu kül katkısı şişmeyi % 4.7'den % 2.2'ye indirmiştir. Kireç ise % 2

oranında iken zeminin şişmesini önemli miktarda değiştirmeyerek % 3.5'e getirmiştir. Kireç oranının % 4'e çıkması ile şişme daha da azalarak % 1.25 olarak bulunmuştur. Ayrıca eklenen kireç, zeminin optimum su içeriğini % 14.6'dan % 17.5'e yükseltmiştir. Kuru yoğunlukta ise önemli olmayan bir miktarda azalma ( $17.56 \text{ kN/m}^3$ 'ten  $16.48 \text{ kN/m}^3$ ) gerçekleşmiştir. Uçucu külün kuru yoğunluğu ise neredeyse değişmemiş,  $17.17 \text{ kN/m}^3$  olmuştur.

Al-Mukhtar vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada CH sınıfı şişebilen bir zemine eklenen % 4 kireç, 7 gün kür süresinde zeminin serbest basınç dayanımını (UCS) 4 katına çıkarırken, 90 gün kür süresinde ise 6 katına yükseltmiştir. En yüksek dayanım % 10 katkılı karışımda olmuştur. İlgili karışımın UCS değeri 7 gün kür süresinde zeminin 5.33 katı iken kür süresi 90 gün olduğunda 8 katına yükselmiştir. Şişme basınçları ise 7 gün kür süresi ve % 4 kireçte, zeminin 0.14 katına, 90 gün kür süresinde ise 0.07 katına düşmüştür.

Behera ve Mishra (2012) tarafından yapılan çalışmada maden nakliyat yol inşaatı için uçucu kül-kireç ve maden toprağı karışımı üzerinde serbest basınç, CBR ve dolaylı çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre % 70 maden toprağı ve % 30 uçucu kül karışımı üzerine eklenen % 2 kireç sonrasında serbest basınç dayanımı 28 gün kür süresinde 1200 kPa olmuştur. Kireç katkısı arttıkça dayanım artmış ve en yüksek değeri % 9 kireç katkılı karışımda 2500 kPa olarak gerçekleşmiştir. 28 gün kür süreli CBR değerleri de oldukça yüksek olup aynı karışımın % 2, % 3, % 6 ve % 9 kireçli olanları için sırasıyla % 75, % 115, % 130 ve % 190 olmuştur. Dolaylı çekme dayanımları da 87 ile 280 kPa arasında değişmektedir. Serbest basınç dayanımları, 28 gün kür süresi için geçerli olmak üzere bütün karışımlarda dolaylı çekme dayanımlarının 5 ile 11 katı arasındadır.

Celauro vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada ise yüksek plastisiteli killi zeminin (CH) ani taşıma indeksi (IBI) değeri yaklaşık % 11 olup, eklenen % 3 kireç katkısında 1.36 katına çıkarak % 15'e yükselirken, katkı oranının % 6 olması ile IBI değeri % 19'a yükselerek katkısız zeminin IBI değerinin 1.73 katına çıkmıştır. 7 gün kür süresine tabi tutulan bir zemin-kireç karışımına ait şişme davranışı incelendiğinde, eklenen tüm kireç karışımlarında (% 1.5, % 2, % 3 ve % 6) şişme değerleri % 0.1 değerinin altında kalmıştır.

Kavak ve Baykal (2012) tarafından yapılan çalışmada zemine değişen oranlarda katılan kirecin (% 2, % 3, % 4, % 5, % 6, % 8 ve % 10) zeminin özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Eklenen % 2 kireç, likit limit ve plastik limiti yükseltmiş olup, daha fazla eklenen kireç her iki limiti de

etkilememiştir. Plastisite indeksinde de önemli bir değişim gözlenmemiştir. Zemine eklenen kireç, zeminin optimum su içeriğini yükseltirken (% 21.5'den % 25'e), maksimum kuru birim hacim ağırlığı fazla etkilememiştir. Zemine eklenen % 4 kireç, zeminin serbest basınç dayanımını 0 gün kürde, katkısız zeminin 1.70 katına, 7 gün kür süresinde 4 katına ve 28 gün kür süresinde yaklaşık 8 katına yükselmiştir. Zemine ait yaş CBR değeri 28 gün kür durumunda % 2 iken, % 4 kireç katkılı karışımda % 58'e çıkmıştır.

Sharma vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada CL sınıfı zemine C sınıfı uçucu kül ilave edilmiş, uçucu kül katkı oranı % 0, 10, 15, 20 ve 25 olarak belirlenmiştir. Ayrıca uçucu kül + kireç karışımının da etkisini incelemek amacıyla % 20 uçucu kül + % 8.5 kireç içeren bir karışım da kullanılmıştır. Dayanım özelliklerinin tespiti amacıyla serbest basınç ve CBR deneyleri, mikro seviyede inceleme yapmak için ise taramalı elektron mikroskobu (SEM), X ışınları kırınımı (XRD), termogravimetri (TGA), Elektro Dispersif Spektrosopy (EDS) ve zeta potansiyeli analizleri gerçekleştirilmiştir. İndeks özellikleri değerlendirildiğinde uçucu kül miktarı arttıkça likit limit ve plastisite indeksi değerlerinde önemli bir değişim olmadığı görülmüştür. Optimum su içeriği % 17.82'den % 19.87'ye (% 11.57 artış); maksimum kuru birim hacim ağırlık ise 17.36 kN/m<sup>3</sup>'den 20.01 kN/m<sup>3</sup> değerine (% 14.12 artış) yükselmiştir. Katkısız zeminin CBR değeri % 2.06 iken artan uçucu kül katkısı ile CBR değerinde artışlar gözlenmiştir. Katkı oranının % 20 olduğu durumda CBR değeri % 4.08 olup katkısız zemine göre % 95.63 oranında artış göstermiştir. Uçucu kül katkılı karışımlar arasında en yüksek CBR değeri ise % 25 katkılı karışımda % 4.28 olarak tespit edilmiştir. Zemin + % 20 uçucu kül + % 8.5 kireç karışımında ise CBR değeri tüm karışımlar arasında en yüksek olan % 5.70 değerine ulaşmıştır. Serbest basınç dayanımı (UCS) ise artan uçucu kül katkısı ile artış göstermiş ve en yüksek değerine % 20 katkı oranında ulaşmıştır. Katkısız zeminin UCS değeri 24.73 kPa olarak bulunmuştur. % 20 katkılı karışımda ise 63.38 kPa değerine ulaşarak katkısız zeminin 2.56 katına çıkmıştır. Katkı oranının % 25 olduğu durumda ise dayanımda azalma olmuş ve bu durumdaki UCS değeri katkısız zeminin 1.82 katına gerilemiştir. Zemin + % 20 uçucu kül + % 8.5 kireç karışımının serbest basınç değeri ise sadece uçucu kül içerenlere göre daha yüksek olup katkısız zeminin 4.25 katıdır.

SEM deneyi sonuçlarına göre % 20 oranında ilave edilen uçucu kül sayesinde katkısız numuneye ait büyük boşlukların azaldığı gözlenmiştir. % 20 uçucu kül ve % 8.5 oranında kireç ilave edilen karışımda ise boşluklar daha da azalmıştır. SEM analizleri incelendiğinde eklenen katkıları sayesinde oluşan puzolanik reaksiyonlar sonucunda çimentolaşma içerikleri olan

kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat hidratlarının oluştuğu ve bu durumun da boşluk yarıçapını azalttığı gözlenmiştir. Numunede SEM mikrografi elde edilmeden önce numune platinle kaplanarak 30 s boyunca 50 mA akım verilmiştir. XRD deneyinde ise katkısız numune için 2 teta açısı 7 dereceden 10 dereceye kadar ayarlanmıştır. Bu şartlarda katkısız zemine ait XRD analizleri incelendiğinde montmorillonit mineraline ait 8.96 derecede grafikte oluşan belirgin bir şekil görünmüştür. Eklenen uçucu kül katkısı ile pik değerler daha keskin hale gelmiştir. Bu durum, uçucu kül ve uçucu kül-kireç katkılarının montmorillonit yapısında kırılma ve parçalanmaya (breaking) sebebiyet verdiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra kalsiyum silikat hidratları (C-S-H) için 2 teta açısı aralık 28.5 ile 30.5 arasında 28.48 derecede pik değer vermiştir. Katkısız CH zeminde C-S-H pikleri gözlenmemiş iken zemin + % 20 uçucu kül (S+20FA) ve zemin + % 20 uçucu kül + % 8.5 (S+20FA+8.5L) kireç içeren karışımlarda açıkça gözlenmiştir. TGA sonuçları değerlendirildiğinde ise sıcaklığın 800 derece olduğu durumda kütle kaybı katkısız zeminde % 7 iken, zemin + % 20 uçucu kül katkısında % 8.5 ve zemin + % 20 uçucu kül + katkısında % 12 civarındadır. Dayanım değişimini açıkça gösteren durum ise grafikte özellikle 450 ile 600 derece arasında S+20FA+8.5 karışımında göze çarpan hızlı kütle kaybıdır. Bu kısım, montmorillonitin zayıf yapısının bozulduğu ve C-S-H bileşenlerinin oluşmaya başladığını gösteren önemli bir bölüm olarak dayanım artışını ispatlamaktadır.

Aldaoood vd. (2014), % 3 oranında kireç ile stabilize edilmiş CL zeminin farklı donma-çözülme çevrimlerinde serbest basınç dayanım değerlerine yönelik araştırma yapmışlardır. Buna göre 6 donma-çözülme çevriminde elde edilen dayanım değeri, donma-çözülmesiz durum ile neredeyse aynıdır. Donma çözülme çevriminin 2 ve 4 olduğu durumlarda dayanım, donma-çözülmesiz duruma göre daha yüksektir. Her iki çevrime ait serbest basınç dayanımı, donma-çözülme uğramamış durumdaki dayanımın yaklaşık 1.35 katıdır. Donma çözülme çevrimi 11 olduğunda ise dayanım değerinde önemli bir düşüş olmuştur. Bu durumdaki dayanım donma-çözülmesiz durumun yaklaşık 0.48 katıdır.

Güllü ve Khudir (2014), yaptıkları çalışmada donma-çözülme çevrimine maruz kalan numunelerin serbest basınç dayanımlarını araştırmışlardır. Donma çözülme çevriminde numuneler -18 derecede 24 saat ve + 18 derecede 24 saat bekletilmiştir. Donma çözülme çevrim sayısı 1, 2 ve 3 olarak tercih edilmiştir. Donma çözülme öncesinde zemine eklenen % 2 oranında kireç, zeminin dayanımını 2.00 katına çıkarmıştır, kirecin katkısı % 4 olduğunda dayanım zeminin 3.50 katına yükselmiş olup daha fazla eklenen kireç neredeyse dayanımı hiç

değiştirmemiş olup % 10 katkıda da serbest basınç dayanımı (UCS) aynı değerde kalmıştır. Zemine uygulanan donma-çözülme çevrimleri ile UCS değerlerinde azalma olmuştur. Donma çözülme devinimi 1 iken katkısız zeminin serbest basınç dayanımı, başlangıç durumundaki UCS değerinin 0.94 katına düşmüştür. 2 ve 3. döngülerde ise düşüş hızlanmış ve ilgili çevrimlerde UCS değerleri başlangıç değerlerine göre sırasıyla 0.71 ve 0.52 katına gelmiştir.

McCarthy vd. (2014), düşük (CL) ve yüksek plastisiteli (CH) killi zeminin dayanım ve durabilite özelliklerini inceledikleri çalışmada killi zeminlere % 3 oranında kireç ekleyerek katkısız duruma göre farklılıkları analiz etmişlerdir. Sonra kireç % 3 oranında sabit tutularak üzerine % 6, 12, 18 ve 24 oranlarında F sınıfı uçucu kül karıştırarak ani taşıma indeksi, dolaylı çekme ve serbest basınç deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Burada kür sürelerini dikkate alırken ani taşıma indeksi deneyinde EN 14227-14 standardını dikkate almışlardır. Eklenen kireç katkısı % 3 iken IBI değeri yaklaşık % 16 bulunmuştur. % 3 kireç katkısı sabit iken üzerine eklenen % 6, % 12, % 18 ve % 24 uçucu kül katkılarında bulunan IBI değerleri % 29 ile % 31 arasında bulunmuştur. Bu kapsamda elde edilen değerlerin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Serbest basınç dayanımları değerlendirildiğinde 7 gün kür süresinde CL zemine eklenen % 3 kireç dayanımı 2.00 katına çıkartmış, kür süresi 28 güne çıktığında aynı kireç oranı zeminin dayanımını 2.71 katına çıkarmıştır. CL zemin için % 3 kireç ve % 6 uçucu kül katkılı karışımın dayanımı katkısız zeminin 1.71 katı iken, uçucu kül oranı arttıkça (kireç oranı % 3 sabit) dayanım artmış ve en yüksek dayanıma % 24 uçucu kül katkısında ulaşılmıştır. İlgili karışımın serbest basınç dayanımı, katkısız zeminin 3.71 katına çıkmıştır. Kür süresinin artması ile birlikte 28 gün kür süresinde serbest basınç dayanımı, % 3 kireç sabit olan % 6 uçucu kül katkısında zeminin 3.71 katı iken % 24 uçucu kül içeren karışımında 4.43 kat olmuştur.

7 gün kür süresinde CH zemine eklenen % 3 kireç dayanımı 1.86 katına çıkarırken, kür süresi 28 güne çıktığında aynı kireç oranı zeminin dayanımını 2.86 katına yükseltmiştir. 7 gün kür süresinde CH zemin için % 3 kireç ve % 6 uçucu kül katkılı karışımın dayanımı katkısız zeminin 2.00 katı iken, uçucu kül oranı arttıkça (kireç oranı % 3 sabit) dayanım artmış ve en yüksek dayanıma % 24 uçucu kül katkısında ulaşılmıştır. İlgili karışımın serbest basınç dayanımı, katkısız zeminin 3.00 katına çıkmıştır. Kür süresinin artması ile birlikte 28 gün kür süresinde serbest basınç dayanımı, % 3 kireç sabit olan % 6 uçucu kül katkısında zeminin 3.14 katı iken % 24 uçucu kül içeren karışımında 4.00 kat olmuştur.

CL zeminde yapılan dolaylı çekme deneyi sonuçlarına göre zemine eklenen % 3 kireç, zeminin dolaylı çekme dayanımını (ITS) 7 gün kür süresinde 1.80 katına çıkarmıştır. Kirecin üzerine ilave edilen % 6 uçucu kül dayanımı 2.2 katına artırmış ve en yüksek dayanım % 3 kireç ve % 24 uçucu kül içeren karışımda olup referans değerinin 3.00 katı olmuştur. Kür süresi ile ITS artışı devam etmiş olup 28 gün kürlü sadece % 3 kireç içeren karışımın dayanımı zeminin 3.00 katına çıkmıştır. Kirece eklenen % 6 uçucu kül aynı kür süresinde dayanımı 3.80 katına çıkarmış ve en yüksek dayanım yine % 24 uçucu kül ve % 3 kireç içeren karışımda bulunup 4.6 katı olmuştur.

Ataşalar vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada CL sınıfı kilin kireç ve F sınıfı uçucu kül ile stabilizasyonu sonucunda elde edilen serbest basınç dayanım değerleri incelenmiştir. Uçucu kül katkı oranları % 14, 18, 22 ve 26 olarak seçilmiştir. Kireç katkıları ise % 3, % 5 ve % 8 olarak uygulanmıştır. Ayrıca deniz suyu ve saf su etkisi de araştırılmıştır. Kür süresi olarak 15 gün seçilmiştir. Zeminin serbest basınç değeri 10.6 kPa olarak bulunmuştur. Saf su kullanılan durum için, serbest basınç dayanımları zemine eklenen % 3 ve % 5 kireç katkısında sırasıyla katkısız zeminin 1.80 ve 2.75 katına çıkmıştır. En yüksek değeri % 8 katkılı karışımda elde edilse de bu katkıdaki serbest basınç dayanımı değeri % 5 katkılı karışım ile neredeyse aynı olmuştur. Uçucu kül katkısında ise % 14 katkılı karışımdaki dayanım katkısız zeminin 0.70 katı olarak tespit edilmiştir. Şaşırtıcı bir sonuç olarak % 18 uçucu kül katkılı karışımın serbest basınç dayanımı katkısız zeminin yaklaşık 5 katı olmuş olup kireçli karışımlardan çok daha iyi bir performans göstermiştir. % 22 ve % 26 uçucu kül katkılı karışımların serbest basınç dayanımı (UCS) değerleri ise % 18 katkıya göre daha düşük olup katkısız zeminin sırasıyla 2.50 ve 1.40 katı olmuştur. Deniz suyunda ise % 3 kireç katkılı karışımın UCS değeri zeminin yaklaşık 2.50 katı olup saf sulu halinden daha yüksektir. En yüksek değerine % 5 uçucu kül katkılı karışımda ulaşmış olup bu katkıdaki UCS değeri katkısız zeminin 3.50 katıdır. Deniz suyunun kullanıldığı uçucu kül katkılı karışımlarda en yüksek değer % 18 katkılı karışımda zeminin 7.5 katı olmuştur. Bu değer saf su kullanılarak elde edilen serbest basınç dayanımı değerinin 1.50 katıdır. Ayrıca % 22 ve % 26 katkılı karışımların da UCS değerleri zeminin sırasıyla 5.70 ve 5.50 katı olup saf sulu hale göre oldukça yüksektir.

Modarres ve Nosoudy (2015) tarafından yapılan çalışmada CL zeminöncelikle % 3, % 6 ve % 9 oranında kireç katılarak stabilize edilmiştir. Daha sonra aynı zemine % 3, % 6 ve % 9 oranında F sınıfı uçucu kül eklenerek 6 değişik karışım oluşturulmuştur. Bu karışımlar, şişme ve CBR deneylerine tabi tutulmuşlardır. Eklenen % 3 uçucu kil zeminin şişmesini % 2.20'den % 1.36'ya

düşürmüştür. Uçucu kül oranı arttıkça şişme azalmış ve % 6 ve % 9 katkılarda sırasıyla % 0.92 ve % 0.60 değerlerine gerilemiştir. Kireçli karışımlarda ise şişme değerleri daha fazla düşmüştür. Zemine eklenen % 3 kireç, şişmeyi % 0.27 değerine getirirken, % 6 katkıda % 0.13 olmuştur. En düşük şişme, katkı oranının % 9 olduğu durumda % 0.05 olarak gerçekleşmiştir. Aynı karışımlar üzerinde yapılan CBR deneyleri değerlendirildiğinde ise zemine ait CBR değeri % 2 iken, eklenen % 3 kireç katkısında % 15'e yükselmiştir. % 6 ve % 9 katkılarda ise CBR değerleri sırasıyla % 19 ve % 22 olmuştur. Uçucu küllü karışımlarda da benzer durum mevcut olup eklenen % 3 uçucu kül, zeminin CBR değerini % 12'ye yükseltmiştir. Katkı oranının % 6 ve % 9 olduğu durumlarda da CBR artmış ve sırasıyla % 18 ve % 20 değerlerine gelmiştir. Serbest basınç deney sonuçları değerlendirildiğinde zemine eklenen % 3 uçucu kül zeminin serbest basıncını 7 gün kür süresinde 1.67 katına çıkarmıştır. Serbest basınç dayanımı değerleri % 6 ve % 9 uçucu kül katkılarında ise sırasıyla 1.83 ve 1.94 katına çıkmıştır. Kür süresinin 28 güne çıkması ile aynı katkı oranları için dayanım değerleri zeminin sırasıyla 1.83, 2.00 ve 2.11 katına çıkmış olup 7 günden sonra dayanım artış hızında belirgin bir azalma olmuştur. Aynı oranlarda kireç ilavesi yapıldığında 7 gün kür süresinde dayanım zeminin sırasıyla 2.56, 3.61 ve 4.33 katına ulaşmıştır. 28 gün kür süresi sonunda ise artış hızları azalmış ve bu durumda dayanımlar ilgili oranlar için zeminin 3.06, 4.22 ve 5.00 katı olarak gerçekleşmiştir.

Saride ve Dutta (2016) tarafından yapılan çalışmada çeşitli oranlarda eklenen (% 5, % 10, % 15 ve % 20) F sınıfı uçucu külün ( $\text{CaO} = \% 16.50$ ), CH zeminin şişmesine etkisi incelenmiştir. Buna göre eklenen uçucu kül zeminin şişmesini önemli miktarda düşürmüştür. Zeminin şişme indeksi % 50 iken, eklenen % 10 uçucu kül katkısı şişmeyi % 30'a düşürmüştür. Şişmenin en düşük olduğu karışım % 30 uçucu kül katkısında gerçekleşmiş ve şişme indeksi % 10'a kadar inmiştir. Ayrıca XRD analizi ile bu etki mikro yapıda da değerlendirilmiştir. Kür süresinin 1 gün olduğu durumda dayanımın artış etkisi olan çimentolaşmayı gösteren C-S-H pikleri XRD analizinde mevcut değil iken, 7 günlük kür süresinde belirmeye başlamıştır. Kür süresinin 28 güne çıkması ile pik daha belirginleşmiştir.

Cheshomi vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada CH zemine çeşitli oranlarda (% 3, % 5 ve % 7) F sınıfı uçucu kül eklenmiştir. Ayrıca aynı zemine benzer oranlarda ayrı olarak kireç de eklemiştir. Son olarak hem uçucu kül hem de kireç ilavesi yapılmıştır. Son karışım grubu için hazırlanan numunelerde kireç katkısı % 5 sabit iken aynı zamanda farklı oranlarda (% 3, % 5 ve % 7) uçucu kül karıştırılmıştır. Bu durumda zemine eklenen % 3 F sınıfı uçucu kül zeminin

şişmesini % 4.5'ten % 0.6'ya düşürmüştür. Uçucu kül oranının % 5'e çıkması ile şişme biraz yükselse de zemine göre daha düşük olup % 1.7 olmuştur. % 7 kül ise şişmeyi değiştirmeyerek % 1.6'ya getirmiştir. Burada kireç katkısı ile beklenen durumdan farklı olarak % 3 kireç zeminin şişmesini çok değiştirmese de % 4.5'ten % 4.9'a yükseltmiştir. Kireç oranının % 5 ve % 7'ye çıkması ile şişmede yükseliş devam etmiş olup sırasıyla % 5.5 ve % 6 olmuştur. Literatüre göre beklenti eklenen kirecin şişmeyi azaltmaya yönelik katkısının olmasıdır. Fakat, bu çalışmada farklı bir sonuç elde edilmiştir. Mikro analizler incelendiğinde eklenen kireç ile etrenjit mineralinin ortaya çıkması bu duruma sebep olmuştur. Hem uçucu kül hem kireç içeren karışımlarda ise % 5 kireç + % 3 uçucu kül içeren karışımın şişme değeri zeminin şişmesinde önemli bir değişime yol açmamış olup % 4.5'ten % 4.8'e getirmiştir. Kirecin ve uçucu külün % 5'er olduğu durumda şişme % 3.8'e düşmüştür. Uçucu külün % 7'ye çıkması ise şişmeyi % 3.5 seviyesine getirmiştir.

Dayıoğlu vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada yüksek plastisiteli killi zemine (CH) değişik oranlarda (% 10, % 20 ve % 30) uçucu küller eklemiştir. Bu uçucu küller C ve F sınıfında olarak CH zemine ayrı ayrı ilave edilmiştir. Bunların dışında CH zemine ayrı olarak % 4, % 8 ve % 12 oranında kireç eklenerek zeminin mühendislik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda hazırlanan katkısız ve katkılı numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri, şişme deneyleri ile kıvam indeksi deneyleri yapılmıştır. Ayrıca 2, 4 ve 8 donma-çözülme çevrimi uygulandıktan sonra serbest basınç deneyleri yapılarak, sıcaklık değişiminin serbest basınç dayanımı üzerinde etkisi incelenmiştir. Kür süresi olarak 7 gün tercih edilmiştir. Hem F sınıfı hem de C sınıfı uçucu küller ile kirecin kullanıldığı çalışmada ayrıca XRD analizi de gerçekleştirilmiştir. Şişme basınçları katkısız zeminin donma-çözülme çevrimi olmadan önce 235 kPa iken çevrim sayısı arttıkça (8 donma-çözülme çevriminde) azalarak 0.3 katına (70 kPa) düşmektedir. Zemine eklenen % 8 kireç katkısı şişme basıncını doğrudan 20 kPa değerine (katkısız zeminin 0.085 katı) düşürmüş olup donma-çözülme çevrimi arttıkça önemli bir değişime uğramamıştır. Aynı durumda zemine eklenen % 30 F sınıfı uçucu kül ise şişme basıncını 0 donma-çözülme çevriminde 150 kPa değerine (doğal zeminin 0.64 katına) düşürmektedir. Donma çözülme çevrimi arttıkça şişme basıncı önce artmış sonra 8 donma-çözülme çevriminde azalmıştır. 2 donma-çözülme çevriminde 205 kPa ve 4 donma-çözülme çevriminde ise 250 kPa'a yükseltirken, 8 donma-çözülme çevriminde ise yeniden 145 kPa değerine düşmüştür. Benzer durum % 20 eklenen C sınıfı uçucu külde de gerçekleşmiş olup 0 donma-çözülme çevriminde şişme basıncı 40 kPa'a düşerken donma-çözülme çevrimi arttıkça

hem 2 hem de 4 donma-çözülme çevriminde 120 kPa değerine yükselmiş, 8 donma-çözülme çevriminde ise tekrar 35 kPa değerine düşmüştür.

Serbest basınç dayanımında ise F sınıfı uçucu kül katkı oranı arttıkça serbest basınç dayanımı artmıştır. 28 gün kür süresinde katkı oranının % 10 olduğu durumdaki serbest basınç dayanımı, zeminin 1.54 katı iken % 20 katkıda 1.69 katına gelerek en yüksek değerine ulaşmıştır. % 30 uçucu kül katkısında da 1.61 katı olmuştur. Dayanım artışı 7 gün kür süresinde çoğunlukla tamamlanmış olup 28 gün kür süresinde önemli bir değişim olmamıştır. C sınıfı uçucu külde ise 7 gün kür süresinde % 10 katkıda dayanım 1.70 katına çıkarken % 30 katkıda 2.46 katına gelmiştir. 28 gün kür süresinde ise en yüksek dayanım % 30 uçucu kül katkıda katkısız zeminin 3.7 katına ulaşmıştır. Kireç katkısında ise % 4 katkıda 7 gün kür süresinde serbest basınç dayanımı, katkısız zeminin 1.14 katına çıkmış ve 28 gün kür süresinde 1.43 katına ulaşmıştır. % 8 katkıda 7 gün kür süresinde serbest basınç değeri katkısız zeminin 1.32 katına ve 28 gün kür süresinde 1.71 katına çıkmıştır. Kireç katkı oranı % 12 olduğunda ise dayanım 7 gün kür süresinde katkısız zeminin 1.50 katına ve 28 gün kür süresinde 1.79 katına çıkmıştır.

Jha ve Sivapullaiah (2017) tarafından yapılan çalışmada yüksek plastisiteli killi bir zemine farklı oranlarda (% 10, % 20 ve % 30) F sınıfı uçucu kül eklenmiştir. Daha sonra % 6 kireç katkısının sabit tutularak uçucu kül oranının % 10, % 20 ve % 30 olarak değiştirildiği uçucu kül-kireç kombinasyon katkıları hazırlanmıştır. Her karışım için dayanım deneyleri ve mikro analizler gerçekleştirilmiştir. Buna göre 7 gün kürü % 20 uçucu kül katkılı karışımda karışımın serbest basınç dayanımı katkısız zeminin 1.40 katı iken, kür süresinin 28'e çıkması ile dayanım değeri 7 günlük küre göre daha az olarak katkısız zeminin 1.10 katına inmiştir. 7 gün kürü % 30 katkılı karışımda karışımın serbest basınç dayanımı katkısız zeminin 1.50 katı iken, kür süresinin 28'e çıkması ile dayanım değeri 7 günlük küre göre daha az olarak katkısız zeminin 1.20 katına inmiştir. Aynı çalışmada % 6 kireç sabit tutulurken % 10, % 20 ve % 30 uçucu kül oranlarında serbest basınç deneyi yapılmıştır. Buna göre 7 gün kür süresinde % 30 uçucu kül ve % 6 kireç katkısı içeren karışımın dayanımı, kontrol zeminin 1.72 katı iken, kür süresinin 28 güne çıkması sonucunda oluşan dayanım zeminin 3.97 katına çıkmıştır. Ayrıca yapılan SEM analizinde % 30 uçucu kül katkılı karışımda 28 gün kür süresinde uçucu kül partikülleri arasında bağlantılar oluştuğu ve 90 günden sonra çimentolaşma matrislerinin gözüktüğü anlaşılmıştır. Partiküller arası çimentolaşma jelleri ise 360 günlük SEM görüntüsünde belirlemiştir. Ayrıca % 30 uçucu kül ve % 6 kireç ilavesi yapıldığı durumda çimentolaşma bileşenleri özellikle 180 gün kürden sonra kendisini daha çok belli etmeye başlamıştır.

Jafer vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada düşük plastisiteli (CL) bir zemine yüksek kalsiyum oksit (CaO) oranlı (% 66.12) uçucu külün değişik oranlarda (% 3, % 6, % 9, % 12 ve % 15) eklenmesiyle yapılan stabilizasyon sonunda numunelerin serbest basınç dayanımı değişimleri incelenmiştir. Buna göre kürsüz durumdaki CL zemine eklenen % 3 uçucu kül, kilin dayanımını kürsüz halde 1.3 katına çıkarmıştır. Daha fazla eklenen uçucu kül, dayanımı artırmaya devam etmiş ve en yüksek değerine % 9 katkılı karışımda ulaşılmıştır. Bu katkı oranında dayanım, zeminin 1.85 katı olmuştur. Daha fazla eklenen uçucu kül, dayanımı biraz azaltmış ve % 15 katkıda 1.75 kata kadar düşürmüştür. Kür süresinin 7 güne çıkması ile % 3 katkılı karışımın dayanımı zeminin 1.85 katına yükselmiştir. Bu kür süresi için de en yüksek dayanım % 12 katkılı karışımda, zeminin 2.85 katı olarak gerçekleşmiştir. Kür süresinin 28 güne çıkması ile dayanım artış hızlarında belirgin bir azalış olmakla birlikte % 3 katkılı karışımın dayanımı zeminin 2.25 katı olmuştur. En yüksek serbest basınç dayanımı ise yine % 12 katkılı karışımda elde edilmiş olup, serbest basınç dayanım artışı 3.45 katı düzeyinde gerçekleşmiştir.

Jha ve Sivapullaiah (2018), tarafından yapılan çalışmada F sınıfı uçucu kül, kireç-uçucu kül-kireç ve kireç-uçucu kül-jips katkıları yüksek plastisiteli killi (CH) zemine eklenmiştir. Sadece kireç içeren tek bir karışım olup katkı oranı % 6'dır. Yalnız uçucu kül içeren karışımların katkı oranları % 10, % 20 ve % 30 olarak seçilmiştir. Kireç + uçucu kül katkılarında ise % 6 kireç sabit olup üzerine % 10, % 20 ve % 30 uçucu kül eklenmiştir. Kireç + uçucu kül + jips içeren karışımlar ise iki farklı gruptadır. İlk grupta % 6 kireç ve % 1 jips içeren karışıma ayrıca zeminin ağırlığınca % 10, % 20 ve % 30 uçucu kül katkıları eklenmiştir. Diğer grupta ise % 6 kireç ve % 6 jips içeren karışıma ayrıca zeminin ağırlığınca % 10, % 20 ve % 30 oranında uçucu kül katkıları eklenmiştir. Bu kapsamda karışımlar üzerinde şişme deneyleri ve XRD analizleri yapılmıştır. CH zemine eklenen uçucu kül katkıları katkısız zeminin şişmesini azaltmıştır. Katkısız zeminin şişmesi % 4 iken, % 10 katkıda şişme % 2.60 değerine inmiştir. % 20 katkıda şişmede önemli bir değişim olmamış ve % 2.40 olarak bulunmuştur. En düşük şişme değeri % 30 uçucu kül katkılı karışımda % 1.45 olarak tespit edilmiştir. Uçucu kül ve kireç içeren karışımların hepsinde ise şişme değerleri neredeyse % 0 olup, benzer durum sadece % 6 kireç içeren karışımda da olmuştur. Aynı çalışmada uçucu küle eklenen jipsin de şişmeyi negatif yönde etkilediği tespit edilmiştir. Buna göre % 6 kireci sabit olan karışımlar incelendiğinde % 10 uçucu kül ve % 1 jipsli karışımın şişmesi % 2 civarında iken, jips oranının % 6'ya çıkması ile şişme % 7.5 düzeyine yükselmiştir. Uçucu kül oranı % 20 ve jips oranı % 1 iken şişme yine % 2 dolaylarında olup jipsin % 6'ya çıkması ile yaklaşık % 4.5 seviyesine gelmiştir. Mikro

analizler değerlendirildiğinde zemine eklenen % 6 kireç karışımı, numunede silika ve alumina hidratlı çimentolaşma bileşenlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bunun yanında kirece ilave olarak uçucu kül eklenmeye başladıktan sonra XRD analizlerinde CSH pikleri kaybolurken mullit piklerinde artış gözlenmiştir. Zemine (S) eklenen % 10 uçucu kül (FA) + % 6 kireç (L) ve % 1 jips (G) karışımında (S+10FA+6L+1G) etrenjit mineralinin pik değeri yüksek iken aynı karışımın % 6 jips içereninden daha az çimentolaşma bileşenine sahiptir. Ayrıca S+20FA+6L+1G karışımı ise S+10FA+6L+1G karışımına göre sadece % 10 daha fazla uçucu kül içermesine rağmen daha fazla etrenjit minerali ve çimentolaşma etkisi içermektedir. XRD analizinde ise S+20FA+6L+6G karışımında, artan çimentolaşma bileşenleri ile etrenjit minerali kaybolmuş ve jips ile mullit pikleri gözlenmiştir. Bu durumda montmorillonit pikleri de azalmış olup bu durum da zemin ve katkıları arasındaki iyonik değişimi göstermiştir. Ayrıca SEM görüntüsünden % 20 uçucu kül + % 6 kireç + % 6 jips içeren karışımın hem etrenjit mineralini azaltması hem de kompakte ve güçlü bir matris oluşturması açısından tüm karışımlar arasında optimum sonucu verdiği anlaşılmıştır.

Diallo ve Unsever (2019), tarafından yapılan çalışmada yüksek plastisiteli killi zemin % 25.23 oranında CaO içeren C sınıfı bir uçucu kül ve kireç ile karıştırılmıştır. Kireç katkı oranı % 2 olarak tercih edilmiştir. Ayrıca % 2 kireç içeren karışımlar üzerine eklenen uçucu kül katkı oranları ise % 5, % 10, % 15, % 20, % 25 ve % 30'dur. Kireç katkısı, zeminin plastisite indeksini 22.70'den 13.68'e düşürmüştür. Zemine kirece ek olarak eklenen % 15 uçucu kül katkısı zeminin plastisite indeksi değerini 3.82'ye getirmiştir. Likit limit ise zemin ve katkılı karışımlar için 48.32 ve 51.80 arasında olup önemli bir değişime uğramazken, plastik limit değerlerinde artış görülmüştür. Zemin ve karışımları üzerinde serbest basınç dayanımı deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde kür süresi olarak 3, 7 ve 28 gün tercih edilmiştir. Buna göre zeminin serbest basınç dayanımı 7 ve 28 gün kür süresinde neredeyse hiç değişmemiş ve 1.02 katına çıkmıştır. Zemine eklenen % 2 kireç katkısı, serbest basınç dayanımını 7 ve 28 gün kür süresinde dayanımı sırasıyla 4.24 ve 4.27 katına çıkarmıştır. % 2 kireç içeren karışımlar üzerine uçucu kül eklendikçe serbest basınç dayanımı değerleri % 25 uçucu kül katkısına kadar önemli miktarda artış göstermiştir. Buna göre % 2 kireç ve % 25 uçucu kül içeren bir karışımın 7 ve 28 gün kür süresindeki serbest basınç dayanımları zeminin sırasıyla 20.27 ve 34.20 katına ulaşmıştır.

Yılmaz vd. (2019), tarafından yapılan çalışmada F sınıfı ve C sınıfı uçucu külün düşük plastisiteli killi zeminin serbest basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. Uçucu kül katkı

oranları % 5, % 10 ve % 20 olarak tercih edilmiştir. Serbest basınç dayanımı deneyi için kullanılan kür süresi ise 1 ve 28 gündür. Kür süresi 1 olduğu durumda % 1.5 oranında CaO içeren F sınıfı uçucu kül, serbest basınç dayanımında değişime yol açmamıştır. 28 gün kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı değerleri % 5, % 10 ve % 20 uçucu kül katkılı karışımlarda zeminin sırasıyla 0.95, 1.05 ve 1.20 katı olmuştur. Kür süresi 1 olduğu durumda % 11.8 oranında CaO içeren F sınıfı uçucu kül, serbest basınç dayanımını değiştirmemiştir. 28 gün kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı değerleri % 5, % 10 ve % 20 uçucu kül katkılı karışımlarda zeminin sırasıyla 1.33, 1.67 ve 3.00 katı olmuştur. F sınıfı uçucu küllerin tamamı değerlendirildiğinde 28 gün kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımlarının zeminin % 5 katkılı karışımlarda 0.95 ile 1.25 kat, % 10 katkılı karışımlarda 1.05 ile 1.50 kat ve % 20 katkılı karışımlarda 1.20 ile 4.00 katı arasında olduğu belirlenmiştir. C sınıfı uçucu küllerde ise aynı kür süresinde % 5, % 10 ve % 20 uçucu kül katkılı karışımlarda elde edilen serbest basınç dayanımları zeminin % 5 katkıda 1.25-2.50 katı, % 10 katkıda 2.00-6.00 katı ve % 20 katkıda 3.50 ile 11.00 katı arasında olmuştur. Uçucu küldeki CaO ve SiO<sub>2</sub> miktarı arttıkça, serbest basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir.

Mahedi vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada yüksek plastisiteli killi zeminler üzerine çimento, uçucu kül ve kireç eklenmiştir. Numunelerin 7, 28 ve 90 gün kürlü durumlarında serbest basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda mikro yapının değerlendirilmesi amacıyla X Işınlı Kırınımı (XRD) ve X Işınlı Floresansı (XRF) analizleri yapılmıştır. Zemine eklenen % 3, % 5 ve % 7 kireç, likit limiti 74'ten sırasıyla 48, 42 ve 41'e, plastisite indeksini ise 48'den 8, 6 ve 3'e düşürmüştür. % 5, 10 ve % 20 uçucu kül katkıları ise likit limiti 74'ten sırasıyla 52, 56 ve 50'ye, plastisite indeksini ise 48'den 32, 19 ve 18'e düşürmüştür. Zemine eklenen % 3, % 5 ve % 7 kireç, 7 gün kür süresinde zeminin serbest basınç dayanımını sırasıyla 4.25, 4.00 ve 3.88 katına, 28 günde ise 5.50, 6.25 ve 6.00 katına çıkarmıştır. Uçucu kül katkısı kür zeminin serbest basınç dayanımını % 5, % 10 ve % 20 katkı oranları için sırasıyla 7 gün kür süresinde 3.25, 3.12 ve 2.50 katına, 28 günde ise 3.50, 3.25 ve 3.12 katına çıkarmıştır. Farklı kür süreleri için yapılan serbest basınç deneylerine göre XRF analizleri ışığı altında yapılan değerlendirmede yüksek plastisiteli killi zeminlerin stabilizasyonunda CaO miktarı açısından % 10-12 aralığı optimum olmuştur.

Turan vd. (2020), tarafından yapılan çalışmada orta plastisiteli killi zemin % 32.4 oranında CaO içeren C sınıfı bir uçucu kül ile karıştırılmıştır. Uçucu kül katkı oranları sırasıyla % 5, % 10, % 15, % 20, % 25 ve % 30'dur. Gerçekleştirilen serbest basınç deneyinde kür süresi olarak 1, 7 ve

28 gün tercih edilmiştir. Zeminin serbest basınç dayanımı 1 gün kürlü durumda 226 kPa'dır. Kür süresi arttıkça dayanımda önemli bir değişim olmamıştır. 7 ve 28 gün kür sürelerinde elde edilen serbest basınç dayanımı başlangıcın (1 gün kürlü duruma göre) sırasıyla 1.08 ve 1.04 katı olmuştur. Eklenen uçucu kül katkısı ile serbest basınç dayanımı değerlerinde artış olmuştur. En yüksek değerler, % 25 uçucu kül katkılı karışımda elde edilmiştir. 7 ve 28 gün kür süresinde ilgili katkı oranı için elde edilen serbest basınç dayanımı başlangıcın sırasıyla 2.29 ve 2.65 katı olarak bulunmuştur. % 20 ve % 30 uçucu kül katkılarında elde edilen serbest basınç dayanım değerleri 7 gün kürlü durumda zeminin sırasıyla 2.17 ve 1.96 katı iken 28 gün kürde ise 2.63 ve 2.15 katı olmuştur.

Deepak vd. (2021), tarafından yapılan çalışmada yüksek plastisiteli killi bir zemin C sınıfı uçucu kül, F sınıfı uçucu kül ve kireç ile karıştırılmıştır. Uçucu kül katkı oranları her iki sınıf için de % 1, % 3 ve % 5'tir. Kireç ise % 2 ve % 4 oranında kullanılmıştır. F sınıfı uçucu kül eklendikçe likit limit 62'den 67'e yükselmiş ve plastisite indeksi de 32'den 37'ye çıkmıştır. % 4 oranında eklenen kireç ise likit limiti 62'den 50'ye, plastisite indeksini de 32'den 24'ee düşürmüştür. % 4 kireç ve % 5 uçucu kül içeren karışımın likit limiti 20 ve plastisite indeksi ise 6 olarak tespit edilmiş ve karışımlar arasında en düşük likit limit ve plastisite indeksi değerleri olmuştur. Zemine eklenen C sınıfı uçucu kül ise likit limit ve plastisite indeksi değerlerinde neredeyse hiç değişikliğe yol açmamıştır. F sınıfı uçucu kül ve kireç karışımlarına benzer şekilde kireç ve uçucu kül eklendikçe likit limit ve plastisite indeksi değerlerinde azalmalar gözlenmiştir. Karışımlar üzerinde 0, 3, 7 ve 28 gün kür sürelerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Buna göre zemine eklenen % 5 F sınıfı uçucu kül, kilin serbest basınç dayanımını tüm kür sürelerinde neredeyse hiç değiştirmemiştir. Uçucu küle kireç de eklendiğinde serbest basınç dayanımı değerleri önemli miktarda artmıştır. En yüksek serbest basınç dayanımları % 4 kireç ve % 5 F sınıfı uçucu kül içeren karışımlarda tespit edilmiştir. İlgili karışımın 7 ve 28 gün kür süresindeki serbest basınç dayanımı zeminin sırasıyla 3.00 ve 4.00 katı olmuştur. C sınıfı uçucu kül ve kireç içeren karışımlarda da en yüksek dayanım % 4 kireç ve % 5 uçucu kül içeren karışımda elde edilmiştir. Bahsedilen karışıma ait 7 ve 28 gün kürlü serbest basınç dayanımları zeminin sırasıyla 3.50 ve 4.50 katı olarak bulunmuştur.



## BÖLÜM 3

### MATERYAL VE METOT

#### 3.1 MATERYAL

Bu tez çalışmasında, Çaytaş Ateş Tuğla A.Ş. (Zonguldak) refrakter kili (S) ve Çanbensan A.Ş. (Çankırı) bentonit kili (B) zemin numunesi olarak kullanılmıştır. Refrakter kili (S), düşük plastisiteli olup tamamı 200 nolu elekten geçen bir malzemedir. Çanbensan bentonit kili (B) ise % 60'tan fazla montmorillonit içeren, yüksek plastisiteli ve tamamı 200 nolu elekten geçen ince daneli bir malzemedir. Bu zeminlerin seçilmesindeki ana amaç, ticari satılan bu malzemelerin homojen olmasıdır. Böylelikle, laboratuvarında imal edilecek numunelerin yapısal olarak birbirlerinin aynı olması sağlanmıştır.

Uçucu kül ile zeminin stabilize edilmesi bu tez çalışmasının başlığını oluşturmaktadır. Bundan dolayı, Zonguldak bölgesinde bulunan iki adet termik santralden biri olan Eren Enerji termik santralinden F tipi uçucu kül malzemesi elde edilmiştir. S ve B tipi zeminler, literatür çalışmalarına uygun olarak bu malzeme ile belirli oranlarda (% 5, % 10, % 15, % 20 ve % 30) karıştırılarak stabilize edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen bu karışımların indeks deneyleri yapılarak temel malzeme parametreleri tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan sonra dayanım deneylerine geçilmiş ve stabilizasyonun performansı ölçülmüştür. Çalışmada bir atık malzeme olan uçucu külün yüksek miktarda kullanımı ana amaçtır. Önceki çalışmaların ve laboratuvarında yapılan ön deneylerin de ışığı altında % 30 uçucu kül içeren karışımlar üzerine belirli miktarlarda (% 3, % 5 ve % 7) kireç eklenerek performanslarının artırılması düşünülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan zeminlerin, uçucu külün, sönmüş kirecin ve değişik oranlarda oluşturulmuş karışımların her birinin malzeme tanımlamaları yapılmış ve indeks özellikleri belirlenmiştir. Bu karışımların her birine Çizelge 3.1'de gösterilen kodlar verilmiştir. Malzeme tanımlamaları ve deney sonuçları bu kodlara göre sunulacaktır.

**Çizelge 3.1** Tez çalışmasında kullanılan zemin karışımlarının kodları ve açıklaması.

Karışım Kodu	Karışım Detayı	Karışım Kodu	Karışım Detayı
FA	Uçucu Kül	L	Kireç
S	(Zemin 1) = (CL)	B	(Zemin 2) = (CH)
S3L	CL + % 3 Kireç	B3L	CH + % 3 Kireç
S5L	CL + % 5 Kireç	B5L	CH + % 5 Kireç
S7L	CL + % 7 Kireç	B7L	CH + % 7 Kireç
S5FA	CL + % 5 Uçucu Kül	B5FA	CH + % 5 Uçucu Kül
S10FA	CL + % 10 Uçucu Kül	B10FA	CH + % 10 Uçucu Kül
S15FA	CL + % 15 Uçucu Kül	B15FA	CH + % 15 Uçucu Kül
S20FA	CL + % 20 Uçucu Kül	B20FA	CH + % 20 Uçucu Kül
S30FA	CL + % 30 Uçucu Kül	B30FA	CH + % 30 Uçucu Kül
S30FA3L	CL + % 30 Uçucu Kül + % 3 Kireç	B30FA3L	CH + % 30 Uçucu Kül + % 3 Kireç
S30FA5L	CL + % 30 Uçucu Kül + % 5 Kireç	B30FA5L	CH + % 30 Uçucu Kül + % 5 Kireç
S30FA7L	CL + % 30 Uçucu Kül + % 7 Kireç	B30FA7L	CH + % 30 Uçucu Kül + % 7 Kireç

Karışımlardan 5 tanesi sadece kil + uçucu kül, 3 tanesi sadece kil + kireç ve 3 tanesi de kil + kül + kireç içermekte olup zemin numunesinin de kontrol numunesi olduğu hesaba katıldığında her bir zemin grubu için 12 karışımdan toplamda 24 karışım üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Eklenen katkıların karışımdaki miktarları belirlenirken zeminin kuru kütlelerinin yüzdesi dikkate alınmıştır. Dolayısı ile S30FA3L kodlu bir karışımda 100 gram kil zemin numunesi kullanıldığında üzerine 30 gram uçucu kül ve 3 gram kireç ilave edilerek toplam 133 gram kütleyle sahip bir karışımdan bahsedilmiştir. Alt bölümlerde ise bu bölümde tanıtılan zemin, kireç ve uçucu küllere ait bilgiler verilmiştir.

### 3.1.1 Zeminlerin ve Katkıların İndeks Özellikleri

Tez çalışmasında kullanılan malzemelere ait öncelikle indeks deneyleri yapılmıştır. S ve B zeminler ile diğer karışımlar üzerinde özgül ağırlık, hidrometre, likit limit, plastik limit ve

standart kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Uçucu kül üzerinde de ayrıca hidrometre deneyi gerçekleştirilmiştir.

### 3.1.1.1 Özgül Ağırlık Deneyleri

Düşük plastisiteli kil zemin (S) ve yüksek plastisiteli kil zemin (B) ile karışımlarına ait özgül ağırlık deney sonuçları Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

**Çizelge 3.2** S ve B zeminler ile karışımlarına ait özgül ağırlık sonuçları.

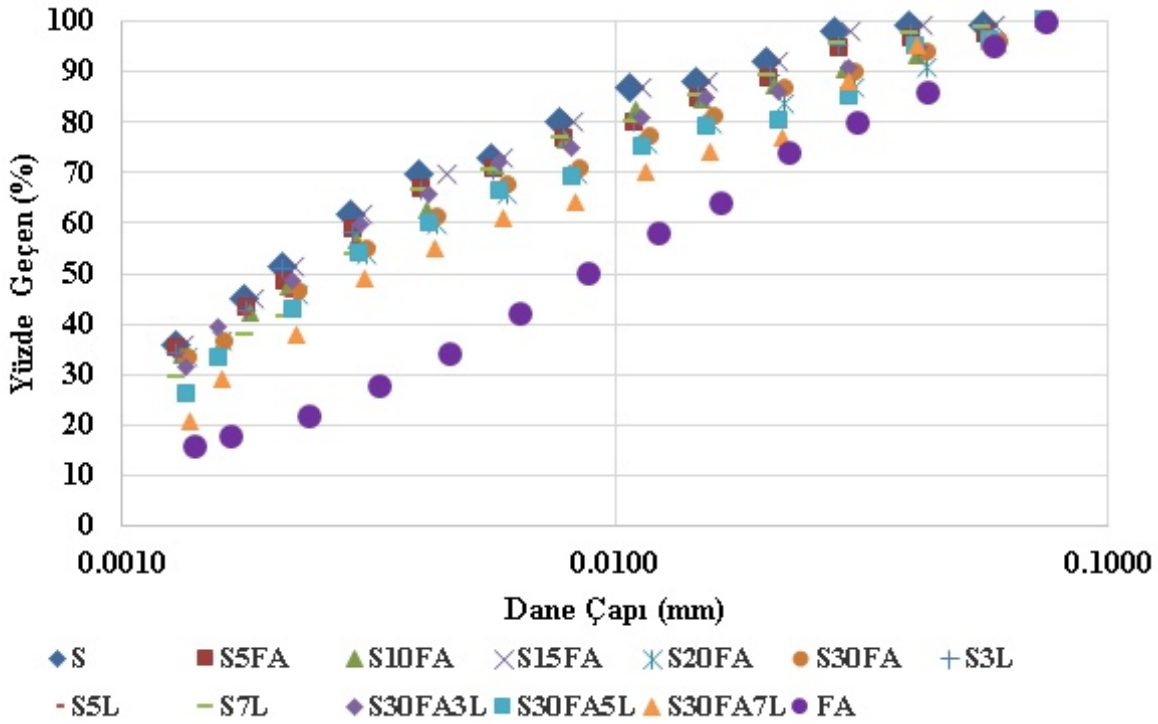
Karışım	G <sub>s</sub>	Karışım	G <sub>s</sub>
S	2.63	B	2.65
S5FA	2.61	B5FA	2.63
S10FA	2.59	B10FA	2.60
S15FA	2.53	B15FA	2.58
S20FA	2.51	B20FA	2.54
S30FA	2.49	B30FA	2.50
S3L	2.66	B3L	2.67
S5L	2.68	B5L	2.68
S7L	2.69	B7L	2.67
S30FA3L	2.52	B30FA3L	2.53
S30FA5L	2.55	B30FA5L	2.56
S30FA7L	2.56	B30FA7L	2.60

Elde edilen sonuçlara göre artan uçucu kül oranı ile özgül ağırlık değeri azalan bir eğilimde olmasına rağmen sayısal olarak büyük bir değişime uğramamıştır. En yüksek azalış hem S hem de B zemine ait % 30 uçucu kül katkılı karışımlarda sırasıyla % 5.32 ve % 5.66 olarak gerçekleşmiştir. Uçucu külün özgül ağırlığının düşük olması bu azalmaya yol açmıştır. Zeminlere eklenen kireç karışımları ise B zeminde özgül ağırlık değerlerinde ufak değişikliklere yol açmıştır. En büyük artış B5L karışımında % 1.13 düzeyinde olmuştur. S zemine eklenen kireç de özgül ağırlık değerini önemli oranda değiştirmese de B zemine göre artış daha fazla olmuştur. Buna göre en büyük değişim S7L kodlu karışımda gerçekleşmiştir. İlgili karışımın özgül ağırlık değeri zemine göre % 2.28 daha fazladır. Hem uçucu kül hem kireç içeren karışımlarda ise önce özgül ağırlık değeri artmış ancak daha sonra kireç ilavesi oldukça

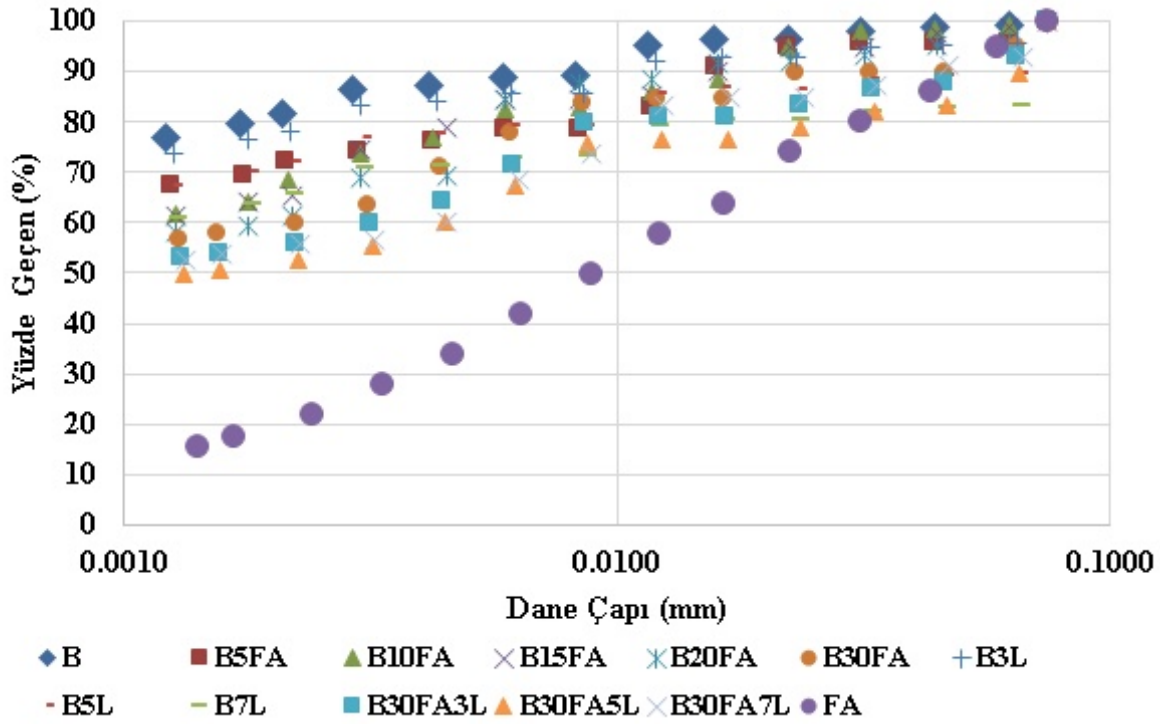
yükseliş gerçekleşmiştir. S30FA3L ve B30FA3L karışımları sırasıyla S ve B zeminin özgül ağırlık değerlerinde % 4.18 ve % 4.52 oranında azalmaya yol açmıştır. Uçucu kül ve kireç içeren karışımlarda katkılar arasında eklenen miktar olarak uçucu kül kireçten daha fazla olduğu için özgül ağırlık değeri üzerinde daha etkili olmuştur. Kireç oranlarının % 7'ye yükseldiği S30FA7L ve B30FA7L karışımlarına ait özgül ağırlık değerleri ise kendi zeminlerine göre % 2.66 ve % 1.89 daha azdır.

### 3.1.1.2 Hidrometre Deneyleri

Düşük plastisiteli kil zemin (S), yüksek plastisiteli kil zemin (B) ve karışımları ile uçucu külün dane çapı dağılımları hidrometre deneyi ile elde edilmiştir. Şekil 3.1'de S zemin ve karışımları ile uçucu küle ait gradasyon eğrileri; Şekil 3.2'de ise B zemin ve karışımları ile uçucu külün gradasyon eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.1 S zemin ve karışımları ile uçucu küle ait gradasyon eğrileri.



Şekil 3.2 B zemin ve karışımları ile uçucu küle ait gradasyon eğrileri.

Şekil 3.1 ve 3.2'deki gradasyon eğrileri dikkate alınarak kil yüzdeleri (< 0.002 mm) ve silt yüzdeleri (0.002 mm'den büyük ve 0.075 mm'den küçük) belirlenmiştir. Bu değerler ise Çizelge 3.3'te sunulmuştur.

Çizelge 3.3 S ve B zeminler ile karışımlarına ait hidrometre deney sonuçları.

Karışım	Kil (%)	Silt (%)	Karışım	Kil (%)	Silt (%)
S	48.67	51.33	B	81.17	18.83
S5FA	46.94	53.06	B5FA	71.28	28.72
S10FA	45.92	54.08	B10FA	67.46	32.54
S15FA	44.74	55.26	B15FA	65.06	34.94
S20FA	44.26	55.74	B20FA	61.09	38.91
S30FA	42.30	57.70	B30FA	59.31	40.69
S3L	48.50	51.50	B3L	77.82	22.18
S5L	44.43	55.57	B5L	71.54	28.46
S7L	41.50	58.50	B7L	65.26	34.74
S30FA3L	47.20	52.80	B30FA3L	55.63	44.37
S30FA5L	41.35	58.65	B30FA5L	52.20	47.80
S30FA7L	36.50	63.50	B30FA7L	48.13	51.87

Elde edilen sonuçlara göre artan uçucu kül oranı ile hem S zeminin hem de B zeminin kil miktarları azalırken, silt miktarları artış göstermiştir. Bu durum, uçucu külün daha çok silt danesi içermesinden dolayı beklenen bir sonuç olarak göze çarpmaktadır. S zeminde silt miktarı % 51.33 iken % 30 katkıli karışımda % 57.70'e yükselmiştir. Benzer şekilde B zemininde ise silt miktarı % 18.33 iken, B30FA kodlu karışımda önemli oranda artarak % 40.69 seviyesine gelmiştir. Her iki zemine eklenen kireç, hem S hem de B zeminin silt miktarlarında artışa yol açmıştır. S7L kodlu karışımda silt miktarı % 58.50'ye ve B7L kodlu karışımda % 34.74'e yükselmiştir. Hem uçucu kül hem de kireç içeren karışımlarda da benzer durum gözlenmiştir. S ve B zeminin % 30 uçucu kül ve % 7 kireç içeren karışımlarındaki silt miktarları sırasıyla % 63.50 ve % 51.87 olmuştur.

### 3.1.1.3 Kıvam Limitleri Deneyleri

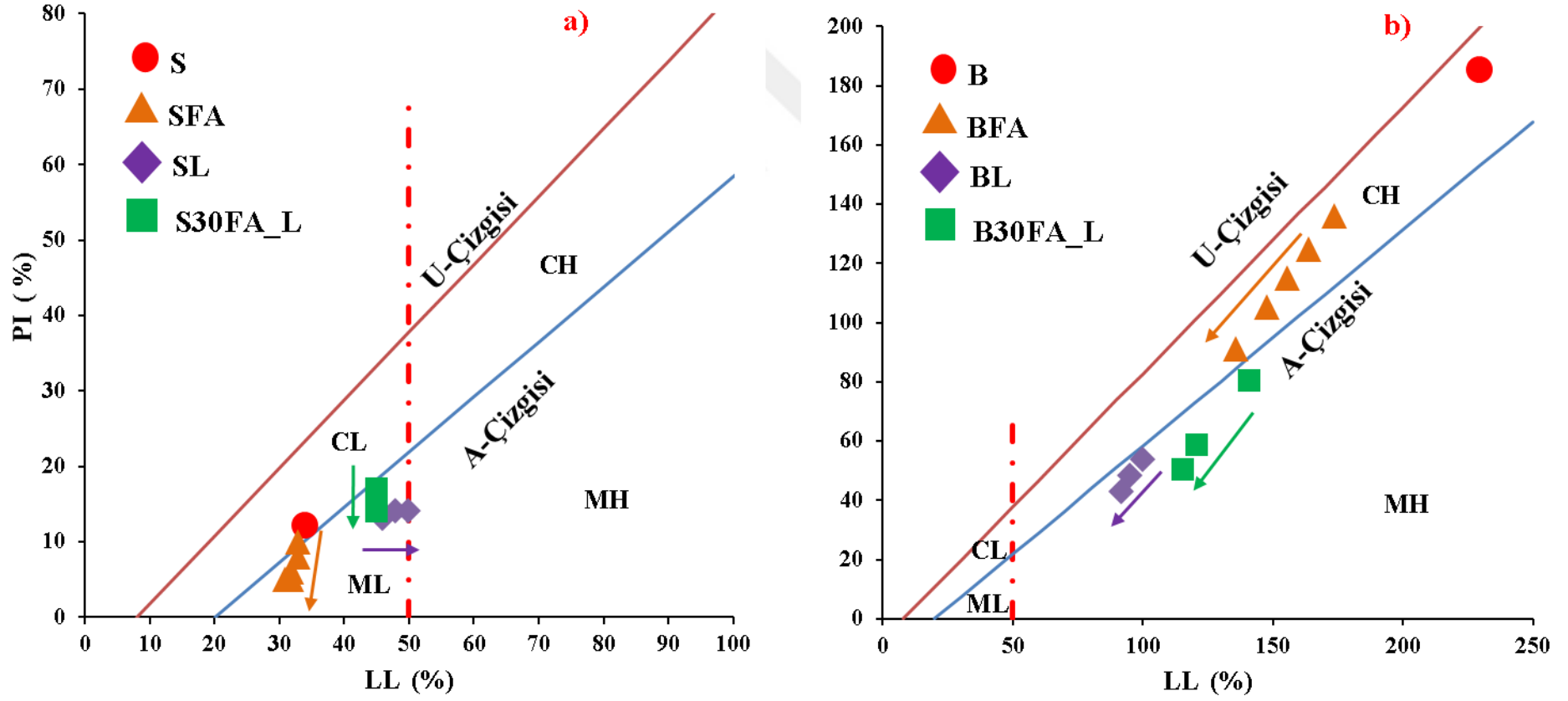
S ve B zeminler ile karışımlarına ait likit limit ve plastik limit sonuçlarının değerlendirildiği bu bölümde karışım ve zeminlerin plastisite kartındaki yerleri tespit edilerek hem USCS'ye hem de TS 1500 (2000) standardına göre sınıflandırılmışlardır. Buna göre Çizelge 3.4'te tüm zemin ve karışımlarına ait likit limit ve plastik limit sonuçları sunulmuştur.

**Çizelge 3.4** S ve B zeminler ile karışımlarına ait kıvam limitleri deney sonuçları.

Karışım	LL	PL	PI	USCS	TS	Karışım	LL	PL	PI	USCS	TS
S	34	22	12	CL	CL	B	230	45	185	CH	CH
S5FA	33	23	10	CL	CL	B5FA	174	38	136	CH	CH
S10FA	33	25	8	ML	ML	B10FA	164	39	125	CH	CH
S15FA	32	26	6	ML	ML	B15FA	156	41	115	CH	CH
S20FA	32	26	5	ML	ML	B20FA	148	43	105	CH	CH
S30FA	31	26	5	ML	ML	B30FA	136	45	91	CH	CH
S3L	46	33	13	ML	MI	B3L	100	46	54	MH	MH
S5L	50	36	14	ML	MH	B5L	95	47	48	MH	MH
S7L	48	34	14	ML	MI	B7L	92	49	43	MH	MH
S30FA3L	45	28	17	ML	MI	B30FA3L	141	60	81	MH	MH
S30FA5L	45	30	15	ML	MI	B30FA5L	121	62	59	MH	MH
S30FA7L	45	31	14	ML	MI	B30FA7L	115	65	50	MH	MH

Çizelge 3.4'te de görüldüğü gibi S zemine eklenen uçucu kül, zeminin likit limitinde bir miktar azalmaya yol açsa da önemli bir değişime yol açmamıştır. En düşük değeri S30FA kodlu karışımda 31 olup zemine göre % 8.82 azalmıştır. B zemine eklenen uçucu kül ise zeminin likit limitini gözle görülür şekilde düşürmüştür. Bu duruma uçucu külün yoğunluğunun düşük olması neden olmuştur. B5FA kodlu karışımın likit limiti 174 olup, B zemine göre % 24.35 daha düşüktür. En düşük likit limit değeri B30FA kodlu karışımda 136 olarak bulunmuş olup bu değer B zeminin likit limitinden % 40.87 daha düşüktür. Kireç katkılı karışımlarda ise % 3 kireç katkısı S zeminin likit limitini 34'ten 46'ya çıkartarak % 35.29 yükseltmiştir. Daha fazla eklenen kireç, likit limiti çok değiştirmemiş, S5L karışımında likit limit 50'ye yükselmiş (zemine göre % 47.06 artış) ve S7L kodlu karışımında 48'e gelmiştir. Düşük plastisiteli killerde eklenen % 3 kirecin zeminin likit limitini artırmasının nedeni ise kil partikül yüzeylerinin çekimini (affinity) değiştiren hidroksil iyonlarının etkisinden kaynaklanmaktadır. Düşük plastisiteli killerde geçerli bu kimyasal değişim, yüksek plastisiteli killerde gözlenmeyebilmektedir (Bell 1996). Yüksek plastisiteli killerde uçucu külün plastisite indeksini azaltması zemindeki kil boyutundaki partiküller ile uçucu küldeki silt partiküllerinin yer değiştirerek matrisin gradasyonunu değiştirmesidir (Jha 2017). Yüksek plastisiteli killerde uçucu kül ve kireç eklendikçe likit limit ve plastisite indeksinin azalması ise bu kimyasal katkıların kildeki kolloidleri sarması (encapsulate) olduğu bildirilmektedir (Dayioğlu 2017). Uçucu kül ve kireç içeren karışımlarda görünen sonuçlara; boşluk suyundaki elektrolit konsantrasyonunun artması ile birlikte dağınık çift tabakanın azalması ve kirecin kil partiküllerini folüküle etmesi sebep olmuştur (Jha 2017).

Likit limiti ve plastik limiti belirlenen zemin ve karışımlarının USCS'ye göre hangi zemin sınıfına girdiklerinin belirlenmesi amacıyla tüm zemin ve karışımlarına ait likit limit ve plastisite indeksi değerleri Şekil 3.3'de verilen plastisite kartı üzerinde işaretlenmiştir. Şekil 3.3'de gösterilen plastisite kartının üzerindeki zeminler ve karışımları için BFA ve SFA; zemin + uçucu kül karışımlarını, BL ve SL olanlar zemin + kireç karışımlarını temsil etmektedir. B30FA\_L ve S30FA\_L olanlar ise zemin + % 30 uçucu kül + kireç karışımlarıdır. Şekil üzerindeki oklar ise artan katkı içeriğini göstermektedir.



Şekil 3.3 Plastisite kartında zeminler ile karışımların yeri a) S zemin b) B zemin.

Bu bilgiler dikkate alınarak yapılan değerlendirmeye göre, S zemine eklenen uçucu kl katkısı zeminin likit limit ve plastisite indeksinde azalmaya sebebiyet vermiştir. S zemin ve S5FA karışımı hem USCS'ye hem de TS 1500 (2000) standardına göre **CL** zemin sınıfına girmektedirler. S10FA, S15FA, S20FA ve S30FA karışımları A-ęizgisinin hemen altında yer alarak aynı sınıflandırma sistemlerine göre **ML** olarak sınıflandırılmıştır. Aynı zemine eklenen kireç katkısı zeminin likit limitini artırırken, plastisite indeksini fazla değiştirmemiştir. Kireç katkısı ile zemin sınıfları S3L, S5L ve S7L sınıfları USCS standardı için **ML** olarak tespit edilmiştir. S3L, S5L ve S7L karışımları TS 1500 (2000) standardına göre yapılan değerlendirmeye göre ise sırasıyla **MI**, **MH** ve **MI** olarak sınıflandırılmıştır.

Benzer durum, % 30 uçucu kl ve kireç katkısı içeren karışımda da mevcuttur. S30FA3L, S30FA5L ve S30FA7L kodlu karışımlarının hepsi USCS'ye göre **ML**; TS 1500 (2000) standardına göre ise **MI** olarak sınıflandırılmıştır.

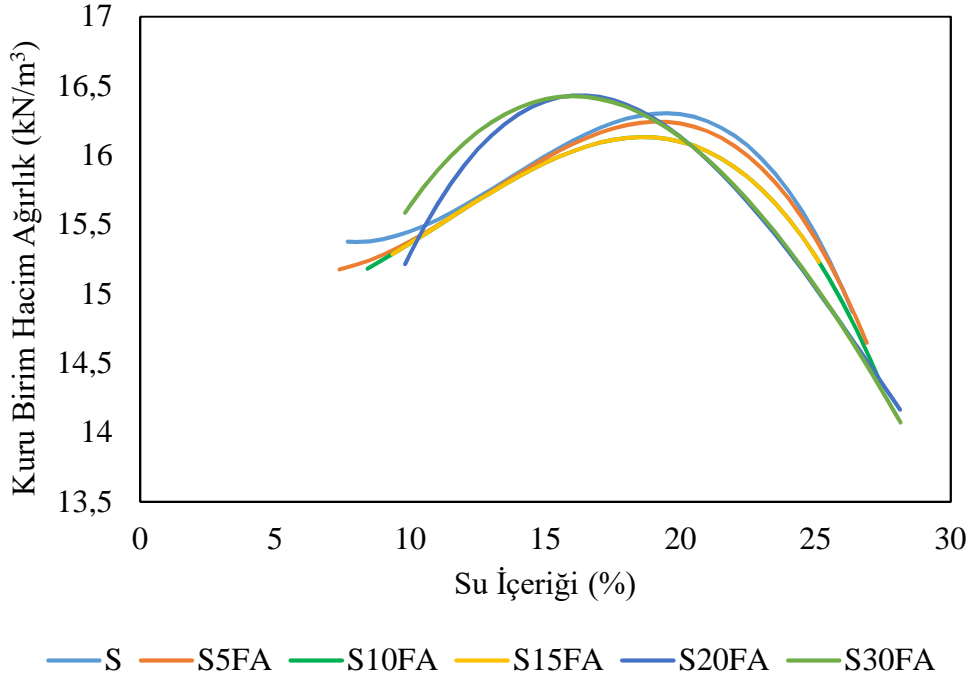
B zemine eklenen uçucu kl katkısı da zeminin likit limit ve plastisite indeksini azaltmıştır. B zemin ve uçucu kül katkılı karışımları hem USCS'ye hem de TS 1500 (2000) standardına göre **CH** zemin sınıfına girmektedirler. Aynı zemine eklenen kireç katkısı da zeminin likit limit ve plastisite indeksini azaltmıştır. Kireç katkısı ile zemin sınıfları B3L, B5L ve B7L sınıfları, hem USCS hem TS 1500 (2000) standardına göre **MH** olarak belirlenmiştir. Benzer durum, % 30 uçucu kl ve kireç katkısı içeren karışımda da mevcuttur. B30FA3L, B30FA5L ve B30FA7L kodlu karışımların hepsi de aynı standartlar için **MH** zemin olarak sınıflandırılmıştır.

#### **3.1.1.4 Standart Kompaksiyon Deneyleri**

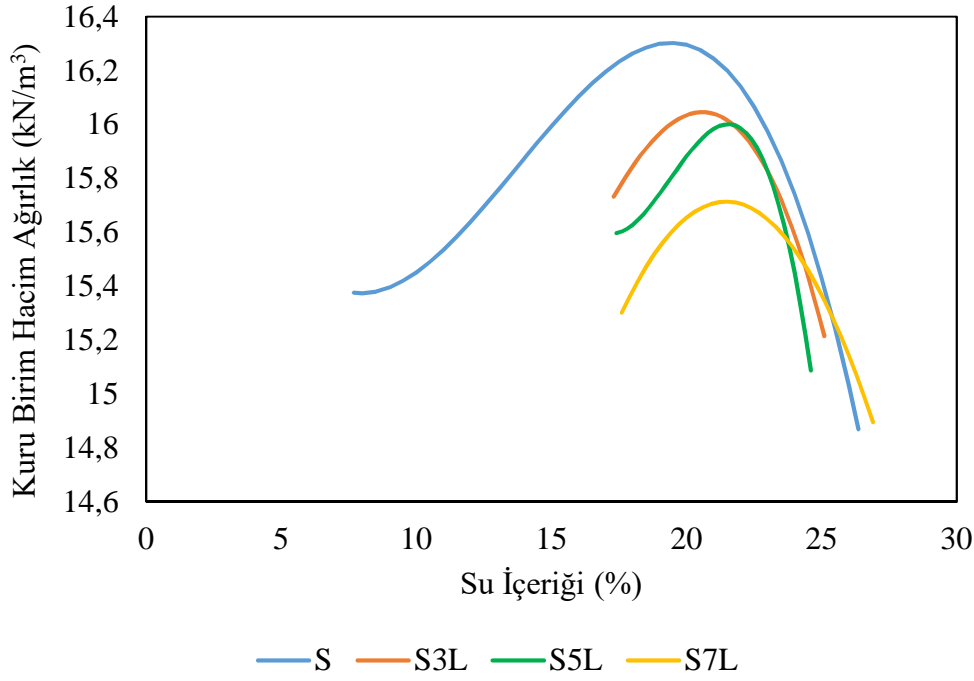
Bu alt bölümde S ve B zeminler ile karışımlarına ait standart kompaksiyon deneyleri irdelenmiştir. S zemini ve karışımlarının kompaksiyon deney grafikleri Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6'da verilmiştir. S zeminin  $w_{opt}$  değeri % 19.42'dir. Şekil 3.4'de görüldüğü üzere artan uçucu kl katkısı ile optimum su iğeriği ( $w_{opt}$ ) % 19.42'den % 15.99'a düşmüştür. Optimum su iğeriğinde % 20 katkıya kadar önemli bir değişim olmaz iken % 20 katkıdan sonra  $w_{opt}$  değerindeki azalmalar belirginleşmeye başlamıştır. Maksimum kuru birim hacim ağırlıkta ise artan uçucu kl katkısı ile hemen hemen hiğbir değişim gözlenmemiştir (değişim  $\pm$  % 1 düzeyinde).

Zemine sadece kireç eklenmesinin S zeminin kompaksiyon davranışına etkisi Şekil 3.5'de incelenmiştir. Buna göre kireç eklendikęe  $\gamma_{kmax}$  değerlerinde azalma,  $w_{opt}$  değerlerinde ise artış

gözlenmiştir. Katkısız zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ( $\gamma_{kmax}$ ) değeri 16.30  $kN/m^3$  iken, zemine eklenen % 3 oranında kireç  $\gamma_{kmax}$  değerini neredeyse hiç değiştirmeyerek (%1.58 azalış) 16.05  $kN/m^3$  değerine getirmiştir. Daha fazla eklenen kireç katkısı ile  $\gamma_{kmax}$  değerlerinde bir miktar azalma meydana gelmiştir. En yüksek azalış S7L kodlu karışımda % 3.61 oranında gerçekleşmiştir. İlgili karışımın  $\gamma_{kmax}$  değeri ise 15.71  $kN/m^3$  olarak bulunmuştur.



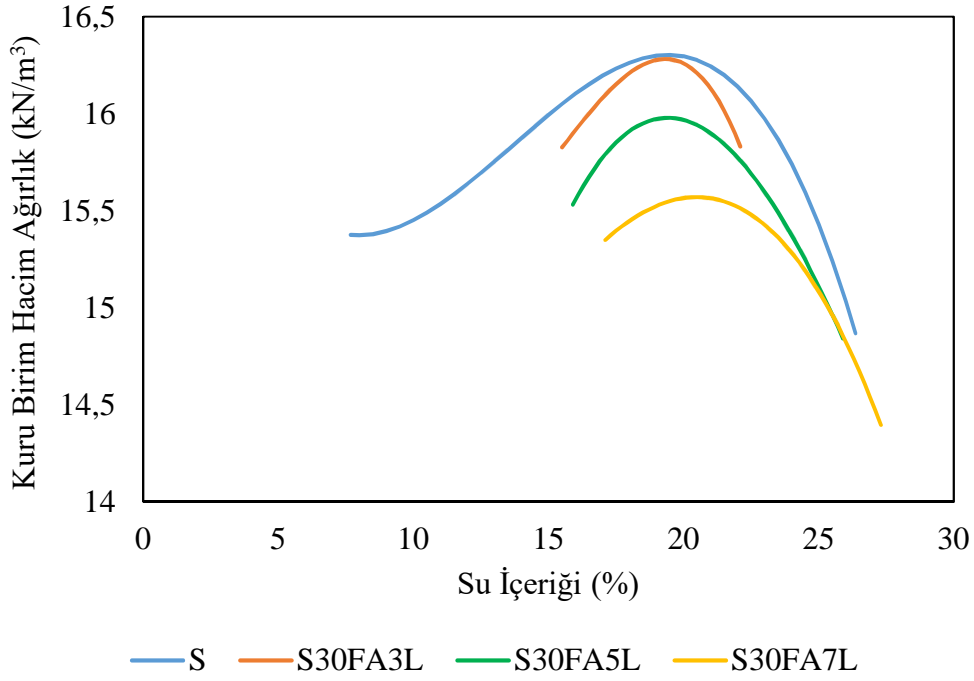
Şekil 3.4 Uçucu kül katkısının S zeminin kompaksiyon karakteristiğine etkisi.



**Şekil 3.5** Kireç katkısının S zeminin kompaksiyon karakteristiğine etkisi.

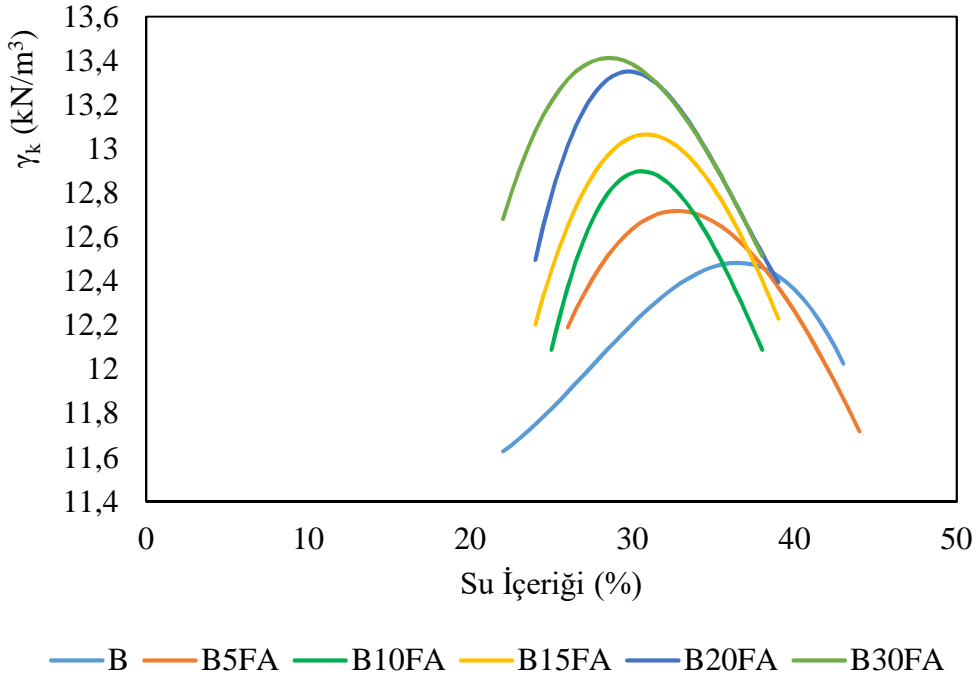
Eklenen kireç katkısı ile S zeminin % 19.42 olan  $w_{opt}$  değerlerinde artış meydana gelmiştir. En yüksek artış S5L kodlu karışımda gerçekleşmiş olup ilgili karışıma ait  $w_{opt}$  değeri % 21.54 olarak bulunmuştur. S7L kodlu karışımın  $w_{opt}$  değeri S5L kodlu karışıma göre bir miktar azalmış olsa bile katkısız zemine göre daha yüksek bir değerdedir.

S zemine hem kireç hem de uçucu kül eklendiğinde Şekil 3.6'da görüldüğü gibi  $\gamma_{kmaks}$  değerlerinde azalma,  $w_{opt}$  değerlerinde ise bir miktar artış gözlenmiştir. Eklenen daha fazla kireç katkısı ile  $\gamma_{kmaks}$  değerlerinde bir miktar azalma meydana gelmiştir. En yüksek azalış S30FA7L kodlu karışımda % 4.49 oranında gerçekleşmiştir. İlgili karışımın  $\gamma_{kmaks}$  değeri ise 15.57 kN/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Eklenen kireç katkısı ile  $w_{opt}$  değerlerinde artış meydana gelmiştir. En yüksek artış S30FA7L kodlu karışımda gerçekleşmiş olup ilgili karışıma ait  $w_{opt}$  değeri % 20.49 olarak bulunmuştur. Diğer karışımlarda ise önemli bir değişme olmamakla birlikte S30FA3L ve S30FA5L karışımlarında  $w_{opt}$  değerleri sırasıyla % 19.32 ve % 19.41 olmuştur.



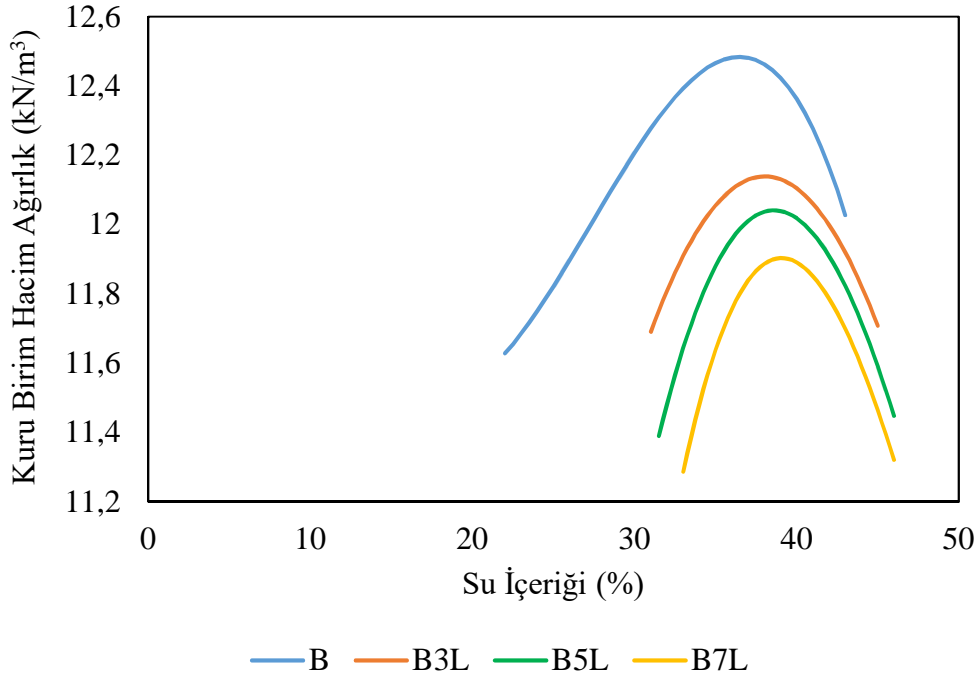
**Şekil 3.6** % 30 sabit uçucu kül katkısı ve değişen oranlarda kirecin S zeminin kompaksiyon karakteristiklerine etkisi.

B zemini ve karışımları üzerinde yapılmış kompaksiyon deneylerinden elde edilen grafikler Şekil 3.7, 3.8 ve 3.9'da verilmiştir. Şekil 3.7 incelendiğinde zemine sadece uçucu kül eklendiğinde  $\gamma_{kmaks}$  değerinde azalma,  $w_{opt}$  değerlerinde ise artış gözlenmiştir. Örneğin, optimum su içeriği B zeminde % 36.47 iken, B15FA kodlu karışımda % 30.85'e ve B30FA kodlu karışımda ise % 28.52'ye düşmüştür. Katkısız B zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ( $\gamma_{kmaks}$ ) değeri 12.48 kN/m<sup>3</sup> iken, B15FA karışımda ilgili değer 13.07 kN/m<sup>3</sup>'e ve B30FA kodlu karışımda ise 13.41 kN/m<sup>3</sup>'e yükselmiştir.



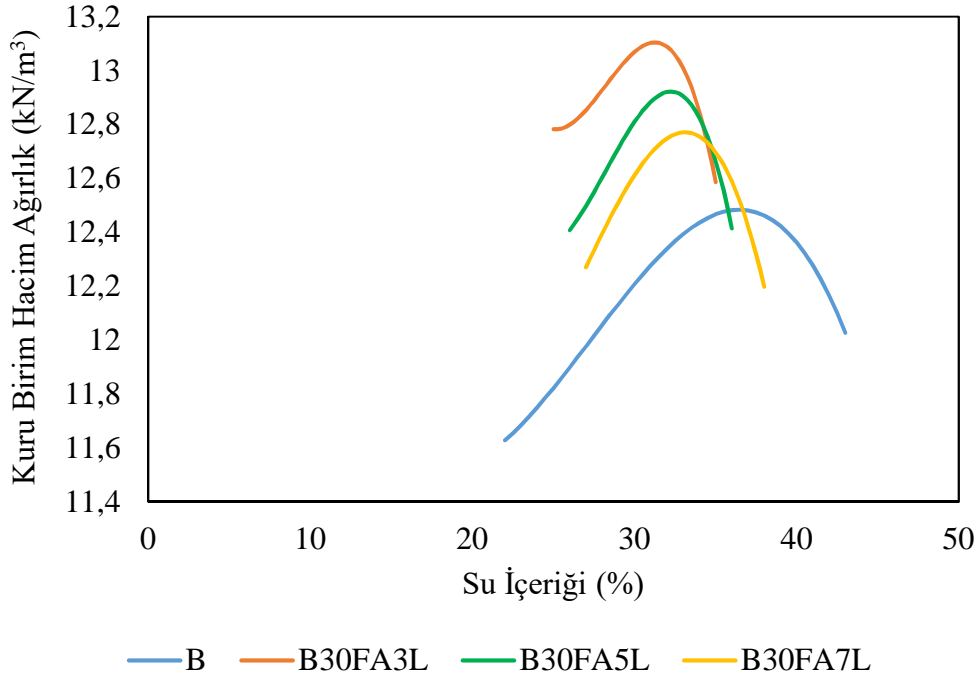
**Şekil 3.7** Uçucu kül katkısının B zeminin kompaksiyon karakteristiğine etkisi.

B zemininin ve kireç ile oluşturulan karışımların standart kompaksiyon deneyi eğrileri Şekil 3.8'de sunulmuştur. Eklenen % 3 kireç, katkısız B zeminin  $\gamma_{kmax}$  ( $12.48 \text{ kN/m}^3$ ) değerini az miktarda değiştirerek (% 2.72 azalış)  $12.14 \text{ kN/m}^3$  değerine getirmiştir. En yüksek azalış B7L karışımında % 4.65 oranında gerçekleşmiştir. İlgili karışımın  $\gamma_{kmax}$  değeri ise  $11.90 \text{ kN/m}^3$  olarak bulunmuştur. B zeminin kompaksiyon deneyi sonunda optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) değeri % 36.47 olarak bulunmuştur. Eklenen kireç katkısı ile  $w_{opt}$  değerlerinde artış meydana gelmiştir. En yüksek artış B7L kodlu karışımında gerçekleşmiş olup, ilgili karışıma ait  $w_{opt}$  değeri % 39.06 olarak bulunmuştur.



**Şekil 3.8** Kireç katkısının B zeminin kompaksiyon karakteristiğine etkisi.

Şekil 3.9'da ise B zemine eklenen hem uçucu kül (% 30 sabit) hem de kireç (% 3, % 5 ve % 7) katkısının kompaksiyon deney grafikleri görülmektedir. Zemine hem kireç hem de uçucu kül eklendiğinde hem  $\gamma_{\text{kmax}}$  hem de  $w_{\text{opt}}$  değerlerinde bir miktar artış gözlenmiştir. B zeminin  $\gamma_{\text{kmax}}$  değeri  $12.48 \text{ kN/m}^3$  iken, % 30 uçucu kül ve % 3 oranında kireç içeren karışımın  $\gamma_{\text{kmax}}$  değeri % 4.97 artarak  $13.10 \text{ kN/m}^3$  değerine gelmiştir. Eklenen daha fazla kireç katkısı ile  $\gamma_{\text{kmax}}$  değerlerinde bir miktar azalma meydana gelmiştir. B30FA7L kodlu karışımda  $\gamma_{\text{kmax}}$   $12.77 \text{ kN/m}^3$  olup, B30FA3L kodlu karışıma göre % 2.52 oranında azalma gerçekleşmiştir.



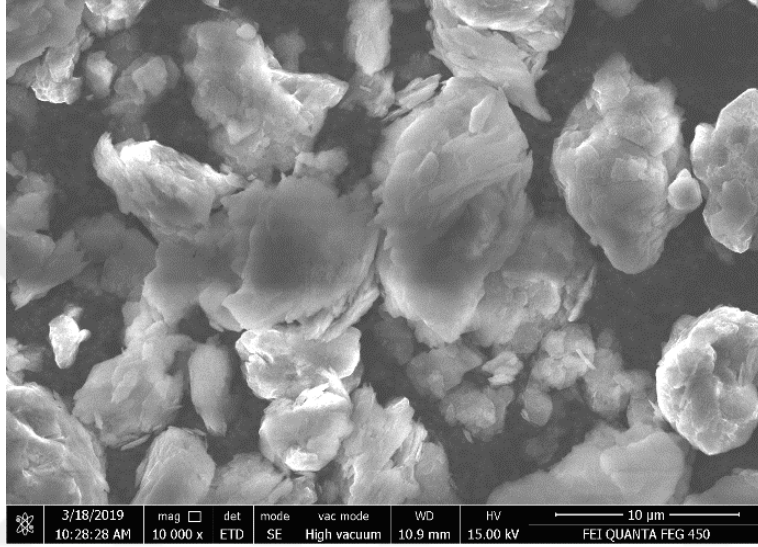
**Şekil 3.9** % 30 sabit uçucu kül katkısı ve değişen oranlarda kirecin B zeminin kompaksiyon karakteristiklerine etkisi.

Eklene uçucu kül ve kireç katkısı ile  $w_{opt}$  değerlerinde önce bir azalma daha sonra ise artış meydana gelmiştir. En yüksek azalış B30FA3L karışımında gerçekleşmiş olup ilgili karışıma ait  $w_{opt}$  değeri % 31.24 olarak bulunmuştur. Diğer karışımlarda ise önemli bir değişim olmamakla birlikte B30FA5L ve B30FA7L karışımlara ait  $w_{opt}$  değerleri sırasıyla % 32.24 ve % 33.12 olmuş olup katkısız zemine göre daha düşüktür.

Uçucu kül katkılarında zemine eklenen uçucu külün, B zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığını artırıp, optimum su içeriğini değiştirmesi beklenen bir durumdur. Bunun sebebi ise, uçucu kül danelerinde silt partiküllerinin yüksek oranda kil içeren B zeminine eklenmesi ile gradasyondaki değişimden dolayı olmuştur. Düşük plastisiteli kilde değişimin daha az olması ise bu kilin içerdiği silt oranının yüksek plastisiteli kile göre daha yüksek olmasıdır. Bunun yanında sadece % 30 uçucu kül içeren karışım ile % 30 uçucu kül + kireç içeren karışımlar karşılaştırıldığında iki katkıyı birden içeren karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin daha düşük ve optimum su içeriğinin daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bunun nedeni ise, uçucu küle eklenen kireç ile çimentolaşmış folüküle matris oluşumu, su tutma kapasitesini artırmakta ve kompaksiyon etkisine karşı koymakta olup su içeriğini artırıp maksimum yoğunluğu azaltmaktadır (Jha 2017).

### 3.1.2 Düşük Plastisiteli Killi Zeminin Mikro Analizleri

Düşük plastisiteli killi zemin (S), Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama Merkezi'nde (ARTMER) mikro analizlere (SEM, XRD, XRF, TGA) tabii tutulmuştur. Şekil 3.10'da düşük plastisiteli killi zemine ait 10000 kat büyütülmüş SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüsü mevcuttur. Ayrık partiküller görüntüde boşluk olmasına yol açmaktadır. Partikül şekilleri amorf ve danesel formdadır.



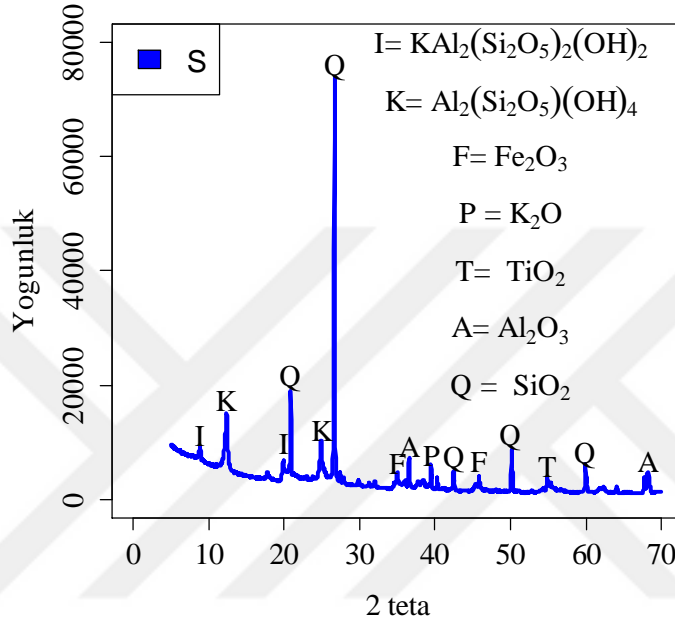
Şekil 3.10 S zemine ait SEM görüntüsü (x10000).

S zeminine ait XRF (X Işınları Floresansı) sonuçları ise Çizelge 3.5'de verilmiştir. Buna göre düşük plastisiteli killi zeminde yüksek oranda  $\text{SiO}_2$  (% 58.43) ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (% 31.42) bulunmuştur. Geri kalanın % 3.72'sini  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , % 3.23'ünü  $\text{K}_2\text{O}$ , % 2.07'sini  $\text{TiO}_2$ , % 0.92'sini  $\text{MgO}$  ve az miktarda diğer bileşikler ( $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_3$  ve  $\text{ZnO}$ ) oluşturmaktadır.

Çizelge 3.5 S zemine ait XRF analiz sonuçları.

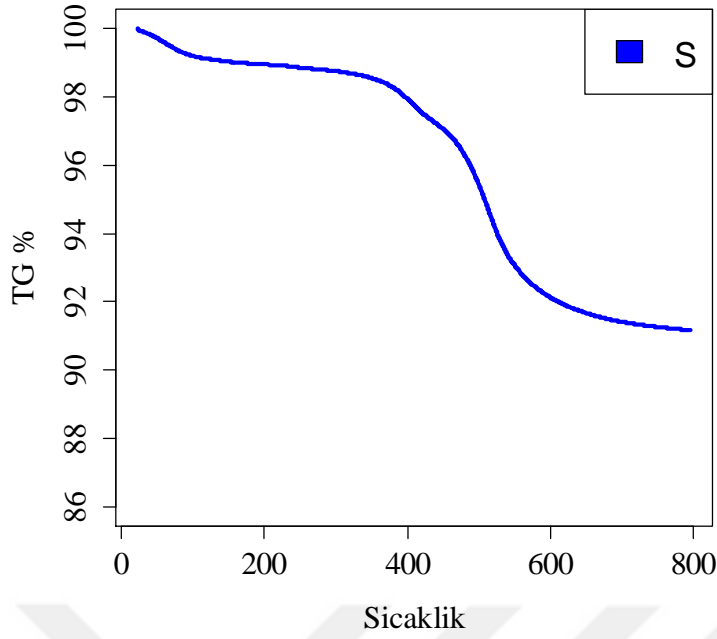
Bileşik	Konsantrasyon	Birim
$\text{SiO}_2$	58.430	%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	31.420	%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3.721	%
$\text{K}_2\text{O}$	3.227	%
$\text{TiO}_2$	2.070	%
$\text{MgO}$	0.919	%

S zemin numunesi üzerinde yapılan XRD (X Işınlari Kırınımı) analiz sonuçları Şekil 3.11'de verilmiştir. Şekilde zemine ait  $2\theta$  ve yoğunluk arasındaki ilişki görülmektedir. En büyük pik değeri  $2\theta = 26.66^\circ$  açısında elde edilmiştir. Bu pik değerine karşılık gelen bileşen  $\text{SiO}_2$  olup, yoğunluk miktarı 73844'tür. Ayrıca illit (I) ve kaolin (K) pikleri de gözlenmiştir. XRF analizindeki konsantrasyon yüzdeleri ile XRD analizinde elde edilen piklerin uyum içinde olduğu gözlenmektedir.



Şekil 3.11 S zemine ait XRD analiz sonucu.

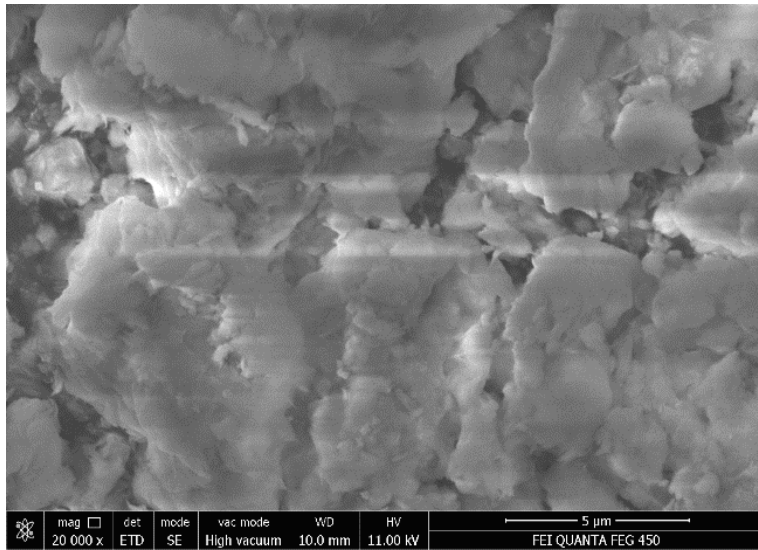
Şekil 3.12'de S zemine ait sıcaklık ve kütle arasındaki ilişkinin gösterildiği TGA analiz sonuçları mevcuttur. Buna göre ilk 100 derecede kütlede azalma var iken 100 ile 400 derece arasında kütle sabit kalmıştır. 450-600 derece arasında kütle azalımı hızlanmış olup 600 dereceden sonra azalma hızı yavaşlamıştır. S zemin ve karışımlarına ait detaylı TGA analizleri 5. bölümde ele alınmıştır.



Şekil 3.12 S zemine ait TGA analiz sonucu.

### 3.1.3 Yüksek Plastisiteli Killi Zeminin Mikro Analizleri

Yüksek plastisiteli killi zemin (B) numunesinin mikro yapısının incelenmesi için de SEM, XRD, XRF ve TGA analizleri yapılmıştır. Şekil 3.13'de partikül şekilleri düşük plastisiteli killi partiküllerden boyut olarak daha küçük olmalarına rağmen levha ve katmanlı formdadırlar.



Şekil 3.13 B zemine ait SEM görüntüsü (x20000).

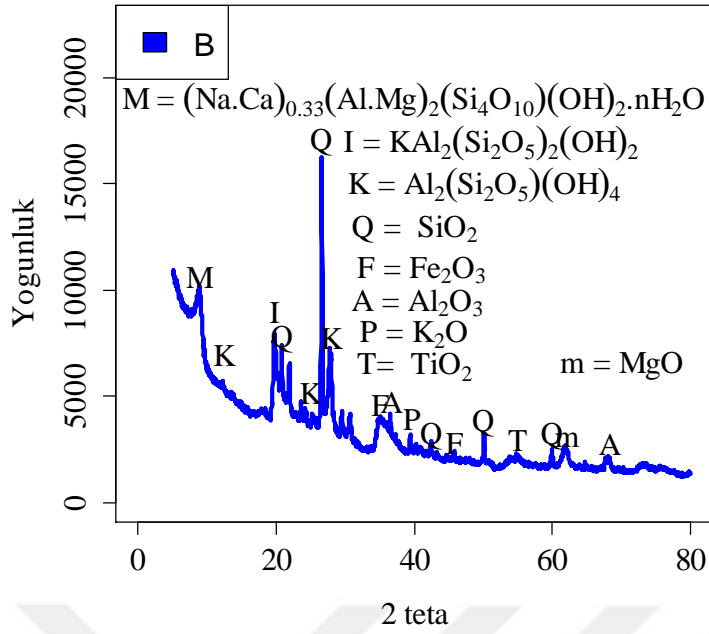
XRF sonuçları incelendiğinde ise Çizelge 3.6'daki sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre yüksek plastisiteli killi zeminde yüksek oranda SiO<sub>2</sub> (% 65.748) ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (% 17.418) bulunmuştur.

Geri kalan % 16.834'lük kısmın % 7.783'ünü Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 3.591'ini Na<sub>2</sub>O, % 3.161'ini MgO ve az miktarda diğer bileşikler (K<sub>2</sub>O, Cl, BaO, SO<sub>3</sub>, ZnO ve Rb<sub>2</sub>O) oluşturmaktadır.

**Çizelge 3.6** B zemine ait XRF analiz sonuçları.

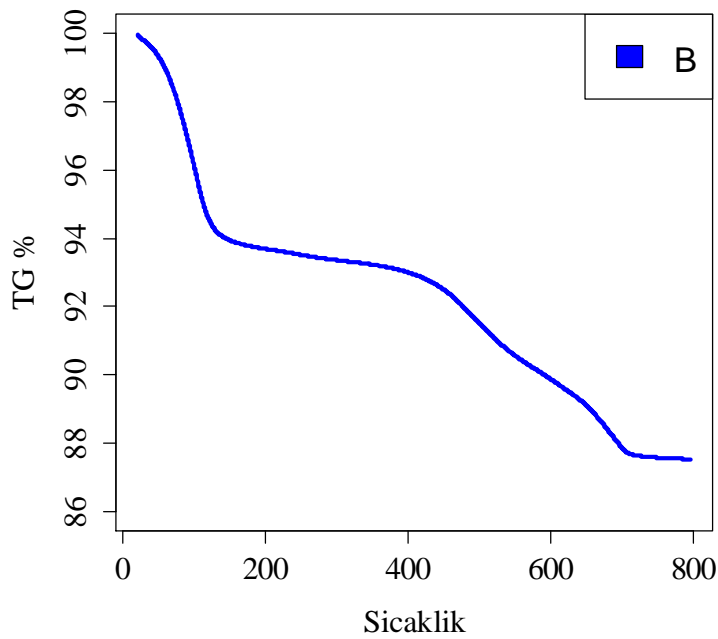
Bileşik	Konsantrasyon	Birim
SiO <sub>2</sub>	65.748	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.418	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.783	%
Na <sub>2</sub> O	3.591	%
MgO	3.161	%
K <sub>2</sub> O	1.487	%
SO <sub>3</sub>	0.609	%
CaO	0.000	%

Yüksek plastisiteli killi zemin numunesi üzerinde yapılan XRD analiz sonuçları Şekil 3.14'de verilmiştir. Şekilde zemine ait 2θ ve yoğunluk arasındaki ilişki görülmektedir. Buna göre pik değerleri 2θ açısının belirli değerlerinde oluşmuştur. En büyük pik değeri 2θ = 26.57° açısında elde edilmiştir. Bu pik değerine karşılık gelen bileşen SiO<sub>2</sub> olup, yoğunluk miktarı 16239'dur. XRF sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde zemin içinde en çok bulunan bileşenin SiO<sub>2</sub> olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca montmorillonit (M), illit (I) ve kaolin (K) pikleri de gözlenmiştir. XRF analizindeki diğer minerallere (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, TiO<sub>2</sub>) ait piklerin de XRD analizinde belirdiği anlaşılmaktadır. Montmorillonit piki beklenenin aksine 2θ = 8.96° civarında belirmiş olup, bu durumun nedeni numunenin etüvde kurutulması olmuştur (Mitchell ve Soga 2005).



Şekil 3.14 B zemine ait XRD analiz sonucu.

Şekil 3.15'de B zemine ait TGA analiz sonuçları verilmiştir. Buna göre ilk 100 derecede kütle azalım hızı, düşük plastisiteli killi zemine göre daha fazladır. Sıcaklık 100 ile 400 derece arasında iken numune kütlesi yaklaşık sabit kalmıştır. 450-600 derece arasında kütle azalımı hızlanmış olup, 600 dereceden sonra azalma hızı yavaşlamıştır. B zemin ve karışımlarına ait detaylı TGA analizleri 5. bölümde ele alınmıştır.

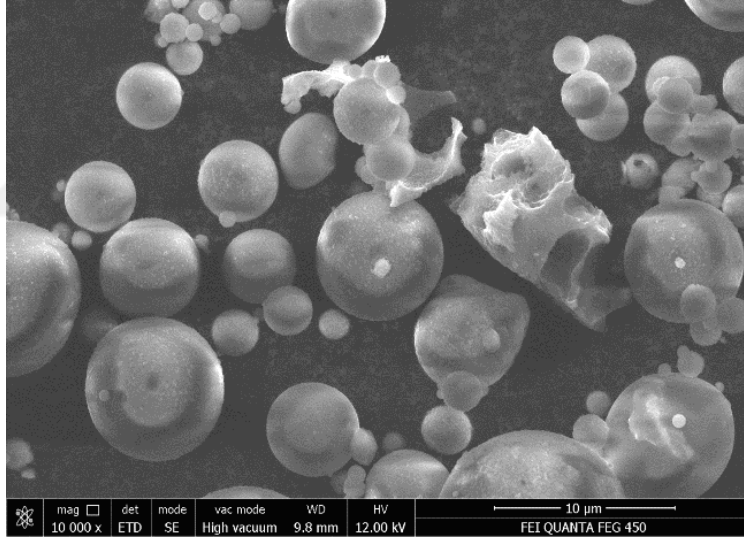


Şekil 3.15 B zemine ait TGA analiz sonucu.

### 3.1.4 Uçucu Külün Mikro Analizleri

Kullanılan uçucu kül numunesi Zonguldak ilinin Kilimli ilçesindeki Eren Enerji firmasından temin edilmiştir. Uçucu kül numunesi firmanın 2 numaralı santralinden ağzı kapalı paketler halinde teslim alınmıştır. Numuneler güneş görmeyen serin bir yerde muhafaza edilmiştir.

Uçucu kül numunesinin mikro yapısının incelenmesi için de aynı SEM, XRD, XRF, TGA analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.16'da uçucu kül partiküllerinin küresel olduğu görülmektedir. Uçucu külün küresel partikül şekli ve dane çapının genellikle 40 µm'nin altında olması, puzolanik aktiviteye de olumlu etkimektedir. Yüksek kireçli uçucu küllerden farklı olarak da şekil dağılımı daha homojendir (Türker vd. 2009). İçi dolu camsı faza sahip olan bu uçucu kül, F sınıfı uçucu küllere uygun bir partikül yapısına sahiptir. Ayrıca kuvars ve mullit minerali de içermektedir.



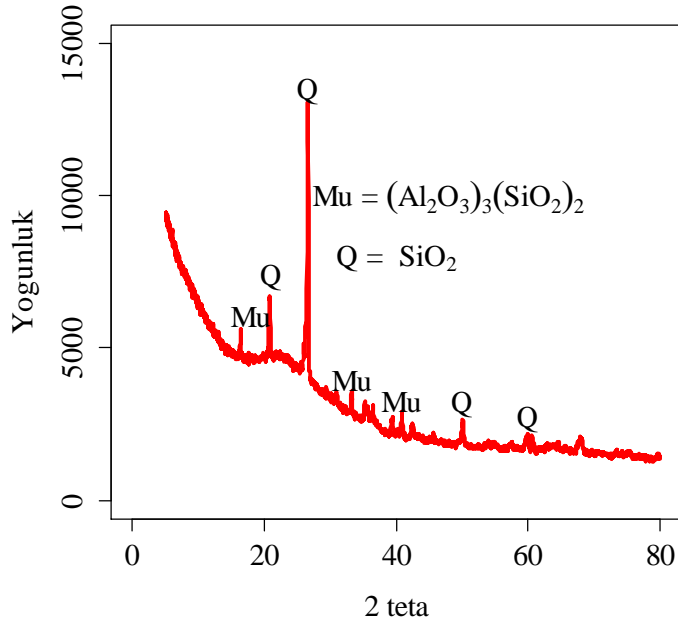
Şekil 3.16 Uçucu küle ait SEM görüntüsü (x10000).

XRF analiz sonuçları Çizelge 3.7'de görülmektedir. Buna göre F tipi uçucu küle yüksek oranda SiO<sub>2</sub> (% 48.199), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (% 21.079) ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (% 18.317) bulunmuştur. Geri kalanın % 3.876'sını K<sub>2</sub>O, % 2.491'ini CaO, % 2.350'sini TiO<sub>2</sub>, % 1.891'ini MgO ve az miktarda diğer bileşikler (Na<sub>2</sub>O, Rb<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub>, ZnO ve PbO) oluşturmaktadır.

**Çizelge 3.7** Uçucu küle ait XRF analiz sonuçları

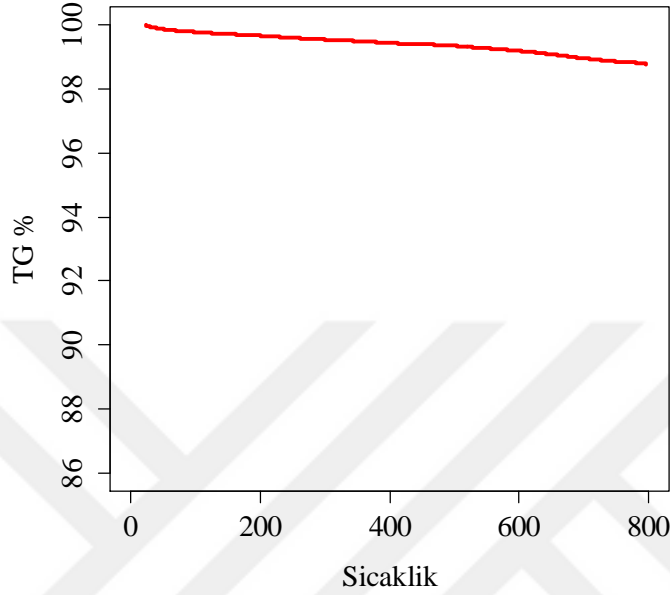
Bileşik	Konsantrasyon	Birim
SiO <sub>2</sub>	48.199	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.079	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.317	%
K <sub>2</sub> O	3.876	%
CaO	2.491	%
TiO <sub>2</sub>	2.350	%
MgO	1.891	%
SO <sub>3</sub>	0.977	%
Na <sub>2</sub> O	0.567	%

Şekil 3.17'de tez çalışmasında kullanılan uçucu küle ait XRD analiz sonuçları sunulmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi uçucu küle mineral olarak yoğunlukla kuvars ve mullit minerallerine ait pikler vardır. Uçucu külün Şekil 3.16'daki SEM görüntüsünde de kuvars ve mullit minerallerinin görüldüğü dikkate alındığında sonuçta tutarlılık bulunmaktadır. Literatüre bakıldığında da kullanılan düşük kireçli uçucu külün içerisindeki minerallerin (kuvars ve mullit), tipik bir F sınıfı uçucu küle benzediği anlaşılmaktadır (Türker vd. 2009; Moghal vd. 2013).



**Şekil 3.17** Uçucu küle ait XRD analiz sonucu.

Şekil 3.18'deki uçucu küle ait grafik incelendiğinde 800°C'ye kadar numune kütlesinde yok denecek kadar az bir kütle kaybı (% 1.22) gerçekleşmiştir. Bu durum uçucu kül numunesinin sıcaklığa karşı dirençli olduğunu göstermektedir. Uçucu külün, kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu elde edilen bir yan ürün olduğu bilindiği için bu beklenen bir durumdur.



**Şekil 3.18** Uçucu küle ait TGA analiz sonucu.

Uçucu küle ait mineralojik özelliklerin belirlenmesi amacıyla SEM ve XRF analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Eren Enerji firması tarafından yaptırılmış olan analize ait sonuçlar Çizelge 3.8'in ikinci sütununda (Uçucu Kül %) gösterilmektedir. Gerek firma tarafından gerekse ARTMER tarafından yapılan XRF sonuçları incelendiğinde kullanılan uçucu küle  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  oranı % 70'ten fazla (% 87.595) çıkarken, CaO oranı da % 2.491 civarındadır. Çizelge 3.8'de bu çalışmada kullanılan uçucu kül analiz değerleri ile ASTM C618 (2019) ve TS EN 197-1 (2012) standartları karşılaştırılmıştır. ASTM C 618 (2019)'a göre F sınıfı bir uçucu küle  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (S+A+F) oranının % 50'den fazla çıkması ve CaO miktarının % 18'dan az olması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan uçucu külün S+A+F bileşen yüzdesi % 87.595 ve CaO miktarı da % 2.491'dir (< %18). Buna göre bu tez çalışmasında kullanılan uçucu külün F sınıfına uyduğu görülmektedir. Bu uyumu destekleyen iki ayrı parametre de  $\text{SO}_3$  ve kızdırma kaybıdır (KK). Çizelgeden de görüldüğü üzere küledeki  $\text{SO}_3$  miktarı standart tarafından istenen şartı sağlamaktadır. Uçucu külün kızdırma kaybı % 9'dan küçüktür. TS EN 197-1 (2012) standardına göre de kullanılmış olan uçucu kül V sınıfına girmektedir.

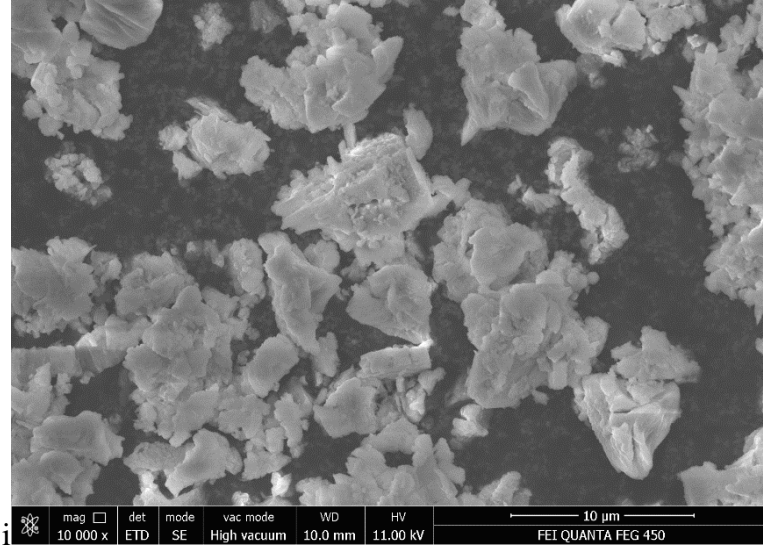
**Çizelge 3.8** Farklı standartlara göre uçucu külün uyması gereken değerler.

Bileşen	Uçucu Kül %	ASTM C 618 (2019)		TS EN 197-1 (2012)	
		C	F	V	W
SiO <sub>2</sub>	48.199				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.079				
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.317				
S+A+F	87.595	> % 50	> % 50		
CaO	2.491	> % 18	≤ % 18		
MgO	1.891				
SO <sub>3</sub>	0.977	< % 5	< % 5		
Na <sub>2</sub> O	0.567				
KK	2.14	< % 9	< % 9	< % 5	< % 5
Cl <sup>-</sup>	0.02				
Serbest CaO	0.04				
Reaktif CaO	0.57			< % 10	> % 10
Reaktif SiO <sub>2</sub>				> % 25	> % 25

### 3.1.5 Kirecin Mikro Analizleri

Bu çalışmada kullanılan kireç malzemesinin içermiş olduğu CaO + MgO oranı % 94.549'dur. BS EN 459-1 (2010) standardında CaO + MgO > % 90 olması durumunda kireç CL-90 sınıfına girmektedir. Buna göre bu tez çalışmasında kullanılan kireç CL-90 tipi için gerekli şartları sağlamaktadır. Kirecin CL-90 tipi olmasının bilinmesi kimyasal kompozisyonu hakkında ön bir bilgi sağlamaktadır.

Kullanılan kireç çalışma boyunca rutubetten uzak bir şekilde muhafaza edilmiştir. Kireç numunesine diğer materyallerde olduğu gibi SEM, XRD, XRF, TGA analizleri yapılmıştır. Şekil 3.19'da kirece ait SEM görüntüsünde özellikle portlandit ve kalsit mineralleri görülmektedir. Portlandit partiküllerinin şeklinin düzensiz olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise üretim sırasında mekanik ufalama yapılmasıdır (Yang vd. 2016).



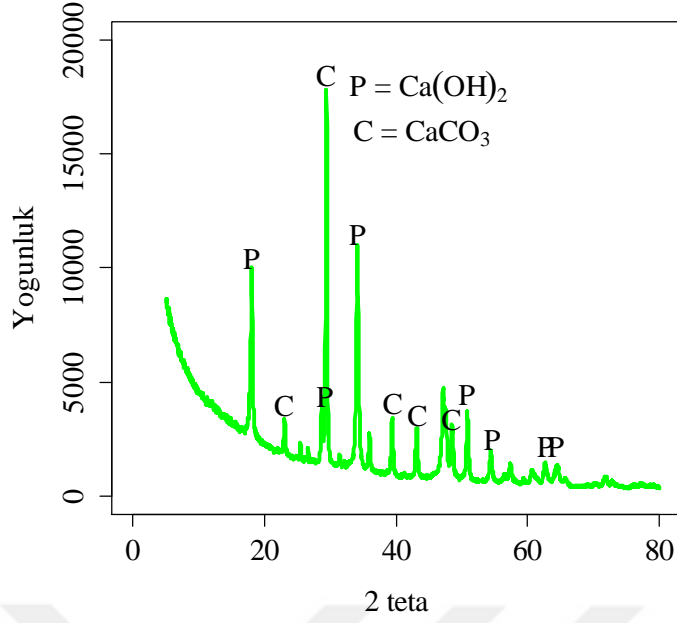
**Şekil 3.19** Kirece ait SEM görüntüsü (x10000).

Kirece ait XRF sonuçları Çizelge 3.9'da özetlenmiştir. Çizelgede de görüldüğü gibi kireçte yüksek oranda CaO (% 92.502) bulunmaktadır. Geri kalanın % 2.117'sini SiO<sub>2</sub>, % 2.047'sini MgO, % 1.368'ini SO<sub>3</sub>, % 1.249'unu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 0.447'sini Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve az miktarda diğer bileşikler (K<sub>2</sub>O, Cl, ZrO<sub>2</sub>, PbO, Na<sub>2</sub>O ve SrO) oluşturmaktadır.

**Çizelge 3.9** Kirece ait XRF analiz sonuçları.

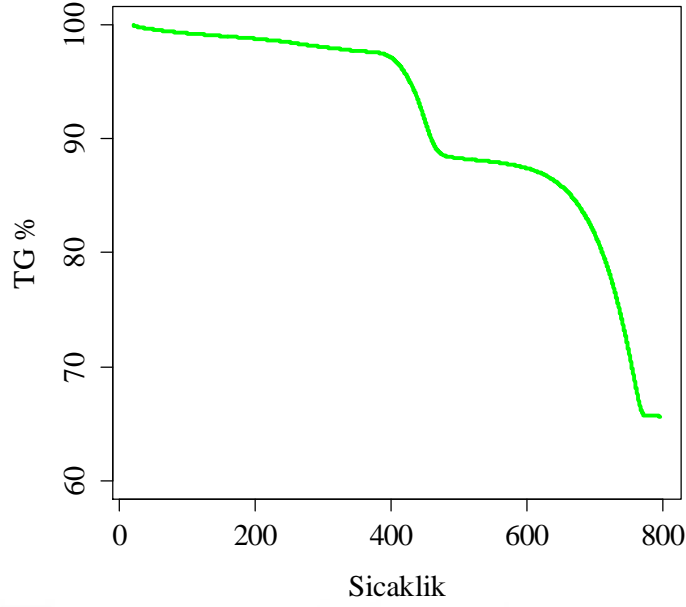
Bileşik	Konsantrasyon	Birim
CaO	92.502	%
SiO <sub>2</sub>	2.117	%
MgO	2.047	%
SO <sub>3</sub>	1.368	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.249	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.447	%
K <sub>2</sub> O	0.160	%

Şekil 3.20'de kirece ait 2θ ve yoğunluk arasındaki ilişkinin görüldüğü XRD analiz sonucu sunulmuştur. En büyük pik değeri 2θ = 26.57° açısında elde etmektedir. XRF sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde özellikle portlandit Ca(OH)<sub>2</sub> ve kalsit (CaCO<sub>3</sub>) minerallerine ait pikler bulunmaktadır. Kireçte bulunan bu mineraller de literatür ile uyumludur (Jha ve Sivapullaiah 2017). Kirecin Şekil 3.19'daki SEM görüntüsüne bakıldığında da ilgili minerallerin bulunduğu anlaşılmaktadır.



**Şekil 3.20** Kirece ait XRD analiz sonucu.

Şekil 3.21'de ise kirecin artan sıcaklıkta kütle kaybı görülmektedir. Birinci bölge olan 22°C ile 400°C aralığında kireçteki kütle kaybı yalnızca % 2.84 düzeyinde olmuştur. Sıcaklık değerinin 400°C ile 470°C olduğu aralıkta kütle kaybı hızlanmış ve ilgili bölgede % 8.4'lük bir kayıp yaşanmıştır. Üçüncü bölgede (470-650°C aralığı) kütle azalış hızının yavaşladığı gözlenmiştir. Bu bölgede hızın yavaşlamasının nedeni ise kile özgü bileşenler içermemesindedir. Dolayısıyla kütle kaybı bu bölgede yaklaşık % 2.9 düzeyindedir. Sıcaklığın 770°C olması ile grafikte kütle kaybının sabit kaldığı ve 800°C değerine ulaştığında da toplam kütle kaybının % 34.36 olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 3.21** Kirece ait TGA analiz sonucu.

Yang vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada ise 800 derecedeki kayıp yaklaşık % 26.5'tir. Kireçteki  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  mineralinde sıcaklığın 290-550 derece arasında olduğu durumda dehidroksilasyon oluşurken kütlece kayıp bu tez çalışmasında % 10.16, Yang vd. (2016) tarafından ise % 20.79 olarak bulunmuştur. Kireçte sıcaklık 453.5°C olduğu yerde bir pik görülmektedir. Literatür çalışmalarında bu pikin portlandit mineralinin varlığına işaret ettiği bilinmektedir (Wang vd. 2004; Haha vd. 2011; Jiang vd. 2016).

### 3.2 METOT

EN 14227 standartları, Avrupa Birliği üyesi ülkeler arasında kavram ve tasarım bütünlüğü açısından geliştirilmiştir. Belirtilen bu standartların kullanımı hem yaygınlaşmış hem de zorunlu hale gelmiştir. Bu kapsamda geliştirilen standartlar arasında kireç ile stabilizasyona yönelik BS EN 14227-11 (2006) ve uçucu kül ile stabilizasyona yönelik olarak da BS EN 14227-14 (2006) standartları mevcuttur. Bu tez çalışması kapsamında zemin stabilizasyonunun performansını ölçmek için BS EN 14227-11 (2006) ve BS EN 14227-14 (2006) standardı kapsamında planlanan dayanım deneyleri (ani taşıma indeksi, nemlilik şartları, dolaylı çekme, serbest basınç, Kaliforniya taşıma oranı, şişme) yapılmıştır. Ayrıca seçili karışımlar üzerinde de ASTM D560/D560M-16 (2016) standardı kapsamında donma-çözülme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, seçili karışımların mikro analizleri (SEM, XRD, XRF, TGA) değerlendirilmiştir.

### 3.2.1 BS EN 14227 Standartları

Zamanla değişen ve gelişen dünyada bilginin önemi artmıştır. Bilgiye ve teknolojiye ulaşmanın da kolaylaşması ile küreselleşen bir dünya düzeni oluşmuştur. İnsanlar arası etkileşimde ve birlikte çalışma kültüründe uluslararası düzeyde önemli bir yol kat edilmiştir. İnsanlar farklı ülkelerde çalışma ve kendini geliştirme ihtiyacı hissetmiştir. Bu durumda kendi ülkesinde öğrendiği sistematik bilgi ve tecrübe birikimini gittikleri ülkeye götürmüşlerdir. Fakat, diğer alanlarda da olabileceği gibi inşaat mühendisliğinde de her ülkenin kendine has tasarım, proje ve simgeleme sistemi mevcuttur. Bu durum farklı bir ülkeye çalışmaya giden bir mühendiste kafa karışıklığı, anlam karışıklığı vb. durumlara sebep olabilmektedir. Bu durumlar göz önüne alınarak tüm Avrupa Birliği üyesi ülkelerde kullanılmak üzere ortak bir tasarım ve simgeleme anlayışının hakim olması gerektiği belirlenmiştir. Yeni standartlar geliştirilerek dil, tasarım ve anlayış (simgeleme) farkları ortadan kaldırılarak farklı ülkelere giden mühendislerin gittikleri ülkedeki düzene (mühendislik hesap, tasarım, vb.) daha çabuk adapte olmaları hedeflenmiştir. Bu hedefler ışığında üretilen EN 14227 standartları dikkate alınarak yapılan bilimsel çalışmalar da gün geçtikçe artış göstermektedir (Mccarthy vd. 2014; Mraz vd. 2015; Stehlik vd. 2015). Bu standartlar toplam 11 tane olup Çizelge 3.10'da özetlenmiştir.

**Çizelge 3.10** EN 14227 Standartları listesi

EN Numarası	Hydraulically Bound Mixtures – Specifications	Hidrolik Bağlayıcı Karışımlar - Özellikler
BS EN 14227-1 (2004)	Part 1: Cement bound granular mixtures	Bölüm 1: Çimento bağlayıcı daneli karışımlar
BS EN 14227-2 (2004)	Part 2: Slag bound mixtures	Bölüm 2: Cüruf bağlayıcı karışımlar
BS EN 14227-3 (2004)	Part 3: Fly ash bound mixtures	Bölüm 3: Uçucu kül bağlayıcı karışımlar
BS EN 14227-4 (2004)	Part 4: Fly ash for hydraulically bound mixtures	Bölüm 4: Hidrolik bağlayıcı karışımlar için uçucu kül
BS EN 14227-5 (2013)	Part 5: Hydraulic road binder bound granular mixtures	Bölüm 5: Yol yapımı için hidrolik bağlayıcı karışımlar
BS EN 14227-10 (2006)	Part 10: Soil treated by cement	Bölüm 10: Çimento ile işleme tâbi tutulmuş zemin
BS EN 14227-11 (2006)	Part 11: Soil treated by lime	Bölüm 11: Kireç ile işleme tâbi tutulmuş zemin
BS EN 14227-12 (2006)	Part 12: Soil treated by slag	Bölüm 12: Cüruf ile işleme tâbi tutulmuş zemin
BS EN 14227-13 (2006)	Part 13: Soil treated by hydraulic road binder	Bölüm 13: Yol yapımında kullanılan hidrolik bağlayıcılar ile işleme tâbi tutulmuş zemin
BS EN 14227-14 (2006)	Part 14: Soil treated by fly ash	Bölüm 14: Uçucu kül ile işleme tâbi tutulmuş zemin
BS EN 14227-15 (2014)	Part 15: Hydraulically stabilized soils	Bölüm 15: Hidrolik stabilize edilmiş zeminler

Bu tez kapsamında Çizelge 3.10'da mevcut olan EN 14227 standartlarından sadece BS EN 14227-11 (2006) ve BS EN 14227-14 (2006) standartlarından bahsedilecektir. Her iki standart da genel olarak aynı geoteknik deneylerine göre karışımların mekanik performanslarını belirlemektedir. Bazı durumlarda farklılıklar da mevcut olmaktadır. Örneğin, dolaylı çekme deneyi uçucu kül stabilizasyonu standardı olan BS EN 14227-14 (2006) standardında yapılacak deneyler arasında gösterilirken BS EN 14227-11 (2006) standardında mevcut değildir.

Her iki standartta da stabilize edilmiş bir zeminin laboratuvarında gerçekleştirilen çeşitli deneyler sonucunda sahip olması gereken mühendislik performansının (dayanım ve durabilite) belirlenmesi yer almaktadır. Bu deneylere göre elde edilen sonuçlar farklı simgeler ile gösterilmektedir. Her iki standart kapsamında yapılan deneylerden ilki ani taşıma indeksi (IBI: Immediate Bearing Index) deneyi olup bu deney ile ilgili bilgi deneysel prosedür kısmında detaylıca verilmiştir. Hem stabilizasyon hem de iyileştirme için kullanılan bu parametre, BS EN 13286-47 (2012) standardında belirtilmiş olan CBR deneyi ile bulunur. Normal CBR deneyinden farkı, sürşarj yüklerinin kullanılmamasıdır. Hazırlanan numune, bir poşete sarılıp ağzı kapatılarak 60 dakika bekletildikten sonra CBR deneyi uygulanır. IBI değerinin belirlenmesinde toplam süre, karışım hazırlandıktan sonra 90 dakikayı aşmamalıdır. Çizelge 3.11'de ani taşıma indeksi değerleri ve simgelerinin nasıl gösterileceği anlatılmaktadır.

**Çizelge 3.11** Ani taşıma indeksi kategorisi (BS EN 14227-11 2006 ve BS EN 14227-14 2006).

BS EN 14227-11 (2006) Kireç Stabilizasyonu		BS EN 14227-14 (2006) Uçucu Kül Stabilizasyonu	
Ani Taşıma İndeksi	Kategori	Ani Taşıma İndeksi	Kategori
$\geq 5$	IBI <sub>5</sub>	$\geq 10$	IBI <sub>10</sub>
$\geq 7$	IBI <sub>7</sub>	$\geq 15$	IBI <sub>15</sub>
$\geq 10$	IBI <sub>10</sub>	$\geq 20$	IBI <sub>20</sub>
$\geq 15$	IBI <sub>15</sub>	$\geq 25$	IBI <sub>25</sub>
$\geq 20$	IBI <sub>20</sub>	$\geq 30$	IBI <sub>30</sub>
$\geq 25$	IBI <sub>25</sub>	$\geq 40$	IBI <sub>40</sub>
Beyan edilen değer	IBI <sub>DV</sub>	$\geq 50$	IBI <sub>50</sub>
		Beyan edilen değer	IBI <sub>DV</sub>

Çizelge 3.11'de hem uçucu kül ile hem de kireç ile stabilize edilmiş zeminlerde ani taşıma indeksi (IBI) değerlerine göre sınıflandırma kriterleri sunulmuştur. Uçucu kül ile stabilize edilmiş zeminlerde 8 adet IBI sınıfı mevcutken kireç ile stabilize edilmiş zeminlerde 7 adet sınıf bulunmaktadır. Kireç ile stabilizasyonda mevcut olan IBI<sub>5</sub> ve IBI<sub>7</sub> sınıfları uçucu kül kısmında bulunmamaktadır. Uçucu kül ile stabilizasyonda IBI<sub>30</sub>, IBI<sub>40</sub> ve IBI<sub>50</sub> sınıfları da kireç kısmında mevcut değildir. Ani taşıma indeksi değeri 5 (dahil) ile 7 (dahil değil) arasında olan zeminler IBI<sub>5</sub>, 7 (dahil) ile 10 (dahil değil) arasında olan zeminler IBI<sub>7</sub> vb. olarak tanımlanmaktadır. Kireç için ani taşıma indeksi 25'ten büyük zeminler IBI<sub>25</sub> ve uçucu kül için ise ani taşıma indeksi 50'den büyük zeminler IBI<sub>50</sub> şeklinde simgelenmiştir. Çizelgede her iki bölümde IBI<sub>DV</sub> olarak gösterilen değer ise yerel yönetmelik, kısıtlamalar vb. durumlar için beyan edilmiş değeri temsil etmektedir. Bunun anlamı, örneğin ani taşıma indeksi değeri 25 çıkmış olan bir durumda simgelemenin IBI<sub>25</sub> olarak da yapılabilmesinin sağlanmasıdır. Burada sistemsellik olduğu için tasarımcı hangi Avrupa Birliği üyesi ülkeye gitse IBI<sub>25</sub> olan bir zeminden bahsettiğinde bu konuda çalışan mühendisler tarafından kolaylıkla anlaşılacaktır.

Ani taşıma indeksinden sonra BS EN 13286-46 (2003) standardında belirtilmiş olan nemlilik şartları (MCV: Moisture Condition Value) deneyi yapılır. Bu deney sonucunda deneye tabi tutulan numunenin MCV sınıfı (kategorisi) belirlenir. Çizelge 3.12 incelendiğinde hem uçucu kül ile hem de kireç ile stabilize edilen zeminler için aynı MCV kategorisinin kullanıldığı görülmektedir. Nemlilik şartları değeri 6 ile 10 arasında olduğunda MCV<sub>6/10</sub> simgesini almaktadır. Tıpkı ani taşıma indeksi durumunda olduğu gibi bu deneyde de farklı bir durumda (bölgesel yönetmelik vb. kısıtlamalar) MCV<sub>DV</sub> simgelemesi kullanılarak örneğin nemlilik şartları 8.5 çıkan bir değer MCV<sub>8.5</sub> olarak simgeleştirilebilir.

**Çizelge 3.12** Nemlilik şartları kategorisi (BS EN 14227-11 2006 ve BS EN 14227-14 2006).

Nemlilik Şartları Değeri	Kategori
Minimum 6 ve maksimum 10	MCV <sub>6/10</sub>
Minimum 7 ve maksimum 11	MCV <sub>7/11</sub>
Minimum 8 ve maksimum 12	MCV <sub>8/12</sub>
Minimum 9 ve maksimum 13	MCV <sub>9/13</sub>
Beyan edilen değer	MCV <sub>DV</sub>

Mekanik performansın değerlendirilmesinde önemli kriterlerden birisi de karışımların CBR değerlerinin belirlenmesidir. Kaliforniya taşıma deneyinde numuneler, CBR kalıbında hazırlanıp 1 saat, 3 gün ya da belirtilmiş farklı bir kür süresine tabi tutulup sonrasında 4 veya daha fazla gün suda bekletildikten sonra CBR deneyine maruz bırakılırlar. Deney tamamlandıktan sonra CBR değeri hesaplanır. Daha sonra Çizelge 3.13'de gösterilen kategorilere göre sınıflandırılması yapılır. Çizelge 3.13'de birinci grubu temsil eden ilk iki sütun BS EN 14227-11 (2006) standardında belirtilen kireç ile stabilize edilmiş zeminlerde mekanik performansın ölçüt kriterlerinden biri olan CBR deneyi ile ilgili sınıflandırma detaylarını gösterirken, ikinci grubu temsil eden son iki sütunda ise aynı durumun uçucu kül ile olanı mevcuttur. Her iki grupta toplam 6 adet sınıf bulunmaktadır. Gruplar arasında sadece 2 fark görünmektedir. Birinci grupta CBR<sub>15</sub> sınıfına giren bir karışımın ani taşıma indeksi sorgulanmaz iken, ikinci grupta aynı CBR<sub>15</sub> sınıfındaki bir karışımın hem CBR değerinin 15 ile 20 arasında olması hem de ilgili CBR değerinin IBI değerinden büyük olması gerekmektedir. Diğer bir fark ise CBR<sub>DV</sub> sınıfında ortaya çıkmaktadır. Birinci grupta CBR<sub>DV</sub> olarak sınıflandırılan bir karışımın aynı zamanda minimum CBR değerinin 15 olması da şart koşulmuş iken; ikinci grupta böyle bir şart mevcut değildir. Yönetmelik ya da özel bir çalışmanın gerektirdiği durumlarda ortaya çıkan CBR<sub>DV</sub> durumunda CBR değeri 18 olan bir karışım CBR<sub>18</sub> olarak adlandırılır. CBR değerinin 15'ten küçük olması durumunda minimum şartı sağlamadığından dolayı herhangi bir sınıfa giremez ama bu durum uçucu kül için geçerli değildir.

**Çizelge 3.13** Kaliforniya taşıma oranı kategorisi (BS EN 14227-11 2006 ve BS EN 14227-14 2006).

1. Grup BS EN 14227-11 (2006) Kireç Stabilizasyonu		2. Grup BS EN 14227-14 (2006) Uçucu kül Stabilizasyonu	
4 gün suda bekledikten sonra istenen CBR değerleri (ya da diğer belirtilen periyot)	Sınıf	4 gün suda bekledikten sonra istenen CBR değerleri (ya da diğer belirtilen periyot)	Sınıf
≥ 15	CBR <sub>15</sub>	≥ 15 ve ≥ IBI	CBR <sub>15</sub>
≥ 20 ve ≥ IBI	CBR <sub>20</sub>	≥ 20 ve ≥ IBI	CBR <sub>20</sub>
≥ 30 ve ≥ IBI	CBR <sub>30</sub>	≥ 30 ve ≥ IBI	CBR <sub>30</sub>
≥ 40 ve ≥ IBI	CBR <sub>40</sub>	≥ 40 ve ≥ IBI	CBR <sub>40</sub>
≥ 50 ve ≥ IBI	CBR <sub>50</sub>	≥ 50 ve ≥ IBI	CBR <sub>50</sub>
Beyan edilen değer (15'ten daha az değil)	CBR <sub>DV</sub>	Beyan edilen değer	CBR <sub>DV</sub>

CBR<sub>20</sub>, CBR<sub>30</sub>, CBR<sub>40</sub> ve CBR<sub>50</sub> olarak sınıflandırılacak olan bir karışımda beklenen CBR ve ani taşıma indeksi performansı her iki grupta aynıdır. Örneğin CBR<sub>20</sub> olarak adlandırılan bir

karışımın CBR değeri 20 ve 30 arasında (20 dahil ve 30 dahil değil) olmalı hem de bu değer ani taşıma indeksinden büyük olmalıdır. CBR değerinin 50'den ve ani taşıma indeksinden büyük olduğu durumlarda da karışım CBR<sub>50</sub> olarak sınıflandırılabilir.

Mekanik performansın değerlendirilmesinde dikkate alınacak bir deney de serbest basınç deneyidir. Karışımın serbest basınç dayanımı, BS EN 13286–50 (2004) standardına göre imal edilmiş numuneler üzerinde BS EN 13286–41 (2003) standardına göre gerçekleştirilen deney ile belirlenmektedir.

**Çizelge 3.14** Serbest basınç dayanımı sınıfları (BS EN 14227-11 2006 ve BS EN 14227-14 2006)

BS EN 14227-11 (2006) Kireç Stabilizasyonu		BS EN 14227-14 (2006) Uçucu Kül Stabilizasyonu		
Serbest Basınç Dayanımı	Sınıf	Narinlik oranı 2 olan silindirik numuneler için minimum R <sub>c</sub> (MPa)	Narinlik oranı 1 olan silindirik ve küp numuneler için minimum R <sub>c</sub> (MPa)	R <sub>c</sub> sınıfı
≥ 0.2 MPa	R <sub>c</sub> 0.2	0.4	0.5	C <sub>0.4/0.5</sub>
		0.8	1	C <sub>0.8/1</sub>
≥ 0.5 MPa	R <sub>c</sub> 0.5	1.5	2	C <sub>1.5/2</sub>
		3	4	C <sub>3/4</sub>
≥ 1.0 MPa	R <sub>c</sub> 1.0	6	8	C <sub>6/8</sub>
		9	12	C <sub>9/12</sub>
Belirtilen (0.2 MPa'dan az değil)	R <sub>c</sub> DV	Beyan edilen değer	Beyan edilen değer	C <sub>DV</sub>

Deney sonucunda Çizelge 3.14'den karışımın ait olduğu serbest basınç mukavemeti kategorisi belirlenmektedir. Buna göre kireç ile stabilizasyon sütununda serbest basınç dayanımı 0.2 MPa ile 0.5 MPa arasında olan (0.2 dahil ve 0.5 dahil değil) "R<sub>c</sub> 0.2" olarak sınıflandırılmaktadır. Çizelge 3.14'de görülen değerlerden başka bir değer belirtilmek istendiğinde ise örneğin serbest basınç dayanımı 550 kPa çıkan bir numune "R<sub>c</sub> 0.55" olarak da isimlendirilebilecektir. Serbest basınç dayanımının da minimum 0.2 MPa olması gerektiği çizelgede açıkça belirtilmiştir. Uçucu kül stabilizasyonunda ise toplam 7 farklı sınıf mevcuttur. Narinlik oranı 2 olan silindirik ve küp numunelerde minimum serbest basınç dayanımları için 0.4, 0.8, 1.5, 3, 6 ve 9 MPa

değerlerini içeren sınıflar mevcuttur. Narinlik oranı 1 olan numunelerde ise, serbest basınç dayanımı değerinin minimum 0.5, 1, 2, 4, 8 ve 12 MPa olduğu sınıflar mevcuttur. Buna göre örneğin, narinlik oranı 2 olan silindirik bir numunede serbest basınç dayanımı 0.40 MPa ise bu numune  $C_{0.4}$  olarak simgelenecektir.

Mekanik performansı değerlendirirken yapılması gerekenlerden birisi de şişmenin bulunmasıdır. Bunun için BS EN 14227-11 (2006) standardında da belirtilen lineer şişme deneyi yapılabilmektedir. Bu deneyde şişme için 28 gün kürde bekletilen numuneler daha sonra 4 veya daha fazla gün şişmeye bırakılır. Burada standarda göre en az üç adet numune şişme deneyine tabi tutulmalıdır. Bu deneyler sonucunda numunelerin ortalama şişme değerleri ve üç tekrarı olan numunelerde oluşması gereken maksimum şişme değerleri bulunmalıdır. Çizelge 3.15'de şişme değerlerine göre numunenin nasıl sınıflandırılacağı belirtilmiştir.

**Çizelge 3.15** Şişme sınıfları (BS EN 14227-11 2006 ve BS EN 14227-14 2006).

Numunelerin maksimum şişme ortalaması (mm)	Herhangi bir numunenin maksimum şişmesi (mm)	Sınıflar
5	10	LS <sub>5</sub>
3	6	LS <sub>3</sub>
1	2	LS <sub>1</sub>

Çizelge 3.15'e göre şişme sınıfları üçe ayrılmıştır. Şişme sonuçlarına göre LS<sub>3</sub> olarak adlandırılan sınıfta numunelerinin maksimum şişmelerinin ortalaması 3 mm olmalı ve tekrarlanan üç numuneden herhangi birinin ise maksimum şişmesi 6 mm'yi aşmamalıdır. Üç adet tekrarlı şişme deneyi sonucunda numunelerden birinin şişme değerinin 6 mm'den yüksek olması durumunda şişme sınıfı LS<sub>5</sub> olacaktır.

BS EN 14227-11 (2006) ve BS EN 14227-14 (2006) standartları kapsamında direkt çekme, dolaylı çekme ya da dolaylı çekme-sıkışma deneylerinden herhangi bir tanesinin yapılabileceği ifade edilmektedir. Bu deneyler için de en az 3 numunenin ortalaması alınmalıdır.

### 3.2.2 Donma-Çözülme Deneyi

Donma-çözülme deneyi, BS EN 14227-11 (2006) ve BS EN 14227-14 (2006) kapsamında planlanan deneyler arasında mevcut değildir. Bununla birlikte, yollarda kullanılan üst taban malzemelerinin seçiminde yolun yapılacağı yer dona duyarlı ise donma-çözülmenin etkisinin belirlenmesi gerekliliği Karayolları Teknik Şartnamesi'nde yer bulmuştur. KGM (2013) tarafından hazırlanan şartnamede 7 gün kürlenmiş numune üzerinde yapılan minimum 5 donma-çözülme çevrimi sonunda elde edilen dayanımın 170.15 kPa olması gerektiği belirtilmiştir. Bu durum dikkate alındığında donma-çözülme sonrası mukavemet (serbest basınç) dayanımını ölçme gerekliliği duyulmuştur. Söz konusu deney ASTM D560/D560M-16 (2016) standardında belirtilen hususlar dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Standart tarafından deneyde belirtilen husus, 24 saat -23 derecede donma ve 23 saat + 23 derece ve % 100 nem koşullarının sağlanması ile donma-çözülme döngüsünü 12 defa tekrar edilmesi gerekliliğidir. Tez kapsamında farklı çevrimlerin de etkisinin görülmesi amacıyla 12 çevrime ilave olarak 2, 4, 6 ve 8 çevrimler de uygulanmıştır. Sıcaklık değişimlerine karşı numunelerin mühendislik performansının (serbest basınç dayanımları) ölçülmesi durumu esas alınmıştır.

### 3.3 UÇUCU KÜL VE KİREÇ KATKI ORANLARININ BELİRLENMESİ

EN 14227 standartları ve donma-çözülme deneyleri dikkate alınarak gerçekleştirilen planlama doğrultusunda tez çalışmasında düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli kil numuneleri kullanılmıştır. İlgili zeminlere çeşitli oranlarda kireç ve uçucu kül karıştırılmıştır. İlave edilecek olan uçucu kül ve kireç yüzdeleri için literatür araştırması yapılmıştır. İlgili makaleler değerlendirildiğinde uçucu kül katkı oranları % 5, % 10, % 15, % 20 ve % 30 olarak seçilmiştir. Kireç katkısı için de literatür araştırması yapılmıştır. Ayrıca ASTM D6276-19 (2019) standardında detaylandırılmış pH analizi ilgili katkı oranlarının seçilmesinde bir diğer etken olmuştur. Hem S zemine hem de B zemine ait farklı kireç oranlarında analiz tekrar edilmiştir. S zeminin optimum kireç karışımını belirlemek için % 2, % 3, % 4, % 5, % 6, % 7 ve % 8 kireç oranları, B zemin için ise % 3, % 5, % 7 ve % 9 kireç oranları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.16'da sunulmuştur.

**Çizelge 3.16** Optimum kireç katkısı için S zemin ve B zemine ait pH analiz sonuçları

Karışım Kodu	pH Değerleri	Karışım Kodu	pH Değerleri
S2L	12.66	B3L	13.07
S3L	12.69	B5L	13.07
S4L	12.75	B7L	13.21
S5L	12.83	B9L	13.24
S6L	12.83	Not: Deneyler ASTM D6276-19 (2019) standardına uygun olarak yapılmıştır.	
S7L	12.84		
S8L	12.85		

S zemin ve B zemin için tüm kireç oranlarında pH değerleri 12.4'ten yüksek çıkmıştır. ASTM D6276-19 (2019) standardında konu ile ilgili olarak belirtilen özel durumda pH değeri 12.4'ten büyük olan numuneler için artan kireç yüzdesi ile elde edilen farkın 0.04'ten daha az olduğu durumdaki en düşük kireç yüzdesinin dikkate alınması gerekmektedir. Sonuçlar S zemin ve B zemin için bu kapsamda değerlendirildiğinde optimum kireç yüzdelerinin her iki zemin için de % 5 olduğu tespit edilmiştir. Hem literatür, hem pH analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde tez çalışması için % 3, % 5 ve % 7 kireç oranlarının kullanılmasına karar verilmiştir.

Kireç katkısı, % 30 kül içeren killi karışımlara da ilave edilmiştir. Kireç + uçucu kül katkılı karışımlarda, kireç miktarları % 3, % 5 ve % 7 olarak değişirken uçucu kül katkısı % 30 olarak sabit tutulmuştur. Bunun nedeni ise üç şekilde açıklanmıştır.

- Bu tez çalışmasında uçucu külün yüksek miktarda kullanılmasının amaçlanması ve yapılan ön çalışmalarda % 30 uçucu kül katkısının maksimum dayanım vermesi
- Yüksek hacimli uçucu kül katkısı kullanılmasının, gerek doğayı daha fazla atıktan kurtarma gerekse yol dolgusunda alt temel malzemesi olarak değerlendirilerek yol yapım maliyetlerini azaltma konusunda faydası olacaktır. Optimum katkı oranlarının belirlenmesi bu konuda önem arz etmektedir.
- Zemin + kireç + uçucu kül katkılı karışımlarda katkı oranlarının birebir aynı olması, farklı plastisiteye sahip 2 ayrı killi zemin ve karışımlarına ait dayanım özellikleri ve dayanım parametrelerinin değerlendirilmesinde mantık ve anlam bütünlüğü oluşturacaktır.

İlk iki maddede kireç katkısından bağımsız olarak uçucu kül katkı oranının % 30 olarak tercih edilmesinin nedeni açıklanmıştır. Son maddede ise zemin + uçucu kül + kireç karışımlarında % 30 kül katkısının sabit tutularak aynı kireç katkı oranı (% 3, % 5 ve % 7) grubunun her iki zemin için de kullanılmasının gerekliliği belirtilmiştir.

### **3.4 DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI**

Düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli kil ile bu killerin tüm karışımlarına ait optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları standart kompaksiyon deneyi ile belirlenmiştir. Standart kompaksiyon deneyi ASTM D698-12e2 (2012) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Tez için gerçekleştirilen dayanım deneylerinin tamamında standart kompaksiyon deneyinden elde edilen optimum su içeriği değerleri kullanılmıştır. Deneyde kullanılan numunelerin hepsi 200 numaralı elekten geçtiği için A tipine uygun olarak çapı 101.25 mm ve boyu 117 mm olan kalıp kullanılmıştır. Aynı tipte geçerli olan 3 tabaka ve her tabaka için 25 vuruş da standart kompaksiyon deneylerinde tercih edilmiştir. Kullanılan enerji ise yaklaşık olarak  $600 \text{ kN-m/m}^3$  olarak hesaplanmıştır. Bu enerji ile düşük plastisiteli killi zemin ve karışımları katkısız S zeminin optimum su içeriğinde, yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımları da B zeminine ait optimum su içeriğinde hazırlanmıştır. Buradaki önemli husus, hazırlanan tüm numunelere ait su içeriği değerlerinin optimum su içeriği ile optimum su içeriğinin % 95'i aralığında hazırlanmasıdır. Bu durumlar dikkate alınarak dayanım deneylerine ait numunelerin hazırlığı üç alt grupta değerlendirilmektedir. Birinci grupta serbest basınç, dolaylı çekme ve donma-çözülme sonrası serbest basınç deneyleri, ikinci grupta ise Kaliforniya taşıma oranı (CBR), lineer şişme, ani taşıma indeksi ve nemlilik şartları deneyi vardır.

Birinci grupta, detayları BS EN 13286-41 (2003) standardında verilen serbest basınç ve BS EN 13286-42 (2003) standardında verilen dolaylı çekme deneyleri mevcuttur. Bu deneylerde numunelerin hazırlanması için Harvard mini kompaktör ekipmanı kullanılmıştır. Bu ekipmanın kullanılmasının temel amacı, ince daneli zeminlerin yoğurularak hazırlanması ile numunenin her kısmına kompaksiyon etkisinin daha homojen dağılabilmesi ve daha az malzeme ile zamandan da tasarruf sağlamasıdır. Standart kompaksiyon deneyinde numuneye uygulanan enerjinin aynısının Harvard mini kompaktör ekipmanında da elde edilebilmesine yönelik olarak tabaka sayısı ve vuruşu belirlemek amacıyla bazı denemeler yapılmıştır. Yapılan bu denemeler ışığında tabaka sayısının 5 ve vuruş sayısının 10 olduğu durumda standart kompaksiyon deneyinden bulunan kuru yoğunluk değerine oldukça yakın değerler elde edilmiştir. Bu

durumlar göz önüne alınarak numuneler Harvard mini kompaktör ekipmanında hazırlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Şekil 3.22'de belirtilen numune hazırlama süreci uygulanmıştır.



**Şekil 3.22** Harvard numune hazırlama süreci a) Harvard mini kompaktör kalıbı b) Tokmak c) Numunenin sıkıştırılması d) Numunenin çıkarılması e) Numune boyut ölçümü.

Numuneler Şekil 3.22a'da görülen Harvard mini kompaktör kalıbına (kalıp hacmi yaklaşık  $60.73 \text{ cm}^3$ ) gevşek bir şekilde yerleştirilmiştir. Her tabakaya eşit miktarda numune (düşük plastisiteli kil içeren karışımlarda 30'ar gram iken; yüksek plastisiteli kil içeren karışımlarda 27'şer gram) konulmuştur. Numuneler Şekil 3.22b'deki tokmak ile 5 kademedeki 10 kez sıkıştırılarak hazırlanmış ve Şekil 3.22d'de görülen numune çıkarıcı ile çıkartılmıştır. Bu yöntem ile hazırlanan numunelerin çapı 33 mm ve boyu 71.5 mm'dir. Donma-çözülme numuneleri de aynı numune hazırlama sürecine tabi tutulmuştur.

CBR, lineer şişme ve ani taşıma indeksi deneylerindeki numuneler ise standart CBR kalıbında hazırlanmıştır. Bu deneylerin hepsi BS EN 13286-47 (2012) standardına göre

gerçekleştirilmiştir. CBR kalıbının iç çapı 152 mm ve yüksekliği 127 mm'dir. Deneyde kullanılan CBR kalıp hacminin ( $2304.52 \text{ mm}^3$ ) farklı olmasından kaynaklı standart kompaksiyon deneyinde verilen enerjinin aynısının ( $600 \text{ kN-m/m}^3$ ) uygulanması amacıyla tabaka ve vuruş sayıları sırasıyla 3 ve 61 olarak hesaplanmıştır. Tüm numuneler belirtilen CBR kalıplarında 3 tabaka ve her tabakaya 61 vuruş durumu dikkate alınarak sıkıştırılmak sureti ile hazırlanmıştır. Nemlilik şartları deneyi BS EN 13286-46 (2003) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Numuneler, ilgili su içeriklerinde nemlilik şartları kalıbında gevşek bir şekilde ve ilave enerjiye (kompaksiyon) yol açmamak amacıyla olabilecek en düşük yükseklikten kademe kademe yerleştirilerek deneye hazır hale getirilmiştir.

### **3.5 DAYANIM DENEYLERİ VE MİKRO ANALİZLER**

Bu bölümde, tez çalışmasında gerçekleştirilen dayanım deneyleri ve mikro analizlere ait detaylandırmalar sunulmuştur.

#### **3.5.1 Ani Taşıma İndeksi (IBI) Deneyi**

Ani taşıma indeksi (IBI) deneyi BS EN 13286-47 (2012) standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde numuneler CBR kalıbında hazırlanmıştır. Numunelere sürüş yükleri eklenmemiştir. Optimum su içeriğinde hazırlanan numuneler CBR kalıbında (iç çap 152 mm, yükseklik 127 mm) 3 tabaka ve her tabakaya 61 vuruş olacak şekilde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılmış numuneler 60 dakika kütleme sonucunda standart CBR deney cihazına yerleştirilmiştir. Deneyde penetrasyon hızı 1.27 mm/dak olarak uygulanmıştır. Bu şartlarda her penetrasyona karşılık kuvvet halkası değerinden yük değeri hesaplanır. Yük değerleri alana bölünerek gerilme değerleri belirlenir. Buna göre penetrasyon-gerilme grafiği çizilir. Deney sonunda ani taşıma indeksi hesaplanırken, deneye tabi tutulan numunenin 2.5 mm ve 5 mm penetrasyondaki gerilme değeri, kırmataş malzemesinin aynı penetrasyonlara denk düşen gerilme değerine oranlanarak % olarak belirlenmektedir. Elde edilen sonuçlar % 0 ile % 9 arasında ise en yakın % 0.5, % 9 ile % 29 aralığında en yakın % 1 ve % 29'dan büyük ise en yakın % 5 değerine yuvarlanarak rapor edilmektedir.

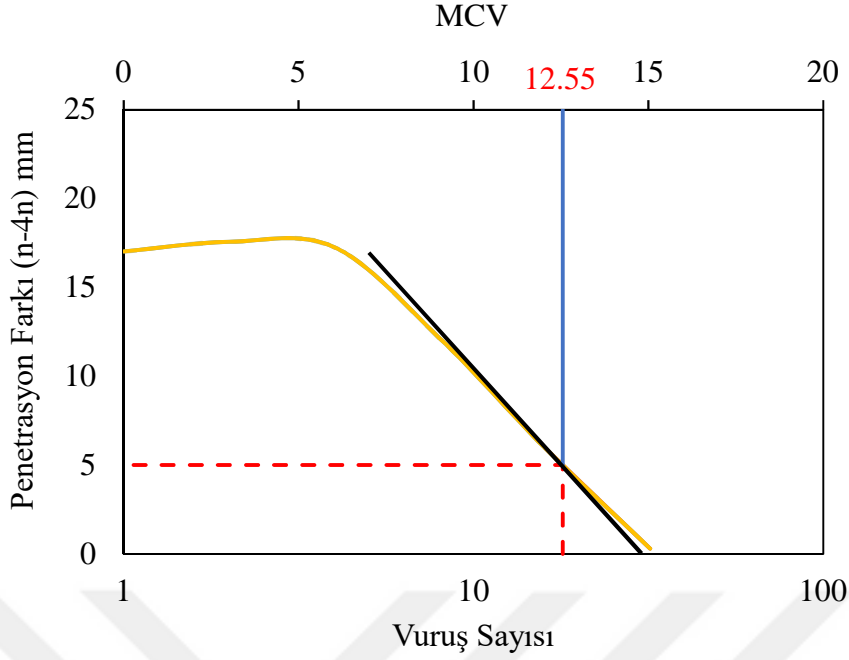
### 3.5.2 Nemlilik Şartları (MCV) Deneyi

Nemlilik şartları deneyi İngiliz Karayolları tarafından geliştirilmiştir. Deneyin geliştirilmesindeki amaç karayolundaki dolguların uygunluğunun test edilmesidir. Deneyin önemli avantajlarından birisi su içeriğini hesaplamanın zaman kaybına yol açmamasıdır (Parsons ve Boden 1979). Deney, vuruş sayısı cinsinden sıkışma veriminin belirlenmesini sağlar (BS EN 13286-46 2003). Deney için 20 mm elekten elenmiş 1.5 kg karışım numunesi alınır, gerekli su içeriğinde (optimum) karıştırılır ve Şekil 3.23'a daki deney kalıbına yerleştirilir. 97 mm çapında ve 7 kg ağırlığındaki tokmak 25 cm düşey mesafeden numune üzerine düşürülür. Bu enerji uygulandıktan sonra zeminde meydana gelen deformasyon sebebi ile bir sonraki vuruş öncesi vuruş yüksekliği enerjinin sabit kalması için yeniden 25 cm olarak ayarlanır. Vuruş sayıları 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 olacak şekilde tasarlanır. Her tasarlanan vuruş sayısı bittikten sonra penetrasyon Şekil 3.23c'de gösterildiği gibi kumpas ile ölçülerek not edilir. Buna göre hesaplanan tüm vuruş-penetrasyon değişimleri kayıt edilir.



**Şekil 3.23** Nemlilik şartları değeri deney süreci a) deney ekipmanı b) numune ve ahşap diskin kalıpla ekipmana sabitlenmesi c) penetrasyon ölçümü d) deney sonunda numune.

Deney sonuçları, vuruş sayısı (n) penetrasyon farkı olarak Şekil 3.24'de görüldüğü gibi noktalanır. Penetrasyon farkı ise herhangi bir vuruş sonrasında oluşan penetrasyon değeri ile vuruş sayısının 4 katındaki (4n) penetrasyon değerlerinin farkını gösterir.



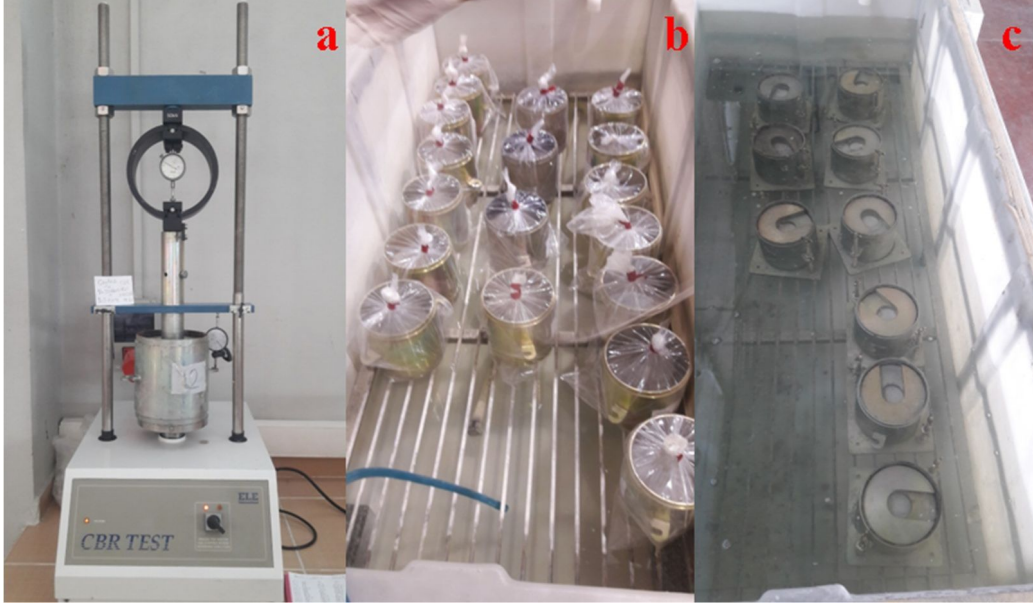
**Şekil 3.24** Tipik nemlilik şartları deneyi vuruş-penetrasyon farkı grafiği.

Penetrasyon farkı-vuruş sayısı değerleri ile oluşturulan egride 5 mm'ye yakın olan noktalardan mümkün olan en dik doğru çizilir. Çizilen doğru dan penetrasyon farkının 5 mm olduğu yere karşılık gelen MCV değeri Şekil 3.24'den okunur. Yöntem ile Şekil 3.24'de düşük plastisiteli killi (S) zemin için yapılan MCV deney sonucu görülmektedir. Buna göre 5 mm'ye karşılık gelen vuruş sayısı 18 olmuştur. MCV değeri ise BS EN 13286-46 (2003) standardında da belirtildiği gibi  $MCV = 10 \cdot \log(\text{vuruş sayısı})$  formülü ile hesaplanmaktadır. Bu hesaba göre ilgili S zeminin MCV değeri 12.55 olarak bulunmuştur.

Genellikle yol dolgularında uygunluk üst limiti olarak 6 vuruşa denk gelen  $MCV = 8$  değeri kullanılmaktadır. Bu yüzden 6 vuruş ve 24 vuruş arasındaki değişime bakılmaktadır. Penetrasyondaki değişim 5 mm'den fazla olursa malzeme uygun iken 5 mm'den az olursa uygun değildir (Davitt 1984). Genel bir kabul olarak  $MCV = 8.5$  değeri alt limit olarak kabul edilmektedir. Özel durumlar için MCV değerine ait limit 8.5'den farklı olabilmektedir. (Matheson and Winter 1997). Kazıdaki zeminin çok zayıf olduğu durumlarda fazla olan dolgu maliyetini azaltmak açısından değer azaltılabilirken, koşullar olumlu olduğunda da değeri yükseltmek hem güçlü zeminlerin seçilmesini hem de daha güvenli bir tasarım oluşturulmasını sağlar (Davitt 1984).

### 3.5.3 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

CBR deneyi, ASTM D1883 (2016) ve BS EN 13286-47 (2012) standartlarında belirtilen detaylandırmalara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde optimum su içeriğinde hazırlanmış numuneler 3 tabaka ve 61 vuruş esas alınarak standart CBR kalıbında sıkıştırılmıştır. Şekil 3.25'te CBR deney aşamaları verilmiştir.



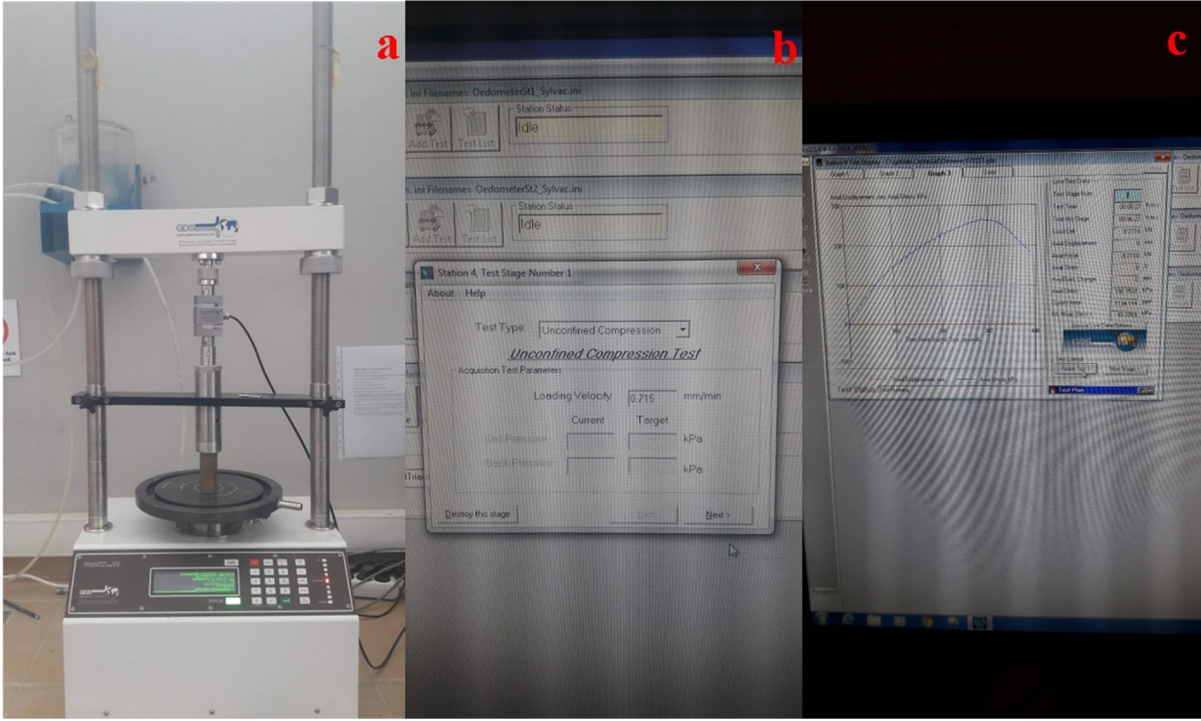
**Şekil 3.25** CBR deney düzeni a) CBR deney ekipmanı b) Numunelerin birinci kürlenme adımı için kür havuzuna yerleştirilmesi c) Numunelerin 4 gün boyunca suda bekleme süreci.

Sıkıştırılmış numuneler üzerine ani taşıma indeksinden farklı olarak yol dolgusunu temsil etmek amacıyla 2 adet sürşarj yükü (her biri 2.27 kg) konulmuştur. Şekil 3.25b'de görüldüğü gibi hazırlanan numuneler öncelikle 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilmiş olup daha sonra 4 gün boyunca tamamen su altında kürlenmeye tabi tutulmuştur. Süreç tamamlandıktan sonra numuneler Şekil 3.23a'da belirtilen standart CBR deney ekipmanına yerleştirilmiş ve deney hızı ani taşıma indeksindeki gibi 1.27 mm/dak olarak uygulanmıştır. Deney sonucunda çizilen grafikler, hesaplama yöntemi ve bulunan sonuçların raporlanması ani taşıma indeksi ile tamamen aynıdır.

### 3.5.4 Serbest Basınç (UCS) Deneyi

Serbest basınç deneyi numuneleri, optimum su içeriğinde Harvard mini kompaktör ekipmanında (hacmi 60.76 cm<sup>3</sup>) hazırlanmıştır. Harvard mini kompaktörde 5 tabaka ve her

tabakaya 10 vuruş mantığı ile sıkıştırılan numunelerde, Harvard tokmağı ile vuruş hızı ASTM D4609-08 (2008) standardında da önerildiği gibi 10 saniyede 15 vuruş olarak uygulanmıştır. Bu şartlarda hazırlanan numuneler 0, 7 ve 28 gün kür sürecine tabi tutulmuştur. Kürsüz durumdaki (0 gün kür) numuneler Şekil 3.26'da görülen otomatik GDS ekipmanına yerleştirilmiştir.



**Şekil 3.26** UCS deney düzeneği a) UCS deney cihazı b) Deney hızının sisteme girilmesi c) Örnek bir numunenin devam eden deneydeki grafiği.

Deney hızı, ASTM D2166/D2166M-16 (2016) standardında belirtilen % 0.5 ile % 2 yer değiştirme/dakika hızları arasından % 1 yer değiştirme/dakika olarak seçilmiştir. Numune boyları yaklaşık 71.5 mm olduğu için deney hızları Şekil 3.26b'de de görüldüğü gibi 0.715 mm/dak olarak kullanılmıştır. Deney sonunda yerdeğiştirme-yük grafiği elde edilmiştir. Grafikteki maksimum yük değeri numune alanına bölünmüş ve bu şekilde yerdeğiştirme-gerilme grafikleri elde edilerek numunenin serbest basınç dayanımı tespit edilmiştir.

### 3.5.5 Lineer Şişme Deneyi

Lineer şişme deneyi BS EN 13286-47 (2012) standardında belirtilen detaylandırmalara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Standart CBR kalıplarında hazırlanan şişme numuneleri, optimum su içeriğinde CBR deneyinde olduğu gibi 3 tabaka ve 61 vuruşta sıkıştırılmıştır. Numuneler

üzerine sürşarj yükleri (2.27'şer kg olmak üzere 2 tane) yerleştirilmiştir. Deneyin ilk kürlenme sürecinde numuneler 28 gün boyunca özel kaplama ile içeri hava girişine izin vermeyen bir kür havuzunda bekletilmiştir. Daha sonra tamamen su altında kürlenme olan ikinci aşamada numunelerin üzerine tripotlar ile şişme ölçmek amacıyla deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir. Su seviyesi yükseltilmiş ve kalıbın içi de tamamen su ile doldurulduktan sonra kalıp yüksekliğini az miktar geçecek şekilde dengede tutulmuştur. Su seviyesinin daha fazla yükseltilmemesinin sebebi ise ölçme esnasında tripotların su hareketinden dolayı yerinden oynamasının engellenmesidir. Şişme değerleri suda bekleme sürecinde Şekil 3.27'de gösterilen deformasyon ölçerler ile belirli aralıklarda ölçülmüştür.



**Şekil 3.27** Şişme ölçümü için kalıpların suya gömülmesi.

Takip edilen deformasyon ölçer okumalarından, numunelerin şişmesinin tamamlandığına karar verildiğinde deney bitirilerek şişme zamanı ve şişme miktarı (mm) değişimleri grafik üzerinde noktalanmıştır. Şişme yüzdesi ise en yüksek şişme değerinin CBR kalıbının yüksekliğine bölünmesi ile bulunmuştur.

### 3.5.6 Dolaylı Çekme (ITS) Deneyi

BS EN 13286-42 (2003) standardında detayları verilmiş olan dolaylı çekme deneyi, yapısal kusurların incelenebilmesi açısından önemlidir. Dolaylı çekme deneyi numuneleri de aynı serbest basınç deneyi numuneleri gibi Harvard mini kompaktör ekipmanı ile optimum su içeriğinde hazırlanmıştır. Serbest basınç deneyinde olduğu gibi hazırlanan numuneler cihaza yerleştirilirken bu sefer yatay bir şekilde konumlandırılmaktadır. Deney hızı ise bu deneyde numune çapı boy olarak değerlendirildiğinde dakikada % 1 deformasyon oluşturulacak bir hız olarak seçilmiştir. Kür süresinin etkisinin incelenmesi açısından 0, 7 ve 28 gün kür sürelerinde dolaylı çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonunda elde edilen eksenel deformasyon-yük grafiğinden maksimum kuvvet bulunmaktadır. Dolaylı çekme dayanımı ise aşağıda verilen denklem 3.1 ile hesap edilmektedir.

$$R_{it} = \frac{2F}{\pi HD} \quad (3.1)$$

Burada

- $R_{it}$ : Dolaylı çekme dayanımı (kPa)  
F: Uygulanan maksimum kuvvet (kN)  
H: Numunenin yüksekliği (m)  
D: Numunenin çapı (m)

### 3.5.7 Donma Çözülmeli UCS Deneyi

Bu deneyde numuneler ASTM D560/560M-16 (2016) standardı kapsamında detayları verilen doğrultuda hazırlanmıştır. Harvard mini kompaktörde serbest basınç deneyi hazırlama prosedürünün aynısı izlenmiştir. Daha sonra 28 gün küre tabii tutulan numuneler, ilgili standarda göre öncelikle 24 saat - 23°C'de donma-çözülme kabini içinde dondurulmuş, daha sonra 23 saat boyunca  $23 \pm 2$  °C'de çözülmeye maruz bırakılmıştır. Standartta göre donma-çözülme çevriminin 12 kez tekrar edilmesi gerekmektedir. Bu şartlar altında deneyi hazır hale getirmiş numuneler, otomatik kontrollü GDS cihazına yerleştirilmiştir. Deney hızı, deney sonunda elde edilen grafikler ve deney sonucunda bulunanlar serbest basınç deneyi ile birebir aynıdır.

### 3.5.8 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

SEM analizleri Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Bu analizde FEI marka, QUANTA450FEG Model cihaz kullanılmıştır. Tüm numuneler etüvde 60 derecede kurutulduktan sonra toz haline getirilmiştir. Numuneler 11 kV voltaj değerinde ve farklı büyütme değerlerinde (100, 500, 1000, 2500, 5000, 10000 ve 20000) analize tabi tutulmuştur.

### 3.5.9 X Işınları Difraksiyonu (XRD) Analizi

XRD analizleri Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Bu analizde PANalytical marka Empyrean model cihaz kullanılmıştır. Cihazda zeminler ve karışımlarının içindeki minerallerin tespit edilmesi amacıyla 2 teta açısı 5 derece ile 70 derece arasında tutulmuş ve bu açılar arasında bulunan pikler QualX2 yazılımı ile tespit edilmiştir. Tüm numuneler etüvde 60 derecede kurutulduktan sonra toz halinde analiz edilmiştir.

### 3.5.10 X Işınları Floresansı (XRF) Analizi

XRF analizleri Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Bu analizde PANalytical marka, Epsilon5 model cihaz kullanılmıştır. Zeminler ve karışımlarına ait kimyasal bileşenleri yüzdece tespit etmek amacıyla bu analiz gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler etüvde 60 derecede kurutulduktan sonra toz halinde analiz edilmiştir.

### 3.5.11 Termogravimetri (TGA) Analizi

TGA analizleri Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Bu analizde Exstar Marka, TG/DTA 7200 SII model cihaz kullanılmıştır. Bu cihazda yapılan analizlerde sıcaklığa bağlı kütle yüzdesini belirlemek amacıyla okuma hızları "**0.5 saniye/1 okuma**" olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu okumalar sıcaklığın maksimum **800** derece olması durumu için ayarlanmıştır. Bu durumun sebebi ise literatürde de gözlendiği gibi kütle kayıplarının 700 dereceden sonra oldukça

azalmasıdır (Al-Mukhtar vd. 2012, Maubec vd. 2017, Chaudhuri vd. 2020). Tüm numuneler etüvde 60 derecede kurutulduktan sonra toz halinde analiz edilmiştir.

### 3.6 DENEY PROGRAMI

Tez kapsamında yapılan dayanım deneyleri ve mikro analizlerin hangi karışımlar üzerinde uygulandığına ait detaylı bilgi Çizelge 3.17'de sunulmuştur. S zemin, B zemin ve karışımları üzerinde serbest basınç (UCS), donma-çözülme sonrası serbest basınç (UCS\_FT), dolaylı çekme (ITS), nemlilik şartları (MCV), Kaliforniya taşıma oranı (CBR), ani taşıma indeksi (IBI) ve lineer şişme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylere ek olarak da mikro özelliklerin değerlendirilmesi amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), X ışınları kırınımı (XRD), X ışınları floresansı (XRF) ve Termogravimetri (TGA) analizleri gerçekleştirilmiştir. Dayanım deneylerinden UCS ve ITS deneyleri; 0, 7 ve 28 gün kür süresi için her iki zemin ve tüm karışımlarına uygulanmıştır. MCV ve IBI deneyleri ise deneylerin kendisinden kaynaklı olarak kür süresiz (0 gün) olarak tüm karışımlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. CBR deneyi ise tüm karışımlar için 28 gün havada ve sonra 4 gün suda kürlenme süreci sonucunda tüm karışımlar üzerinde yapılmıştır. Lineer şişme deneyi de CBR deneyindeki gibi 28 gün havada kürlenmeden sonra suda kürlenmeye tabi tutulmuş olan bütün karışım numunelerine uygulanmıştır. Donma-çözülme sonrası serbest basınç deneyi seçili karışımlar (S, S30FA, S5L, S30FA5L, B, B30FA, B5L ve B30FA5L) için 28 gün kür süresinden sonra çeşitli donma-çözülme çevrimleri (2, 4, 6, 8 ve 12) için gerçekleştirilmiştir. Mikro yapının değerlendirilmesi için ise donma-çözülme sonrası serbest basınç deneyinde kullanılan karışımlara ek olarak uçucu kül ve kireç katkılarının kendisine de ilgili analizler yapılmıştır. Mikro analizler; zeminler (S ve B) ve katkıları (uçucu kül ve kireç) için 0 gün kür süresinde, diğer karışımlar için ise 28 gün kürlü durumda gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 3.17** Dayanım deneyleri ve mikro analizler.

KARIŞIMLAR	DAYANIM DENEYLERİ							MİKRO ANALİZLER
	UCS	UCS_FT	ITS	MCV	CBR	IBI	SISME	SEM, XRD, XRF, TGA
S	X	X	X	X	X	X	X	X
S5FA	X		X	X	X	X	X	
S10FA	X		X	X	X	X	X	
S15FA	X		X	X	X	X	X	
S20FA	X		X	X	X	X	X	
S30FA	X	X	X	X	X	X	X	X
S3L	X		X	X	X	X	X	
S5L	X	X	X	X	X	X	X	X
S7L	X		X	X	X	X	X	
S30FA3L	X		X	X	X	X	X	
S30FA5L	X	X	X	X	X	X	X	X
S30FA7L	X		X	X	X	X	X	
B	X	X	X	X	X	X	X	X
B5FA	X		X	X	X	X	X	
B10FA	X		X	X	X	X	X	
B15FA	X		X	X	X	X	X	
B20FA	X		X	X	X	X	X	
B30FA	X	X	X	X	X	X	X	X
B3L	X		X	X	X	X	X	
B5L	X	X	X	X	X	X	X	
B7L	X		X	X	X	X	X	
B30FA3L	X		X	X	X	X	X	
B30FA5L	X	X	X	X	X	X	X	X
B30FA7L	X		X	X	X	X	X	
Uçucu Kül								X
Kireç								X

Yapılan dayanım deneylerine ait sayısal bilgilendirme Çizelge 3.18'de verilmiştir. Buna göre 2 farklı zemin için 216 serbest basınç, 216 dolaylı çekme, 120 donma-çözülme sonrası serbest basınç, 72'şer tane nemlilik şartları, ani taşıma, CBR ve lineer şişme olmak üzere toplam 840 dayanım deneyi gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 3.18** Dayanım deney detayı ve kür süreleri.

Deney Adı	Dayanım Deneyleri ve Sayısı				
	Kür Süresi				ARA TOPLAM
	0 gün	7 gün	28 gün	28 gün + suda bekleme	
UCS	2*3*12 = 72	2*3*12 = 72	2*3*12 = 72	X	216
ITS	2*3*12 = 72	2*3*12 = 72	2*3*12 = 72	X	216
UCS-FT	X	X	2*3*4*5 = 120	X	120
MCV	2*3*12 = 72	X	X	X	72
IBI	2*3*12 = 72	X	X	X	72
CBR	X			2*3*12 = 72	72
SISME				2*3*12 = 72	72
GENEL TOPLAM					840
<p>NOT: a*b*c*d olarak verilen ifadeler sırasıyla şu şekilde değerlendirilmiştir.  a = Zemin sayısı (S ve B zemin olarak toplam 2)  b = Deneye tabi tutulan numune sayısı (Üçer kez tekrar olduğu için 3)  c = Saf uçucu kül ve saf kireç hariç tüm karışımların sayısı = 12  d = Donma-çözülme çevrimleri adeti (2, 4, 6, 8 ve 12 olmak üzere toplam 5 farklı)</p>					

Mikro analizlere ait detaylandırma ise Çizelge 3.19'da sunulmuştur. Buna göre S zemin, B zemin, uçucu kül ve kireç katkıları için kürsüz durumda (0 gün), 4'er adet SEM, XRD, XRF ve TGA olmak üzere toplam 16 analiz gerçekleştirilmiştir. Seçili karışımlar (S30FA, S5L, S30FA5L, B30FA, B5L ve B30FA5L) üzerinde ise 28 gün kür süresinden sonra her bir analizden 6'şar adet olacak şekilde toplam 24 mikro analiz yapılmıştır.

**Çizelge 3.19** Mikro analiz sayısı ve kür süresi detayları.

Analiz Adı	Mikro Analiz Deneyleri ve Sayısı		
	Kür Süresi		TOPLAM
	0 gün	28 gün	
SEM	4*1 = 4	2*3 = 6	10
XRD	4*1 = 4	2*3 = 6	10
XRF	4*1 = 4	2*3 = 6	10
TGA	4*1 = 4	2*3 = 6	10
GENEL TOPLAM			40
0 gün kür süresine ait numuneler : S, B, Uçucu kül ve Kireç			
28 gün kür süreli numuneler : S30FA, S5L, S30FA5L, B30FA, B5L, B30FA5L			



## BÖLÜM 4

### DENEYSEL SONUÇLAR

#### 4.1 GİRİŞ

Bu bölümde düşük plastisiteli killi zemin ve yüksek plastisiteli killi zemin ile karışımlarına ait dayanım deneyleri sonuçları verilmiştir. Bu dayanım deneyleri serbest basınç, donma-çözülme sonrası serbest basınç, dolaylı çekme, nemlilik şartları, ani taşıma indeksi, Kaliforniya taşıma oranı ve şişme deneyleridir.

#### 4.2 SERBEST BASINÇ DENEY SONUÇLARI

Düşük plastisiteli killi zemin ve yüksek plastisiteli killi zemin ile karışımlarına ait serbest basınç deney sonuçları aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır. Deneylerde her 10 saniyede bir deformasyon ve yük ölçümü alınmıştır. Buna göre deneysel verilerin elde edilmesi için yaklaşık her 0.1187 mm'de bir ölçüm yapılmıştır. Bu sayede yapılan deneysel tekrarların ortalamasını almak mümkün hale gelmiştir. Aşağıda verilen sonuçlar her kür süresinde yapılan 3 adet tekrarın ortalaması olarak çizilmiştir.

##### 4.2.1 Düşük Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar

S zemine ve uçucu kül katkılı karışımlara ait eksenel deformasyon-gerilme grafikleri bu bölümde sunulmuştur. Grafiklerde gösterilen lejantlarda parantez dışındaki 0, 7 ve 28 sayıları ilgili zemine ait kür sürelerini temsil etmektedir. Çizelge 4.1'de S zemin, S30FA, S5L ve S30FA5L karışımlarına ait serbest basınç deney sonuçları gösterilmiştir. Burada UCS ifadesi serbest basınç dayanımını; E elastisite modülünü ve  $\epsilon$  ise kırılma anındaki yüzde eksenel deformasyonu göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde S zemin, S30FA, S5L ve S30FA5L karışımları için kür süresi arttıkça elastisite modülü değerleri artmıştır. Tipik S zemin için 0, 7 ve 28 gün kür süresinde elastisite modülü değerleri sırasıyla 7771, 9358 ve 15081 kPa olarak

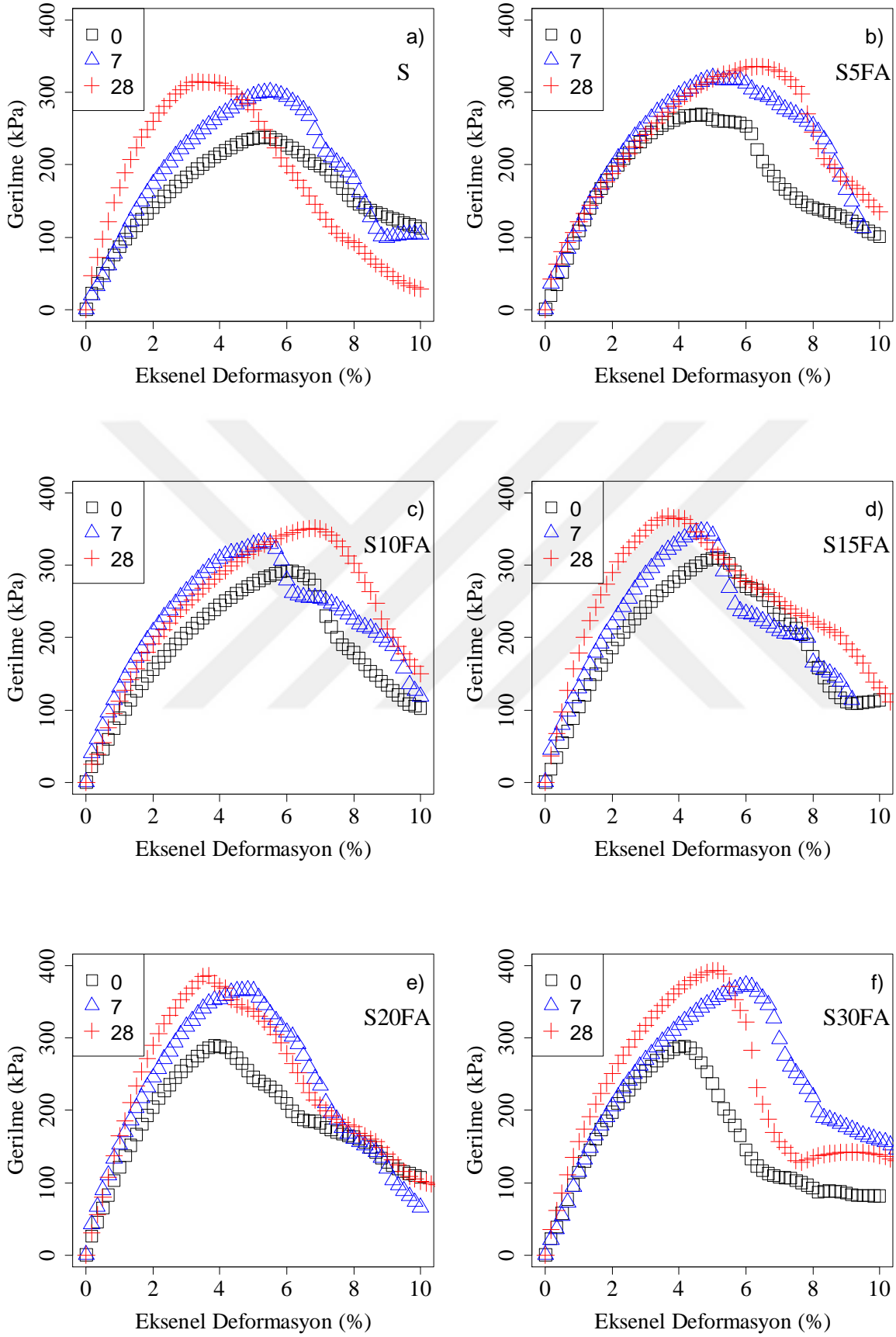
bulunmuştur. S5L karışımında ise 0, 7 ve 28 gün kür sürelerinde elde edilen elastisite modülleri sırasıyla 25568, 32820 ve 63663 kPa olmuştur. Kırılma anındaki  $\epsilon$  değerleri S zeminde 0, 7 ve 28 gün kürde % 3.33 ile % 5.50 aralığında, S5L karışımında ise % 2.33-3.67 aralığında değişmektedir.



Çizelge 4.1 S zemine ve seçili karışımlarına ait serbest basınç deney sonuçları.

Kür	Numune	S			S30FA			S5L			S30FA5L		
		UCS (kPa)	E (kPa)	$\epsilon$ (%)	UCS (kPa)	E (kPa)	$\epsilon$ (%)	UCS (kPa)	E (kPa)	$\epsilon$ (%)	UCS (kPa)	E (kPa)	$\epsilon$ (%)
0	1	253.33	7055	4.83	275.97	11281	4.50	453.01	27720	3.83	465.70	23226	3.17
	2	244.54	8323	4.67	287.90	10681	4.17	445.26	25888	4.00	483.84	25446	2.83
	3	217.01	7934	5.50	301.82	12709	3.83	498.17	23096	3.67	499.56	29185	2.50
	<b>Ort.</b>	238.30	7771	5.33	288.56	11557	4.17	465.48	25568	3.83	483.03	25952	2.83
7	1	284.81	9275	5.33	379.23	12464	5.50	600.66	32220	3.67	769.11	45439	2.67
	2	299.47	9718	5.83	373.31	10565	6.17	550.16	33270	3.67	786.00	47754	2.50
	3	318.28	9081	5.33	368.83	11633	6.33	581.16	32969	3.67	801.72	37292	2.33
	<b>Ort.</b>	300.85	9358	5.50	373.79	11554	6.00	577.33	32820	3.67	785.61	43495	2.50
28	1	325.48	17173	3.17	401.57	13391	4.83	696.22	54114	2.00	945.02	41794	2.50
	2	315.49	13037	3.50	394.84	16070	5.67	737.46	69349	2.50	926.85	48811	2.67
	3	304.20	15033	3.33	384.12	14995	5.00	726.44	67525	2.50	994.37	53758	2.33
	<b>Ort.</b>	315.06	15081	3.33	393.51	14819	5.17	720.04	63663	2.33	955.41	48121	2.50

S zemine ve uçucu kül katkılı karışımlarına ait ayrıntılı sonuçlar Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.1 UCS deney sonuçları a) S b) S5FA c) S10FA d) S15FA e) S20FA f) S30FA

Buna göre S zemin numunelerinin 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, aksenal deformasyonun % 5.33 olduğu yerde  $238.30 \pm 15.47$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $300.85 \pm 13.70$  kPa değerine yükselirken, aksenal deformasyon ise 0 gün kürdekine yakın olarak % 5.50 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha düşük bir aksenal deformasyonda (% 3.33) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $315.06 \pm 8.69$  kPa olarak bulunmuştur. Tüm kür süreleri için geçerli olmak üzere sünek kırılma mevcuttur. Deformasyonun % 10 olması ile 0 gün kürlü S zeminin gerilme değeri, maksimum değerinin 0.47 katı iken, 7 gün kürde 0.35 katına ve 28 gün kürde 0.09 katına kadar düşmüştür.

S5FA kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.1b incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, aksenal deformasyonun % 4.67 olduğu yerde  $269.89 \pm 10.10$  kPa olarak bulunmuştur. 7 günlük kür süresinde serbest basınç dayanımı  $320.33 \pm 11.00$  kPa değerine yükselirken, bu dayanıma ait aksenal deformasyon ise 0 gün kürdekine yakın olarak % 5.00 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha yüksek bir aksenal deformasyonda (% 6.33) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $335.71 \pm 11.57$  kPa olarak bulunmuştur. S5FA karışımında tüm kür süreleri için kırılma tipi (sünek) benzerdir. Deformasyonun % 10'a çıkması ile gerilme değeri 0 gün kür süresinde serbest basınç dayanımının 0.37 katı iken, 7 gün kür süresinde 0.35 katına düşmüş, 28 gün kür süresinde ise 0.40 katına çıkmıştır.

S10FA kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.1c incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, aksenal deformasyonun % 6.00 olduğu yerde  $292.11 \pm 15.59$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $332.43 \pm 12.24$  kPa değerine yükselirken, aksenal deformasyon ise 0 gün kürdekinden daha düşük olarak % 5.33 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha yüksek bir aksenal deformasyonda (% 6.83) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $351.21 \pm 9.06$  kPa olarak bulunmuştur. S10FA karışımında tüm kür süreleri için kırılma tipi (sünek) benzerdir. Deformasyonun % 10'a çıkması

ile gerilme değeri 0 gün kür süresinde serbest basınç dayanımının 0.35 katı iken, 7 gün kür süresinde 0.36 katına ve 28 gün kür süresinde 0.43 katına çıkmıştır.

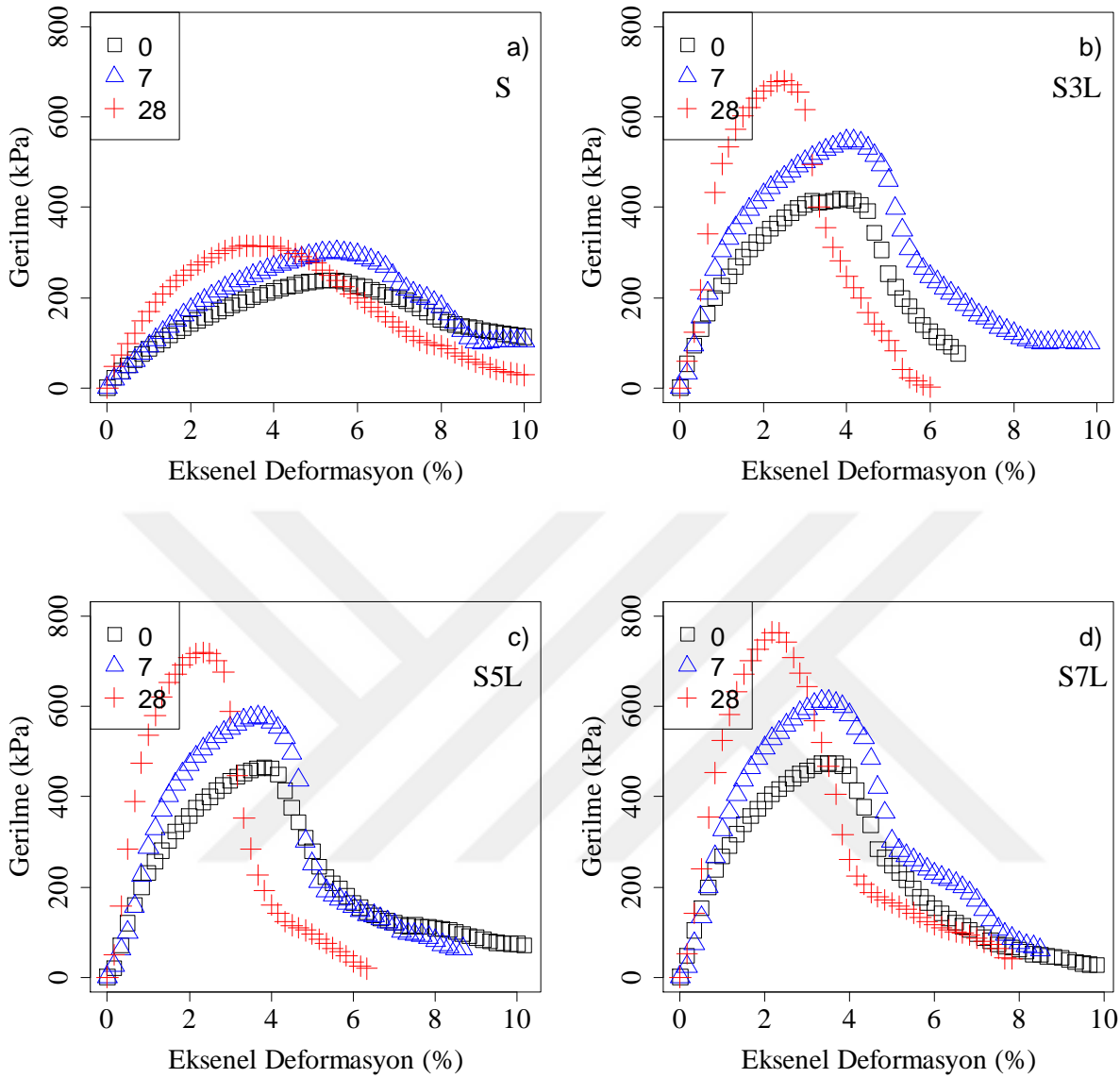
S15FA kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.1d incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 5.17 olduğu yerde  $310.24 \pm 2.58$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $347.29 \pm 6.80$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekine yakın olarak % 4.67 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha düşük bir eksenel deformasyonda (% 3.67) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $367.53 \pm 5.31$  kPa olarak bulunmuştur. Deformasyonun % 10 olması ile 0 gün kürlü S zeminin gerilme değeri, maksimum serbest basınç dayanımı değerinin 0.37 katı iken, 7 gün kürde 0.33 katına ve 28 gün kürde 0.30 katına kadar düşmüştür.

S20FA kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.1e incelendiğinde, kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 3.83 olduğu yerde  $289.60 \pm 3.23$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $366.20 \pm 10.09$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekinden daha yüksek olarak % 4.83 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımı, 0 gün kür süresine yakın olacak şekilde eksenel deformasyonun % 3.67 olduğu yerde elde edilmiştir. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $386.47 \pm 9.68$  kPa olarak bulunmuştur. Kırılma tipleri açısından kür süreleri arasında farklılık olmamış, tüm kür sürelerinde sünek kırılma gözlenmiştir. 0 gün kür süresinde artan eksenel deformasyon ile gerilme azalımı daha yavaş iken 7 ve 28 gün kür süresinde daha hızlıdır. Eksenel deformasyonun % 10'a çıkması ile gerilme değeri 0 gün kür süresinde serbest basınç dayanımının 0.37 katı iken, 7 gün kür süresinde 0.18 katına düşmüştür. 28 gün kür süresinde 7 güne göre daha yüksek bir değerde olup, 0.26 katına çıkmıştır.

S30FA kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.1f incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç

dayanımı, eksenel deformasyonun % 4.17 olduğu yerde  $288.56 \pm 10.56$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $373.79 \pm 4.26$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekinden daha yüksek olarak % 6.00 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına 0 gün kür süresinden daha yüksek bir deformasyonda (% 5.17) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $393.51 \pm 7.19$  kPa olarak bulunmuştur. S30FA kodlu karışımda tüm kür süreleri için sünek bir kırılma gözlenmektedir. Eksenel deformasyon % 8'e ulaştığında 0 gün kürlü karışımda gerilme neredeyse sabitlenmiştir. Kür süresi 7 güne çıktığında ise aynı deformasyon seviyesinden sonra gerilmenin azalma hızında yavaşlama gözlenmiştir. 28 gün kür süresinde ise % 8 ile % 10 eksenel deformasyon arasında numunenin gerilme değeri önce düşük miktarda bir artış göstermiş, sonra bir süre sabit değerde gidip tekrar düşük bir azalış göstermiştir. Eksenel deformasyonun % 10'a çıkması ile gerilme değeri serbest basınç dayanımının 0 gün kür süresinde 0.28 katı iken, 7 gün kür süresinde 0.42 katına yükselmiştir. 28 gün kür süresinde 7 güne göre daha düşük bir değerde olup, 0.35 katına çıkmıştır.

S zemine ve kireç katkılı karışımlara ait eksenel deformasyon-gerilme grafikleri Şekil 4.2'de sunulmuştur. S3L kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.2b incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 4.00 olduğu yerde  $419.80 \pm 25.63$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $547.04 \pm 19.07$  kPa değerine yükselirken, bu dayanıma ait eksenel deformasyon ise 0 gün kürlü durumla aynı (% 4.00) olmuştur. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha düşük bir eksenel deformasyonda (% 2.50) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $680.66 \pm 32.95$  kPa olarak bulunmuştur. Özellikle 28 gün kür süresi tipik bir gevrek kırılmaya işaret etmektedir. Ayrıca ilgili grafikte 28 gün kür süresinde başlangıç elastisite modülünün 0 ve 7 gün kürlü durum ile karşılaştırıldığında önemli oranda yükseldiği göze çarpmaktadır. Eksenel deformasyonun % 6'ya çıkması ile gerilme değeri 0 gün kür süresinde serbest basınç dayanımının 0.30 katı iken, 7 gün kür süresinde 0.45 katına yükselmiştir. 28 gün kür süresinde 7 güne göre daha düşük bir değerde olup, 0.003 katına düşerek neredeyse sıfırlanmıştır.



**Şekil 4.2** UCS deney sonuçları a) S b) S3L c) S5L d) S7L.

S5L kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.2c incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, aksnel deformasyonun % 3.83 olduğu yerde  $465.48 \pm 23.33$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $577.33 \pm 20.79$  kPa değerine yükselirken, aksnel deformasyon ise 0 gün kürdekine yakın olarak % 3.67 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha düşük bir aksnel deformasyonda (% 2.33) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $720.04 \pm 17.44$  kPa olarak bulunmuştur. S5L kodlu karışımda kür

süresinin artması ile kırılma tipi gevrekliğe doğru bir geçiş yapmıştır. Başlangıç elastisite modülü, kür süresinin 28 güne ulaşması ile belirgin şekilde artmıştır. Eksenel deformasyonun % 6'ya çıkması ile gerilme değeri 0 gün kür süresinde serbest basınç dayanımının 0.35 katı iken, 7 gün kür süresinde 0.27 katına düşmüştür. 28 gün kür süresinde 7 güne göre daha düşük bir değerde olup, 0.05 katına düşerek neredeyse 34.58 kPa değerine gelmiştir.

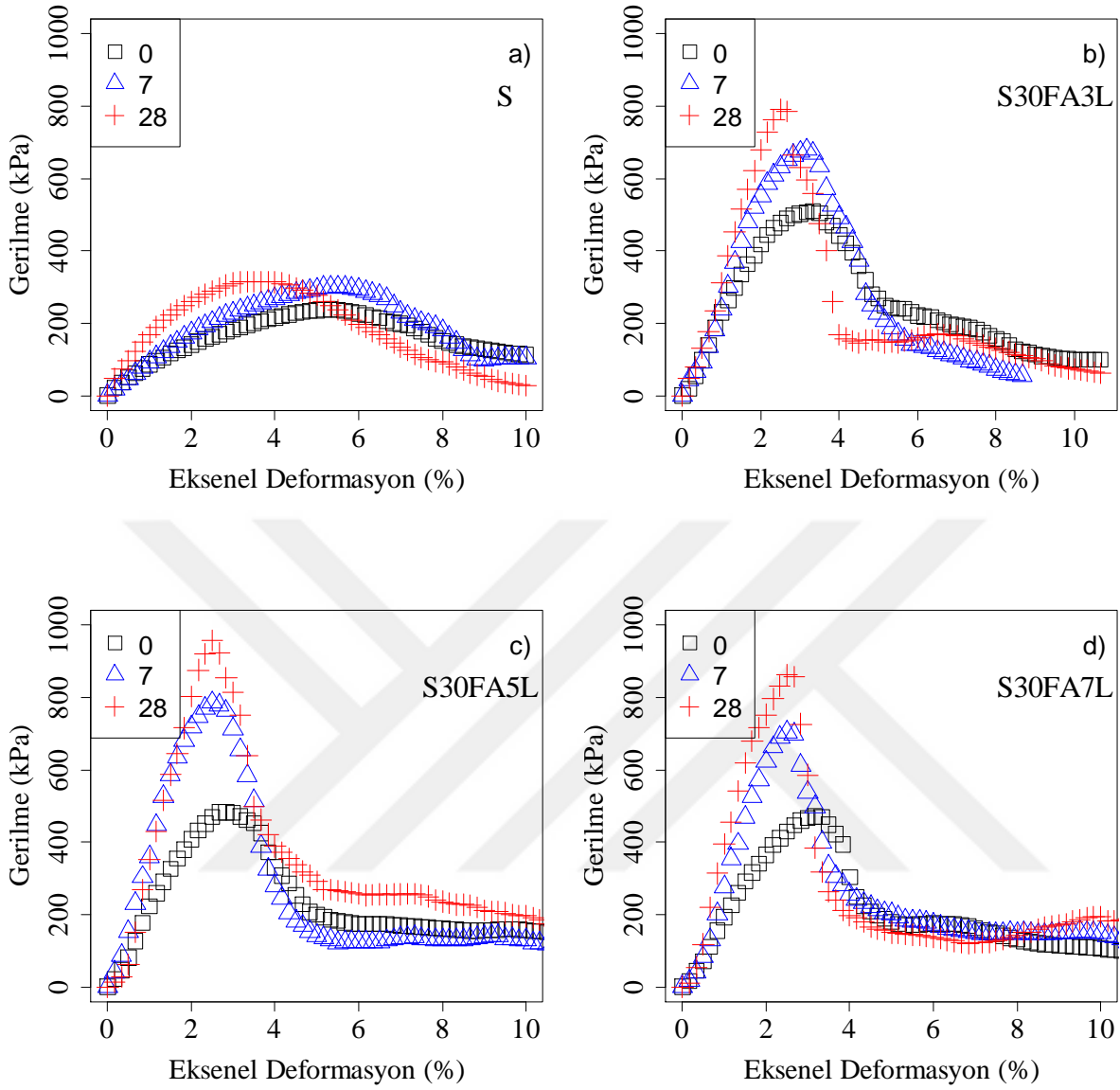
S7L kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.2d incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 3.50 olduğu durumda  $474.89 \pm 19.74$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $611.82 \pm 4.04$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekine yakın olarak % 3.33 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha düşük bir eksenel deformasyonda (% 2.17) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $764.68 \pm 38.46$  kPa olarak bulunmuştur. S7L kodlu karışımda 0 ve 7 gün kür süresinde gevrek bir kırılmanın varlığı gözlenmiştir. Bunun yanında 28 günlük numunelerde kırılma daha da gevrekleşmiştir. Başlangıç elastisite modülü, kür süresinin 28 güne ulaşması ile belirgin şekilde artmıştır. Eksenel deformasyonun % 6'ya çıkması ile gerilme değeri 0 gün kür süresinde serbest basınç dayanımının 0.32 katı iken, 7 gün kür süresinde 0.37 katına yükselmiştir. 28 gün kür süresinde 7 güne göre daha düşük bir değerde olup, 0.15 katına gelmiştir.

S zemin ile uçucu kül ve kireç katkılı karışımlara ait eksenel deformasyon-gerilme grafikleri Şekil 4.3'de sunulmuştur. S30FA3L kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.3b incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 3.33 olduğu durumda  $516.32 \pm 18.21$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $679.39 \pm 15.97$  kPa değerine yükselirken, ilgili dayanıma ait eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekine yakın olarak % 3.17 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha düşük bir eksenel deformasyonda (% 2.50) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $797.92 \pm 20.55$  kPa olarak bulunmuştur. S30FA3L kodlu karışımda tüm kür süreleri için kırılma tipi sünek olarak görülmektedir. Eksenel deformasyonun % 6'ya çıkması ile gerilme değeri 0 gün kür süresinde

serbest basınç dayanımının 0.32 katı iken, 7 gün kür süresinde 0.37 katına yükselmiştir. 28 gün kür süresinde 7 güne göre daha düşük bir değerde olup 0.15 katına gelmiştir.

S30FA5L kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.3c incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 2.83 olduğu durumda  $483.03 \pm 13.84$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $785.61 \pm 13.31$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekine yakın olarak % 2.50 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına 7 gün kür süresi ile aynı eksenel deformasyonda (% 2.50) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $955.41 \pm 28.53$  kPa olarak bulunmuştur.

S30FA7L kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.3d incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 3.17 olduğu durumda  $471.50 \pm 18.88$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $704.93 \pm 25.11$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekinden daha düşük olarak % 2.50 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına 7 gün kür süresi ile aynı eksenel deformasyonda (% 2.50) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $861.37 \pm 10.33$  kPa olarak bulunmuştur.



**Şekil 4.3** UCS deney sonuçları a) S b) S30FA3L c) S30FA5L d) S30FA7L.

S zemin ve karışımlarına ait genel bir değerlendirme yapılırsa, uçucu kül katkılı karışımların ve S zeminin daha sünek bir kırılma yaptığı gözlenmiştir. Numuneye sadece kireç karıştırıldığında ise kırılma gevrekleşmektedir. Uçucu kül ve kirecin katkı olarak birlikte kullanıldığı durumlarda ise, sadece kireçli karışımların aksine kırılma daha sünek olmaktadır. Bu durum dikkate alındığında uçucu kül + kireç içeren karışımların sünek davranışı yüksek aksel deformasyonlarda dahi önemli bir dayanıma sahip olduğunu gösterirken gevrek davranış gösteren kireçli karışımlarda ise belirli bir aksel deformasyon değerinden sonra dayanım neredeyse sıfırlanmaktadır. Örneğin uçucu kül içermeyen kireç katkılı karışımlar için aksel deformasyonun % 6'ya ulaştığı durumda özellikle S3L ve S5L kodlu olanlarda ciddi dayanım

azalmaları gözlenmiş olup, gerilme değerleri neredeyse sıfıra yakın (maksimum dayanımın 0.003 ve 0.05 katı) olmuştur. Hem uçucu kül hem kireç içeren karışımlarda ise S30FA5L ve S30FA7L kodlu karışımlar incelendiğinde, deformasyon % 5'e ulaştıktan sonra gerilmelerin 200 kPa civarında olduğu ve deformasyonun % 10'a ulaşması ile de neredeyse sabit kaldıkları görülmektedir. Bu değer ilgili karışımların maksimum dayanım değerlerinin 0.21 ile 0.23 katıdır. Bu durumlar dikkate alındığında serbest basınç dayanımı açısından uçucu kül-kireç kombinasyonunun, sadece kireç katkısına göre daha verimli olduğu kanaatine varılmıştır.

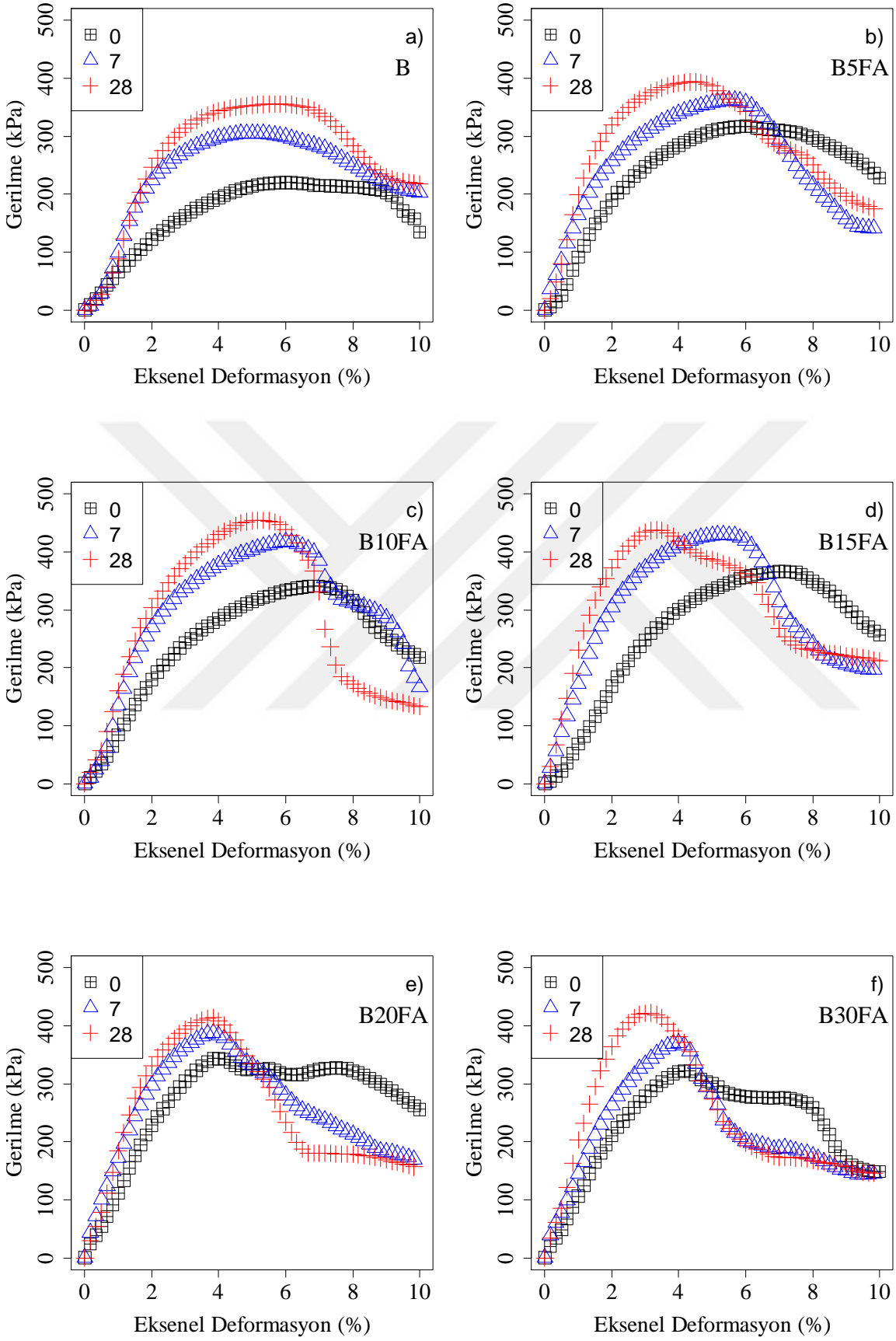
#### **4.2.2 Yüksek Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar**

B zemin ve uçucu kül katkılı karışımlarına ait serbest basınç deney grafikleri bu bölümde sunulmuştur. Grafiklerde gösterilen lejantlarda parantez dışındaki 0, 7 ve 28 sayıları ilgili zemine ait kür sürelerini temsil etmektedir. Çizelge 4.2'de B zemin, B30FA, B5L ve B30FA5L karışımlarına ait serbest basınç deney sonuçları gösterilmiştir. Burada UCS ifadesi serbest basınç dayanımını; E elastisite modülünü ve  $\epsilon$  ise kırılma anındaki yüzde eksenel deformasyonu göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde B zemin, B30FA, B5L ve B30FA5L karışımları için kür süresi arttıkça elastisite modülü değerleri artmıştır. Tipik B zemin için 0, 7 ve 28 gün kür süresinde elastisite modülü değerleri sırasıyla 7135, 9045 ve 9332 kPa olarak bulunmuştur. B5L karışımında ise 0, 7 ve 28 gün kür sürelerinde elde edilen elastisite modülleri sırasıyla 25670, 32867 ve 78285 kPa olmuştur. Kırılma anındaki  $\epsilon$  değerleri Bzeminde 0, 7 ve 28 gün kürde % 5.33 ile % 6.17 aralığında, B30FA5L karışımında ise % 1.83-2.33 aralığında değişmektedir.

Çizelge 4.2 B zemine ve seçili karışımlarına ait serbest basınç deney sonuçları.

Kür	Numune	B			B30FA			B5L			B30FA5L		
		UCS (kPa)	E (kPa)	$\epsilon$ (%)	UCS (kPa)	E (kPa)	$\epsilon$ (%)	UCS (kPa)	E (kPa)	$\epsilon$ (%)	UCS (kPa)	E (kPa)	$\epsilon$ (%)
0	1	241.26	7372	6.50	350.64	11712	3.67	421.53	22208	3.50	376.19	21344	2.50
	2	199.89	6898	5.83	315.93	9474	4.67	431.17	26303	3.17	401.00	25396	2.17
	3	218.43	7134	6.17	299.97	10694	4.17	447.76	28501	2.83	433.66	30645	2.33
	Ort.	219.86	7135	6.17	322.18	10627	4.17	433.49	25670	3.17	403.62	25795	2.33
7	1	328.67	9505	4.50	382.20	13293	4.17	576.16	30398	6.00	593.58	40956	1.83
	2	290.97	8775	5.67	369.71	12423	3.33	619.39	35614	5.33	622.54	45795	1.50
	3	294.89	9126	5.33	358.76	10734	4.50	610.02	32588	5.67	585.44	33578	2.17
	Ort.	304.85	9045	5.17	370.22	12150	4.00	602.07	32867	5.67	600.52	40110	1.83
28	1	361.87	10196	5.50	410.93	16943	3.33	965.17	78627	1.67	888.25	44498	2.00
	2	368.98	11064	5.33	421.63	20411	3.50	999.69	87824	1.50	915.56	50507	1.67
	3	335.82	8735	6.67	433.28	23300	2.67	946.43	68314	1.83	907.06	46833	1.83
	Ort.	355.56	9332	5.83	421.95	20218	3.17	970.43	78255	1.67	903.62	47280	1.83

B zemin ve uçucu kül katkılı karışımlarına ait ayrıntılı serbest basınç deney sonuçları Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.4 incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.4 UCS deney sonuçları a) B b) B5FA c) B10FA d) B15FA e) B20FA f) B30FA.

Şekil 4.4a'daki B zemine ait eksenel deformasyon-gerilme grafiğine göre ilgili zeminin 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 6.17 olduğu durumda  $219.86 \pm 16.92$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $304.84 \pm 16.92$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekinden daha düşük olarak % 5.17 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına 0 gün kür süresindeki yakını bir eksenel deformasyonda (% 5.83) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $355.56 \pm 14.25$  kPa olarak bulunmuştur.

B5FA kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.4b incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 6.00 olduğu durumda  $317.06 \pm 12.76$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $361.97 \pm 18.16$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekine yakını olarak % 5.67 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha düşük bir eksenel deformasyonda (% 4.33) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $393.39 \pm 17.50$  kPa olarak bulunmuştur.

B10FA kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.4c incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 7.00 olduğu durumda  $340.81 \pm 11.17$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $418.09 \pm 20.56$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekinden daha düşük olarak % 6.00 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha düşük bir eksenel deformasyonda (% 5.17) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $454.56 \pm 16.51$  kPa olarak bulunmuştur.

B15FA kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.4d incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 7.00 olduğu durumda  $365.98 \pm 4.16$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $435.64 \pm 22.67$  kPa

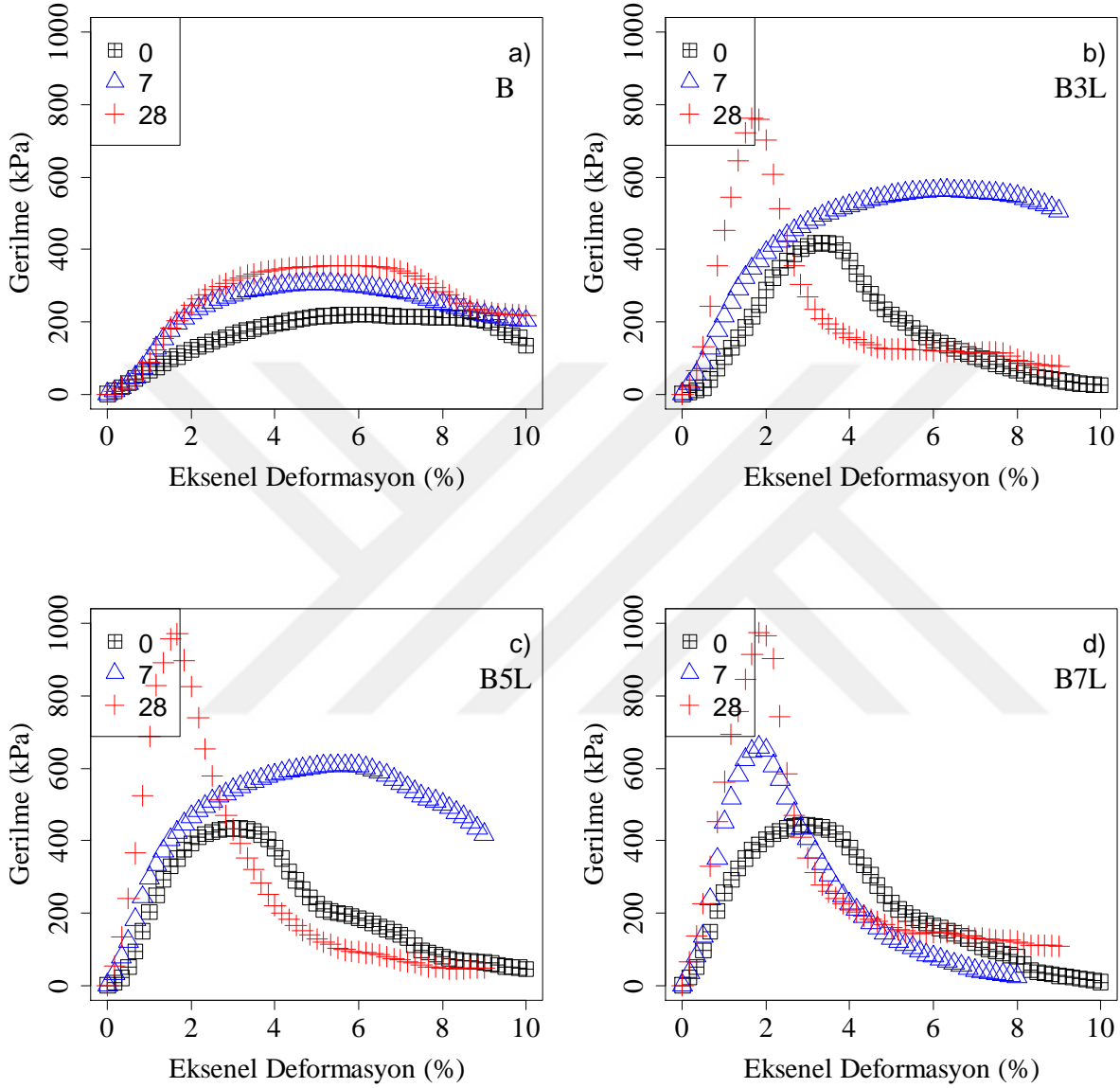
değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekinden daha düşük olarak % 5.33 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha düşük bir eksenel deformasyonda (% 3.33) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $437.67 \pm 15.30$  kPa olarak bulunmuştur.

B20FA kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.4e incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 3.83 olduğu durumda  $343.39 \pm 6.83$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $388.30 \pm 15.17$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdeki ile aynı olarak % 3.83 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına da tıpkı diğer kür sürelerinde olduğu gibi % 3.83 eksenel deformasyonda ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $413.99 \pm 26.73$  kPa olarak bulunmuştur.

B30FA kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.4f incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 4.17 olduğu durumda  $322.18 \pm 21.15$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $370.22 \pm 9.57$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekine yakın olarak % 4.00 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha düşük bir eksenel deformasyonda (% 3.17) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $421.95 \pm 9.12$  kPa olarak bulunmuştur.

B zemin ve kireç katkılı karışımlara ait eksenel deformasyon-gerilme grafikleri Şekil 4.5'de sunulmuştur. B3L kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.5b incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 3.33 olduğu durumda  $418.43 \pm 17.69$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $563.06 \pm 16.93$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekinden daha yüksek olarak % 6.33 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür

sürelerine göre daha düşük bir eksenel deformasyonda (% 1.67) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $762.05 \pm 17.92$  kPa olarak bulunmuştur.



**Şekil 4.5** UCS deney sonuçları a) B b) B3L c) B5L d) B7L.

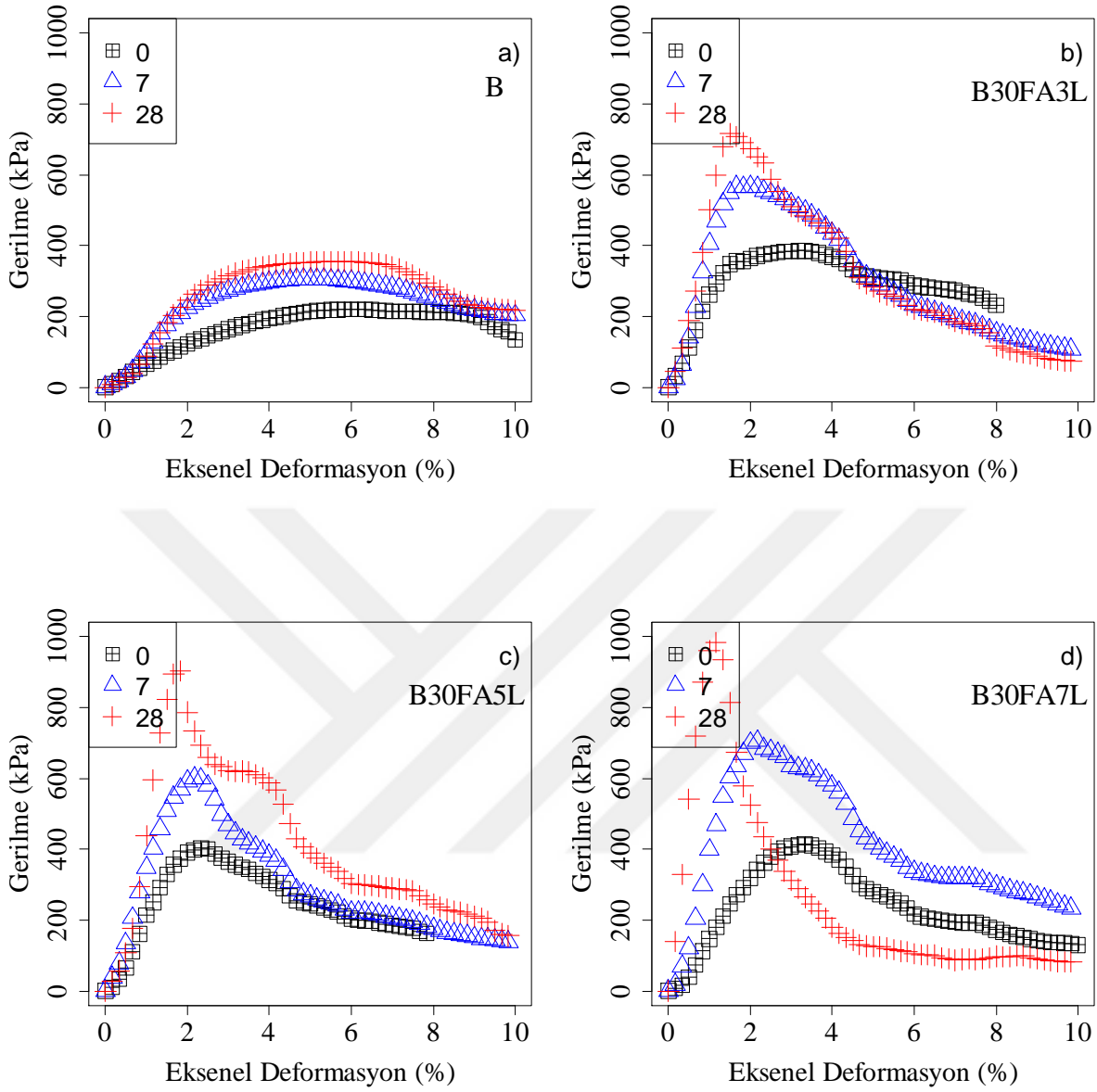
B5L kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.5c incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 3.17 olduğu durumda  $433.49 \pm 10.83$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $601.86 \pm 18.57$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekinden daha yüksek olarak % 5.67

değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha düşük bir eksenel deformasyonda (% 1.67) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $970.43 \pm 22.06$  kPa olarak bulunmuştur.

B7L kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.5d incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 2.83 olduğu durumda  $443.07 \pm 4.24$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $657.48 \pm 21.64$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekinden daha düşük olarak % 1.83 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına 7 gün kür süresi ile aynı eksenel deformasyonda (% 1.83) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $975.32 \pm 19.07$  kPa olarak bulunmuştur.

B zemin ile uçucu kül ve kireç katkılı karışımlara ait eksenel deformasyon-gerilme grafikleri Şekil 4.6'da sunulmuştur. B30FA3L kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.6b incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 3.33 olduğu durumda  $385.47 \pm 17.99$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $566.24 \pm 20.62$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekinden daha düşük olarak % 2.00 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha düşük bir eksenel deformasyonda (% 1.50) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $714.94 \pm 22.23$  kPa olarak bulunmuştur.

B30FA5L kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.6c incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, eksenel deformasyonun % 2.33 olduğu durumda  $403.62 \pm 23.53$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $600.52 \pm 15.92$  kPa değerine yükselirken, eksenel deformasyon ise 0 gün kürdekine yakın olarak % 2.17 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine benzer bir eksenel deformasyonda (% 1.83) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $903.62 \pm 11.41$  kPa olarak bulunmuştur.



**Şekil 4.6** UCS deney sonuçları a) B b) B30FA3L c) B30FA5L d) B30FA7L.

B30FA7L kodlu karışıma ait serbest basınç deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.6d incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre ilgili karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama serbest basınç dayanımı, aksel deformasyonun % 3.33 olduğu durumda  $414.35 \pm 26.60$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile serbest basınç dayanımı  $705.36 \pm 24.43$  kPa değerine yükselirken, aksel deformasyon ise 0 gün kürekinden daha düşük olarak % 2.17 değerinde tespit edilmiştir. 28 gün kür süresinde ise serbest basınç dayanımına diğer kür sürelerine göre daha düşük bir aksel deformasyonda (% 1.17) ulaşılmıştır. İlgili kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı ise  $982.90 \pm 28.46$  kPa olarak bulunmuştur.

### 4.3 DONMA ÇÖZÜLME SONRASI SERBEST BASINÇ DENEY SONUÇLARI

Düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli kil zeminler ile karışımlarına yönelik uygulanan farklı sayıda (2, 4, 6 ve 8) donma-çözülme çevrimleri sonrasında yapılan serbest basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar bu kısımda değerlendirilmiştir. Tüm numuneler için 3'er tekrar yapılmış ve sonuçları aynı serbest basınç deneyinde olduğu gibi bu üç numunenin ortalaması esas alınarak değerlendirilmiştir.

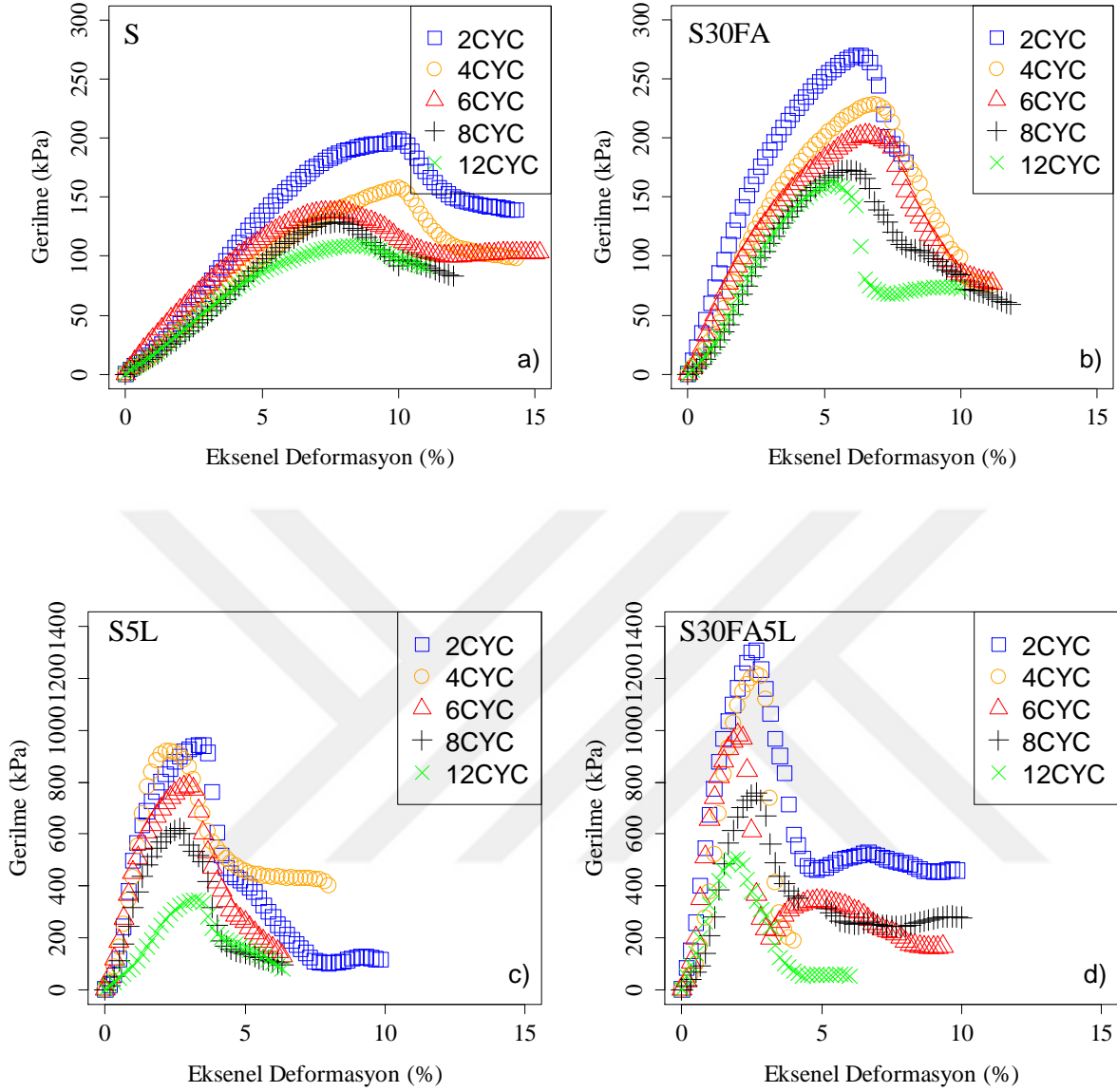
#### 4.3.1 Düşük Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar

Düşük plastisiteli killi zemin ve seçili karışımlarına (S, S30FA, S5L ve S30FA5L) ait sonuçları bu bölümde değerlendirilmiştir. Çizelge 4.3'te S zemin ve S30FA5L karışımı için 4, 8 ve 12 donma çözülme sonrası deney sonuçları mevcuttur. Kırılma anındaki  $\epsilon$  değerleri S zeminde ortalama % 8.33-10.00 aralığında iken, S30FA5L karışımında ise % 2.00-2.67 aralığındadır

**Çizelge 4.3** S zemin ve S30FA5L karışımları donma-çözülme sonrası serbest basınç deney sonuçları.

Çevrim	Numune	S		S30FA5L	
		UCS (kPa)	$\epsilon$ (%)	UCS (kPa)	E (%)
4	1	170.85	9.50	1334.60	2.50
	2	156.24	10.50	1100.83	3.00
	3	163.48	10.00	1206.60	2.67
	Ort.	163.52	10.00	1214.01	2.67
8	1	143.15	6.67	792.09	2.33
	2	123.07	8.00	729.65	3.00
	3	119.93	8.33	747.47	2.67
	Ort.	128.72	7.67	756.40	2.67
12	1	108.21	8.50	482.20	2.17
	2	109.65	8.50	543.43	1.83
	3	108.88	8.50	489.80	2.00
	Ort.	108.98	8.50	505.14	2.00

S, S30FA, S30FA5L ve S5L kodlu karışımların donma-çözülme performansları Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Buna göre Şekil 4.7a incelendiğinde S zemine uygulanan donma çözülme çevrimi arttıkça serbest basınç dayanımının azaldığı görülmektedir.



**Şekil 4.7** Donma-çözülme sonrası UCS deney sonuçları **a) S b) S30FA c) S5L d) S30FA5L**.

S zeminde serbest basınç dayanımının elde edildiği aksenal deformasyon değerlerinde önemli bir değişim olmamıştır. Buna göre 2 donma çözülme çevriminde elde edilen serbest basınç dayanımı aksenal deformasyonun % 10.00 olduğu durumda  $200.45 \pm 10.56$  kPa olarak bulunmuştur. Donma çözülme çevriminin 4 olması durumunda ise serbest basınç dayanımı  $163.52 \pm 5.96$  kPa değerine düşerken ilgili dayanım değerindeki aksenal deformasyon değeri yine % 10.00'dır. 6 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $137.72 \pm 10.83$  kPa olup, aksenal deformasyonun % 7.83 olduğu durumda gerçekleşmiştir. 8 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $128.72 \pm 10.29$  kPa olup, aksenal deformasyonun % 7.67 olduğu

durumda gerekleŒmiŒtir. 12 donma özölme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $108.98 \pm 0.59$  kPa olup, eksenel deformasyonun % 8.50 olduğu durumda gerekleŒmiŒtir.

Œekil 4.7b incelendiğinde S30FA zemine uygulanan donma özölme çevrimi arttıa serbest basınç dayanımının azaldığı görölmektedir. S zemine göre serbest basınç dayanımı değerleri daha dűŒük eksenel deformasyon değerlerinde elde edilmiŒtir. S30FA kodlu karıŒımda artan donma özölme çevriminde serbest basınç dayanımının elde edildiği eksenel deformasyon değerlerinde önemli bir deėiŒim olmamıŒtır. Buna göre 2 donma özölme çevriminde elde edilen serbest basınç dayanımı eksenel deformasyonun % 6.33 olduğu durumda  $270.26 \pm 18.48$  kPa olarak bulunmuŒtur. Donma özölme çevriminin 4 olması durumunda ise serbest basınç dayanımı  $228.26 \pm 7.03$  kPa değerine dűŒerken ilgili dayanım değerindeki eksenel deformasyon değeri yine % 6.83'dür. 6 donma özölme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $202.77 \pm 16.28$  kPa olup, eksenel deformasyonun % 6.50 olduğu durumda gerekleŒmiŒtir. 8 donma özölme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $172.95 \pm 31.91$  kPa olup, eksenel deformasyonun % 6.00 olduğu durumda gerekleŒmiŒtir. 12 donma özölme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $161.08 \pm 6.25$  kPa olup, eksenel deformasyonun % 5.33 olduğu durumda gerekleŒmiŒtir.

Œekil 4.7c incelendiğinde S5L zemine uygulanan donma özölme çevrimi arttıa serbest basınç dayanımının azaldığı görölmektedir. S zemine göre serbest basınç dayanımı değerleri daha dűŒük eksenel deformasyon değerlerinde elde edilmiŒtir. S5L kodlu karıŒımda da serbest basınç dayanımının elde edildiği eksenel deformasyon değerlerinde önemli bir deėiŒim olmamıŒtır. Buna göre 2 donma özölme çevriminde elde edilen serbest basınç dayanımı eksenel deformasyonun % 3.33 olduğu durumda  $941.80 \pm 23.00$  kPa olarak bulunmuŒtur. Donma özölme çevriminin 4 olması durumunda ise serbest basınç dayanımı  $919.06 \pm 42.23$  kPa değerine dűŒerken ilgili dayanım değerindeki eksenel deformasyon değeri % 2.33'dür. 6 donma özölme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $786.04 \pm 40.97$  kPa olup, eksenel deformasyonun % 3.00 olduğu durumda gerekleŒmiŒtir. 8 donma özölme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $620.02 \pm 8.82$  kPa olup, eksenel deformasyonun % 2.67 olduğu durumda gerekleŒmiŒtir. 12 donma özölme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $344.95 \pm 12.01$  kPa olup, eksenel deformasyonun % 3.33 olduğu durumda gerekleŒmiŒtir.

Œekil 4.7d incelendiğinde S30FA5L zemine uygulanan donma özölme çevrimi arttıa serbest basınç dayanımının azaldığı görölmektedir. S zemine göre maksimum serbest basınç dayanımı değerleri daha dűŒük eksenel deformasyon değerlerinde elde edilmiŒtir. S30FA5L kodlu karıŒımda

serbest basınç dayanımının elde edildiği eksenel deformasyon değerlerinde donma-çözülme çevrimleri arasında önemli bir değişim olmamıştır. Buna göre 2 donma çözülme çevriminde elde edilen serbest basınç dayanımı eksenel deformasyonun % 2.67 olduğu durumda  $1308.67 \pm 105.57$  kPa olarak bulunmuştur. Donma çözülme çevriminin 4 olması durumunda ise serbest basınç dayanımı  $1214.01 \pm 95.58$  kPa değerine düşerken ilgili dayanım değerindeki eksenel deformasyon değeri yine % 2.67'dir. 6 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $980.90 \pm 92.16$  kPa olup, eksenel deformasyonun % 2.00 olduğu durumda gerçekleşmiştir. 8 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $756.40 \pm 26.27$  kPa olup, eksenel deformasyonun % 2.67 olduğu durumda gerçekleşmiştir. 12 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $505.14 \pm 27.25$  kPa olup, eksenel deformasyonun % 2.00 olduğu durumda gerçekleşmiştir.

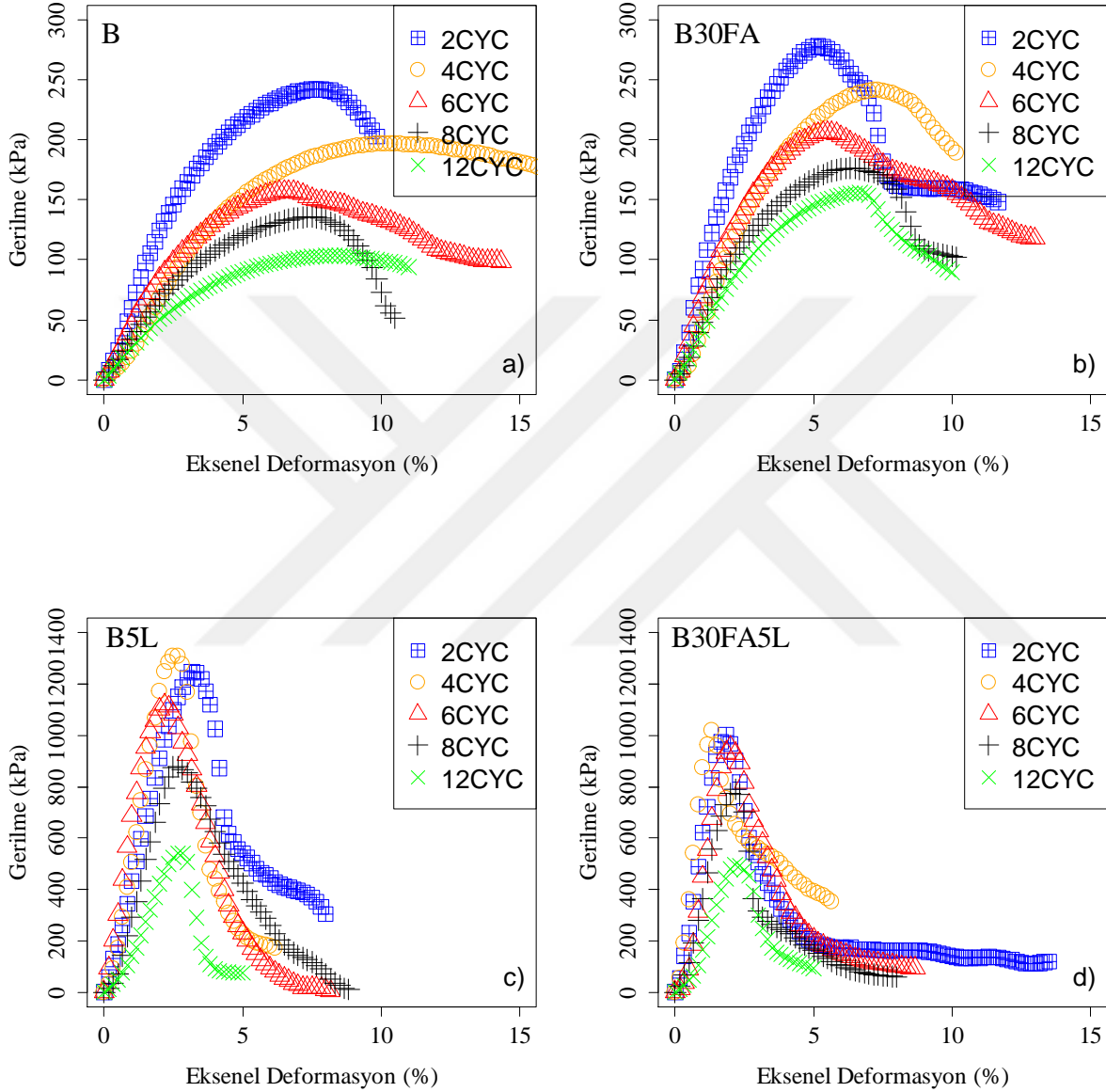
#### 4.3.2 Yüksek Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar

Düşük plastisiteli killi zemin ve seçili karışımlarına (B, B30FA, B5L ve B30FA5L) ait sonuçları bu bölümde değerlendirilmiştir. Çizelge 4.4'te ise B zemin ve B5L karışımı için 4, 8 ve 12 donma çözülme sonrası serbest basınç deney sonuçları görülmektedir. Donma-çözülme çevriminin 4, 8 ve 12 olduğu durum için kırılma anındaki  $\epsilon$  değerleri B zeminde ortalama % 8.33-10.17 aralığında iken, B30FA5L karışımında ise % 2.67-2.83 aralığındadır

**Çizelge 4.4** B zemin ve B30FA5L karışımları donma-çözülme sonrası serbest basınç deney sonuçları.

Çevrim	Numune	B		B30FA5L	
		UCS (kPa)	$\epsilon$ (%)	UCS (kPa)	E (%)
4	1	205.97	9.67	1311.82	2.33
	2	190.84	10.50	1274.11	3.33
	3	193.47	10.33	1344.51	2.33
	Ort.	196.76	10.17	1310.15	2.67
8	1	125.91	7.83	929.32	2.50
	2	145.77	6.83	832.71	2.83
	3	135.83	7.33	874.47	2.67
	Ort.	135.84	7.33	878.83	2.67
12	1	106.53	8.33	606.69	2.50
	2	100.89	8.33	486.26	3.17
	3	103.56	8.33	528.32	2.83
	Ort.	103.66	8.33	540.42	2.83

B, B30FA, B30FA5L ve B5L kodlu karışımların donma-çözülme performansları Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Buna göre Şekil 4.8a incelendiğinde B zemine uygulanan donma çözülme çevrimi arttıkça serbest basınç dayanımının azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.8 Donma-çözülme sonrası UCS deney sonuçları a) B b) B30FA c) B5L d) B30FA5L.

B zeminde serbest basınç dayanımının elde edildiği aksel deformasyon değerlerinde önemli bir değişim olmamıştır. Buna göre 2 donma çözülme çevriminde elde edilen serbest basınç dayanımı aksel deformasyonun % 7.67 olduğu durumda  $242.19 \pm 7.56$  kPa olarak bulunmuştur. Donma çözülme çevriminin 4 olması durumunda ise serbest basınç dayanımı

196.76 ± 6.60 kPa değerine düşerken ilgili dayanım değerindeki eksenel deformasyon değeri yine % 10.17'dir. 6 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı 157.33 ± 13.91 kPa olup, eksenel deformasyonun % 6.50 olduğu durumda gerçekleşmiştir. 8 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı 135.84 ± 8.11 kPa olup, eksenel deformasyonun % 7.33 olduğu durumda gerçekleşmiştir. 12 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı 103.66 ± 2.30 kPa olup, eksenel deformasyonun % 8.33 olduğu durumda gerçekleşmiştir.

Şekil 4.8b incelendiğinde B30FA zemine uygulanan donma çözülme çevrimi arttıkça serbest basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. B zemine göre serbest basınç dayanımı değerleri daha düşük eksenel deformasyon değerlerinde elde edilmiştir. B30FA kodlu karışımda artan donma çözülme çevriminde serbest basınç dayanımının elde edildiği eksenel deformasyon değerlerinde önemli bir değişim olmamıştır. Buna göre 2 donma çözülme çevriminde elde edilen serbest basınç dayanımı eksenel deformasyonun % 5.17 olduğu durumda 278.14 ± 4.01 kPa olarak bulunmuştur. Donma çözülme çevriminin 4 olması durumunda ise serbest basınç dayanımı 241.25 ± 27.48 kPa değerine düşerken ilgili dayanım değerindeki eksenel deformasyon değeri % 7.17'dir. 6 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı 206.55 ± 5.65 kPa olup, eksenel deformasyonun % 5.50 olduğu durumda gerçekleşmiştir. 8 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı 176.49 ± 5.07 kPa olup, eksenel deformasyonun % 6.33 olduğu durumda gerçekleşmiştir. 12 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı 156.01 ± 8.87 kPa olup, eksenel deformasyonun % 6.67 olduğu durumda gerçekleşmiştir.

Şekil 4.8c incelendiğinde B5L zemine uygulanan donma çözülme çevrimi arttıkça serbest basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. B zemine göre serbest basınç dayanımı değerleri daha düşük eksenel deformasyon değerlerinde elde edilmiştir. B5L kodlu karışımda da serbest basınç dayanımının elde edildiği eksenel deformasyon değerlerinde önemli bir değişim olmamıştır. Buna göre 2 donma çözülme çevriminde elde edilen serbest basınç dayanımı eksenel deformasyonun % 3.17 olduğu durumda 1246.96 ± 50.92 kPa olarak bulunmuştur. Donma çözülme çevriminin 4 olması durumunda ise serbest basınç dayanımı 1310.15 ± 28.76 kPa değerine düşerken ilgili dayanım değerindeki eksenel deformasyon değeri % 2.67'dir. 6 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı 1119.99 ± 65.21 kPa olup, eksenel deformasyonun % 2.17 olduğu durumda gerçekleşmiştir. 8 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı 878.83 ± 39.56 kPa olup, eksenel

deformasyonun % 2.67 olduğu durumda gerçekleşmiştir. 12 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $540.42 \pm 49.90$  kPa olup, eksenel deformasyonun % 2.83 olduğu durumda gerçekleşmiştir.

Şekil 4.8d incelendiğinde B30FA5L zemine uygulanan donma çözülme çevrimi arttıkça serbest basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. B zemine göre serbest basınç dayanımı değerleri daha düşük eksenel deformasyon değerlerinde elde edilmiştir. B30FA5L kodlu karışımda da serbest basınç dayanımının elde edildiği eksenel deformasyon değerlerinde önemli bir değişim olmamıştır. Buna göre 2 donma çözülme çevriminde elde edilen serbest basınç dayanımı eksenel deformasyonun % 1.83 olduğu durumda  $1000.36 \pm 54.47$  kPa olarak bulunmuştur. Donma çözülme çevriminin 4 olması durumunda ise serbest basınç dayanımı  $1019.72 \pm 65.45$  kPa değerine düşerken ilgili dayanım değerindeki eksenel deformasyon değeri % 1.33'dür. 6 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $953.55 \pm 51.62$  kPa olup, eksenel deformasyonun % 2.00 olduğu durumda gerçekleşmiştir. 8 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $790.51 \pm 44.53$  kPa olup, eksenel deformasyonun % 2.17 olduğu durumda gerçekleşmiştir. 12 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı  $497.03 \pm 45.74$  kPa olup, eksenel deformasyonun % 2.17 olduğu durumda gerçekleşmiştir.

#### **4.4 DOLAYLI ÇEKME DENEY SONUÇLARI**

Düşük plastisiteli killi zemin ve yüksek plastisiteli killi zemin ile karışımlarına ait dolaylı çekme deney sonuçları aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır. Şekillerde verilen dolaylı çekme deneylerine ait eksenel deformasyon-gerilme grafiklerinin elde edilmesi için tüm kür sürelerine ait numunelerde her 10 saniyede bir deformasyon ve yük ölçümü alınmıştır. Buna göre yaklaşık her 0.1187 mm'de bir ölçüm yapılarak veriler kaydedilmiştir. Bu sayede yapılan deneysel tekrarların ortalamasını almak mümkün hale gelmiştir. Aşağıda verilen sonuçlar her kür süresinde yapılan 3 adet tekrarın ortalaması olarak çizilmiştir.

##### **4.4.1 Düşük Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar**

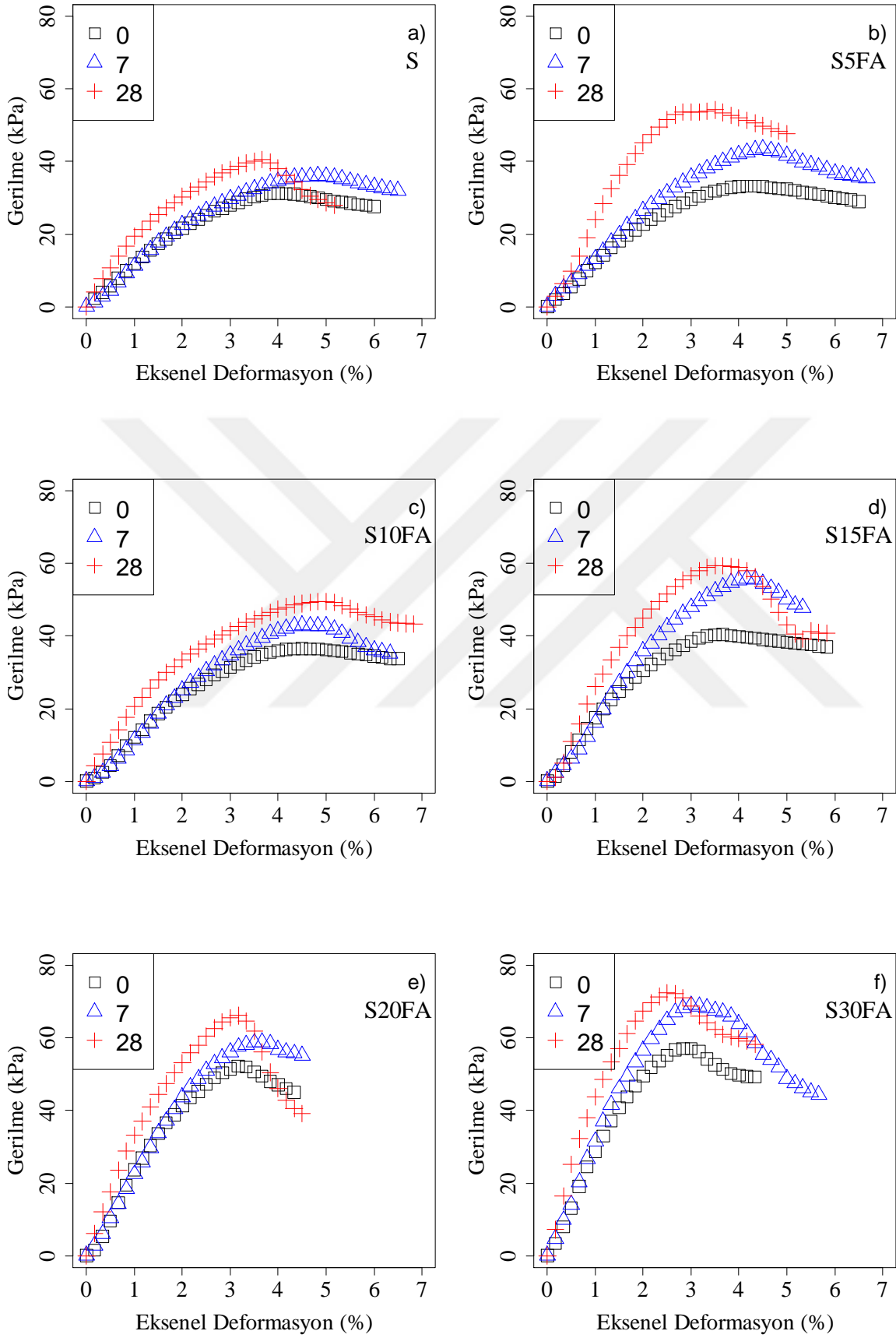
Bu bölümde düşük plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait eksenel deformasyon-gerilme grafikleri çizilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.5'te S zemin ve bazı karışımlarına (S30FA, S5L ve S30FA5L) ait dolaylı çekme sonuçları verilmiştir. Çizelgede ITS, dolaylı çekme dayanımını ve

$\epsilon$  kırılma anında oluşan yüzdesel deformasyonu göstermektedir. Sonuçlara göre S zemini için ortalama  $\epsilon$  değeri % 3.67 ile % 4.83 aralığında değişmektedir. Yüzdece eksenel deformasyon değerleri S30FA karışımında % 2.50-% 3.00, S5L karışımında % 2.17-% 2.33 ve S30FA5L karışımında % 1.67-% 2.00 aralığında bulunmuştur.

**Çizelge 4.5** S zemin ve seçili karışımları için dolaylı çekme deney sonuçları.

Kür	Numune	S		S30FA		S5L		S30FA5L	
		ITS (kPa)	$\epsilon$ (%)	ITS (kPa)	$\epsilon$ (%)	ITS (kPa)	$\epsilon$ (%)	ITS (kPa)	$\epsilon$ (%)
0	1	31.91	4.00	61.75	2.50	59.89	2.17	63.42	2.00
	2	29.13	4.33	50.96	3.17	66.35	2.00	68.41	1.83
	3	32.67	3.67	58.66	2.83	58.01	2.33	59.99	2.17
	Ort.	31.24	4.00	57.12	2.83	61.42	2.17	63.94	2.00
7	1	36.43	4.83	65.24	3.17	80.24	2.17	88.25	1.50
	2	38.66	4.50	75.18	2.67	79.15	2.50	78.03	1.83
	3	33.06	5.17	66.73	3.17	76.76	2.33	80.88	1.67
	Ort.	36.05	4.83	69.05	3.00	78.72	2.33	82.39	1.67
28	1	38.10	4.00	69.66	2.83	103.75	2.17	124.65	1.50
	2	39.14	3.83	71.95	2.50	96.50	2.33	116.76	1.67
	3	44.27	3.17	75.85	2.17	94.01	2.50	114.08	1.83
	Ort.	40.51	3.67	72.49	2.50	98.08	2.33	118.50	1.67

Dolaylı çekme deneyinde kür süresinin etkisinin her karışımında gözlenmesi amacıyla bu bölümdeki grafikler oluşturulmuştur. S zemini ve uçucu kül katkılı karışımlarına ait dolaylı çekme deney sonuçlarının Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.9 incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre Şekil 4.9'a'da S zeminin 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 4.00 olduğu yerde  $31.24 \pm 1.52$  kPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.9 ITS deney sonuçları a) S b) S5FA c) S10FA d) S15FA e) S20FA f) S30FA.

Kür süresinin 7 güne çıkması ile S zemine ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 4.83 olduğu durumda  $36.05 \pm 2.30$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde daha düşük bir değerde (% 3.67) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 29.67 oranında artarak  $40.51 \pm 2.70$  kPa olarak bulunmuştur. Serbest basınç ve dolaylı çekme deneyinden elde edilen dayanımların gerçekleştiği eksenel deformasyon değerleri karşılaştırıldığında 0 ve 7 gün kür süresinde dolaylı çekme deneyindeki değerler daha düşük iken, 28 gün kür süresinde dolaylı çekme deneyinde biraz daha yüksek olmuştur. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 3.67 ile % 4.83 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 3.33 ile % 5.33 arasında değişmektedir.

S5FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.9b incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre S5FA kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 4.17 olduğu yerde  $33.27 \pm 0.91$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile S5FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 4.50 olduğu durumda  $43.59 \pm 2.09$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde daha düşük bir değerde (% 3.50) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 63.00 oranında artarak  $54.23 \pm 0.29$  kPa olarak bulunmuştur. Serbest basınç ve dolaylı çekme deneyinden elde edilen maksimum dayanımların gerçekleştiği eksenel deformasyon değerleri karşılaştırıldığında tüm kür süreleri için dolaylı çekme deneyinden bulunanlar daha düşüktür. Özellikle kür süresinin 28 güne çıkması ile maksimum dayanım serbest basınç deneyinde % 6.33 deformasyon değerinde iken, dolaylı çekme deneyinde % 3.5 civarında tespit edilmiştir. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 3.50 ile % 4.50 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 4.67 ile % 6.33 arasında değişmektedir.

S10FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.9c incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre S10FA kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 4.50 olduğu yerde  $36.56 \pm 0.71$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile S10FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 4.50 olduğu durumda  $42.95 \pm 0.28$  kPa değerine yükselmiştir. 7 gün kür süresinde elde edilen dayanımın oluştuğu deformasyon değeri 0 gün

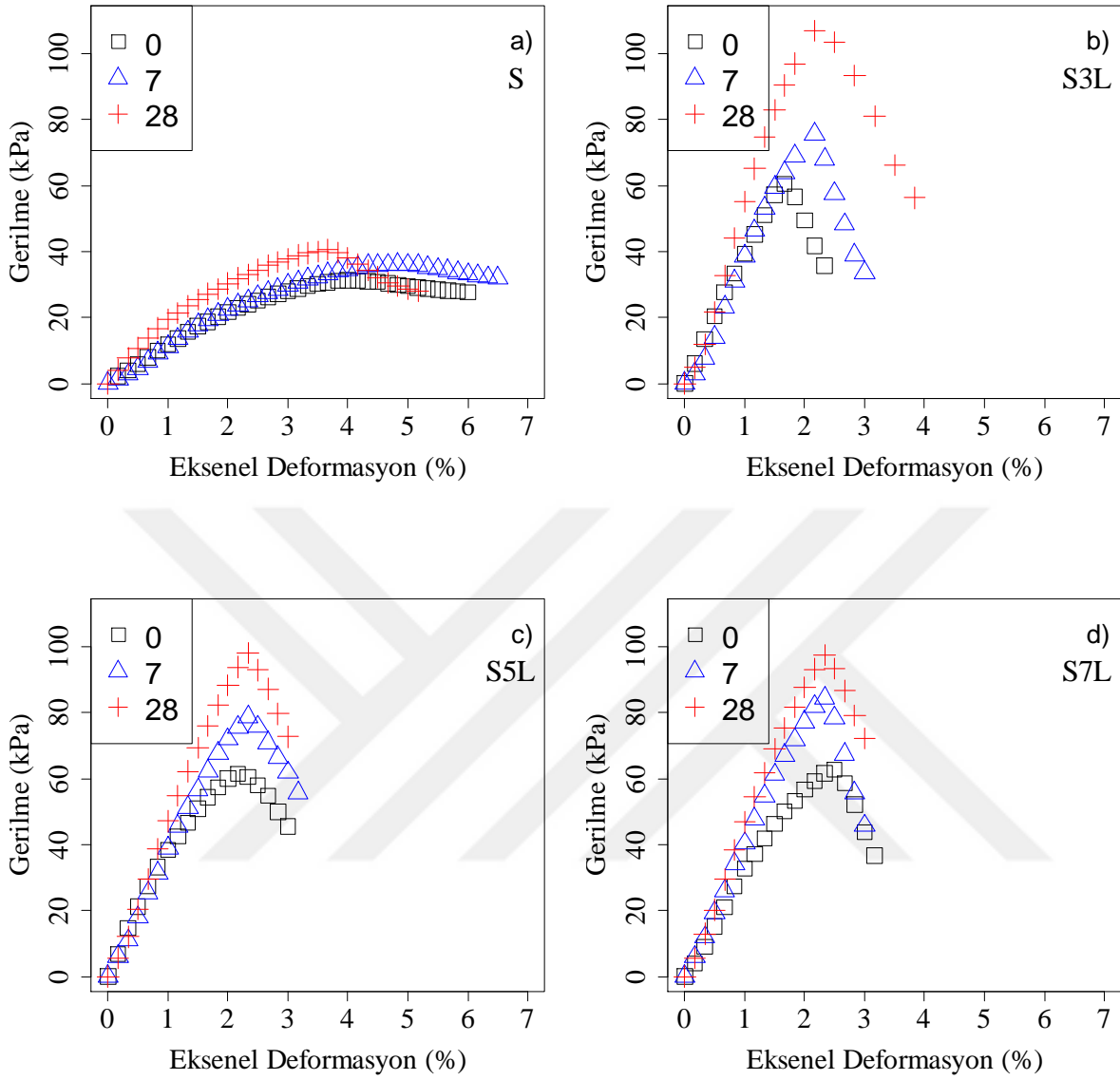
kürdeki ile aynıdır. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde de önemli bir değişikliğe uğramayarak % 5.00 değerinde olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 35.50 oranında artarak  $49.54 \pm 2.41$  kPa olarak bulunmuştur. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 4.50 ile % 5.00 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 5.33 ile % 6.83 arasında değişmektedir.

S15FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.9d incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre S15FA kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 3.67 olduğu yerde  $40.41 \pm 2.35$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile S15FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 4.17 olduğu durumda  $55.90 \pm 1.99$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde 7 güne göre daha düşük bir değerde (% 3.50) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 47.04 oranında artarak  $59.42 \pm 3.50$  kPa olarak bulunmuştur. S15FA kodlu karışımda serbest basınç dayanımı; 0, 7 ve 28 gün kür sürelerine göre sırasıyla % 5.17, % 4.67 ve % 3.67 deformasyon değerinde gerçekleşmiştir. Dolaylı çekme deneyinde ise 0 gün kür süresinde maksimum dayanım deformasyonun % 3.67 olduğu yerde elde edilmiş olup, serbest basınç deneyine göre daha düşüktür. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 3.50 ile % 4.17 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 3.67 ile % 5.17 arasında değişmektedir.

S20FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.9e incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre S20FA kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 3.17 olduğu yerde  $52.31 \pm 2.16$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile S20FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 3.67 olduğu durumda  $58.89 \pm 2.37$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde 7 güne göre daha düşük bir değerde (% 3.00) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 26.50 oranında artarak  $66.17 \pm 1.24$  kPa olarak bulunmuştur. Bu karışım değerlendirildiğinde kür sürelerine göre elde edilen dayanımların olduğu deformasyonlar, serbest basınç deneyinden bulunanlara göre daha düşük olmuştur. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon

değerleri tüm kürler için ortalama % 3.00 ile % 3.67 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 3.67 ile % 4.83 arasında değişmektedir.

S30FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.9f incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre S30FA kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 2.83 olduğu yerde  $57.12 \pm 4.54$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile S30FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 3.00 olduğu durumda  $69.05 \pm 4.38$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde daha düşük bir değerde (% 2.50) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 26.91 oranında artarak  $72.49 \pm 2.56$  kPa olarak bulunmuştur. S30FA karışımında kür sürelerine göre bu deneyden elde edilen dayanımların oluştuğu deformasyonlar, serbest basınç deneyinden bulunanlara göre daha düşük olmuştur. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 2.50 ile % 3.00 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 4.17 ile % 6.00 arasında değişmektedir.



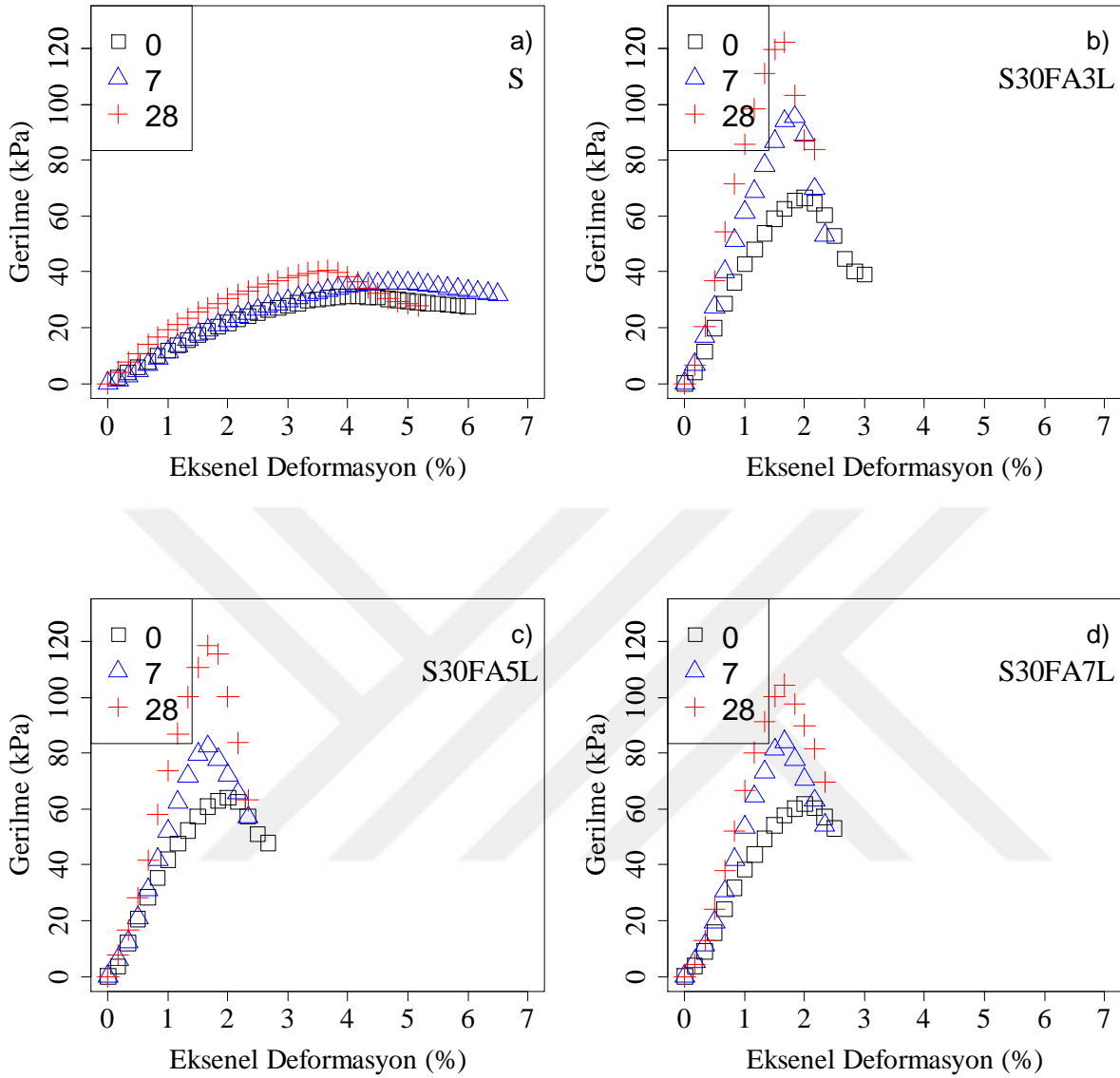
Şekil 4.10 ITS deney sonuçları a) S b) S3L c) S5L d) S7L.

S zemini ve kireç katkılı karışımlara ait dolaylı çekme deney sonuçları Şekil 4.10'da verilmektedir. S3L kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.10b incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre S3L kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 1.67 olduğu yerde  $60.46 \pm 4.00$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile S3L kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 2.17 olduğu durumda  $75.63 \pm 2.48$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde 0 güne göre daha yüksek bir değerde (% 2.17) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 76.94 oranında

artarak  $106.98 \pm 3.74$  kPa olarak bulunmuştur. Bu karışımda kür sürelerine göre dolaylı çekme deneyinden elde edilen dayanımların olduğu deformasyonlar, serbest basınç deneyinden bulunanlara göre daha düşük olmuştur. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 1.67 ile % 2.17 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 2.50 ile % 4.00 arasında değişmektedir.

S5L kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.10c incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre S5L kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 2.17 olduğu yerde  $61.42 \pm 3.57$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile S5L kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 2.33 olduğu durumda  $78.72 \pm 1.45$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde de değişmemiş (% 2.33) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 59.69 oranında artarak  $98.08 \pm 4.13$  kPa olarak bulunmuştur. S5L karışımında kür sürelerine göre bu deneyden elde edilen dayanımların olduğu deformasyonlar, serbest basınç deneyinden bulunanlara göre daha düşük olmuştur. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 2.17 ile % 2.33 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 2.33 ile % 3.83 arasında değişmektedir.

S7L kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.10d incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre S7L kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 2.50 olduğu yerde  $62.66 \pm 2.35$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile S7L kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 2.33 olduğu durumda  $84.48 \pm 4.13$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde de değişmemiş (% 2.33) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 55.44 oranında artarak  $97.40 \pm 1.77$  kPa olarak bulunmuştur. S7L karışımında kür sürelerine göre bu deneyden elde edilen dayanımların olduğu deformasyonlar, serbest basınç deneyinden bulunanlara göre daha düşük olmuştur. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 2.33 ile % 2.50 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 2.17 ile % 3.50 arasında değişmektedir.



**Şekil 4.11** ITS deney sonuçları a) S b) S30FA3L c) S30FA5L d) S30FA7L.

S zemin ile uçucu kül ve kireç katkılı numunelerin sonuçları Şekil 4.11’de sunulmaktadır. S30FA3L kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.11b incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre S30FA3L kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 2.00 olduğu yerde  $66.47 \pm 2.60$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile S30FA3L kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 1.83 olduğu durumda  $95.47 \pm 5.34$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde daha düşük bir değerde (% 1.67) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 83.93 oranında

artarak  $122.26 \pm 2.45$  kPa olarak bulunmuştur. S30FA3L karışımında kür sürelerine göre bu deneyden elde edilen dayanımların olduğu deformasyonlar, serbest basınç deneyinden bulunanlara göre daha düşük olmuştur. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 1.67 ile % 2.00 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 2.50 ile % 3.33 arasında değişmektedir.

S30FA5L kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.11c incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre S30FA5L kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 2.00 olduğu yerde  $63.94 \pm 3.46$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile S30FA5L kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 1.67 olduğu durumda  $82.39 \pm 4.31$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde de 7 gün ile aynı (% 1.67) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 85.33 oranında artarak  $118.50 \pm 4.49$  kPa olarak bulunmuştur. S30FA5L karışımında kür sürelerine göre bu deneyden elde edilen dayanımların olduğu deformasyonlar, serbest basınç deneyinden bulunanlara göre daha düşük olmuştur. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 1.67 ile % 2.00 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 2.50 ile % 2.83 arasında değişmektedir.

S30FA7L kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.11d incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre S30FA7L kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 2.00 olduğu yerde  $61.68 \pm 1.79$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile S30FA7L kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 1.67 olduğu durumda  $83.96 \pm 4.35$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde 7 gün ile aynı (% 1.67) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 69.42 oranında artarak  $104.50 \pm 2.96$  kPa olarak bulunmuştur. S30FA7L karışımında kür sürelerine göre bu deneyden elde edilen dayanımların olduğu deformasyonlar, serbest basınç deneyinden bulunanlara göre daha düşük olmuştur. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 1.67 ile % 2.00 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 2.50 ile % 3.17 arasında değişmektedir.

Uçucu kül katkılı karışımların hepsine ait dolaylı çekme dayanımlarının oluştuğu deformasyon değerleri, kür süreleri ile birlikte değerlendirilerek her karışım için ortalama deformasyon değeri hesaplanmıştır. Örneğin S zeminin 0 gündeki deformasyon değeri % 4.00, 7 gün kürde % 4.83 ve 28 gün kürde % 3.67 olup, ortalama deformasyon değeri bu üç değerlerin ortalaması olan % 3.83 olarak dikkate alınmıştır. Bu değerlendirme mantığı dikkate alınarak, katkı oranı arttıkça elde edilen dayanıma karşılık gelen ortalama deformasyon değerleri % 10 katkıya kadar (% 10 dahil) artmış, daha sonra eklenen uçucu kül katkısından sonra düşüşe geçmiştir. En yüksek ortalama deformasyon değeri S10FA kodlu karışımda % 4.67 iken, S30FA kodlu karışımda en düşük değeri olan % 2.78'e azalmıştır. Bu değerlendirme mantığı uçucu kül içermeyen kireç katkılı karışımlar için de düşünüldüğünde, katkı oranı arttıkça elde edilen dayanıma karşılık gelen ortalama deformasyon tüm katkılarda düşük miktarda da olsa bir artış göstermiştir. En yüksek ortalama deformasyon değeri S7L kodlu karışımda % 2.39 iken, S3L kodlu karışımda en düşük değeri olan % 2.00'a düşmüştür. Hem uçucu kül hem de kireç içeren karışımlarda ise katkı oranı ile ortalama deformasyon değerleri neredeyse değişmemiş olup, yaklaşık % 1.78 ile % 1.83 arasında dar bir bölgede kalmıştır. Tüm karışımlar içerisinde uçucu kül katkısının % 30'a çıkması ile ortalama deformasyon değerlerinde % 2.78'e kadar düşüş var iken, kireç katkılı karışımlarda S7L kodlu karışımda % 2.00'a ve S30FA5L karışımında % 1.78'e düşmüştür. Yüksek dayanımlı karışımların daha düşük deformasyon değerinde maksimum dolaylı çekme dayanımlarına ulaştıkları sonucuna varılmıştır.

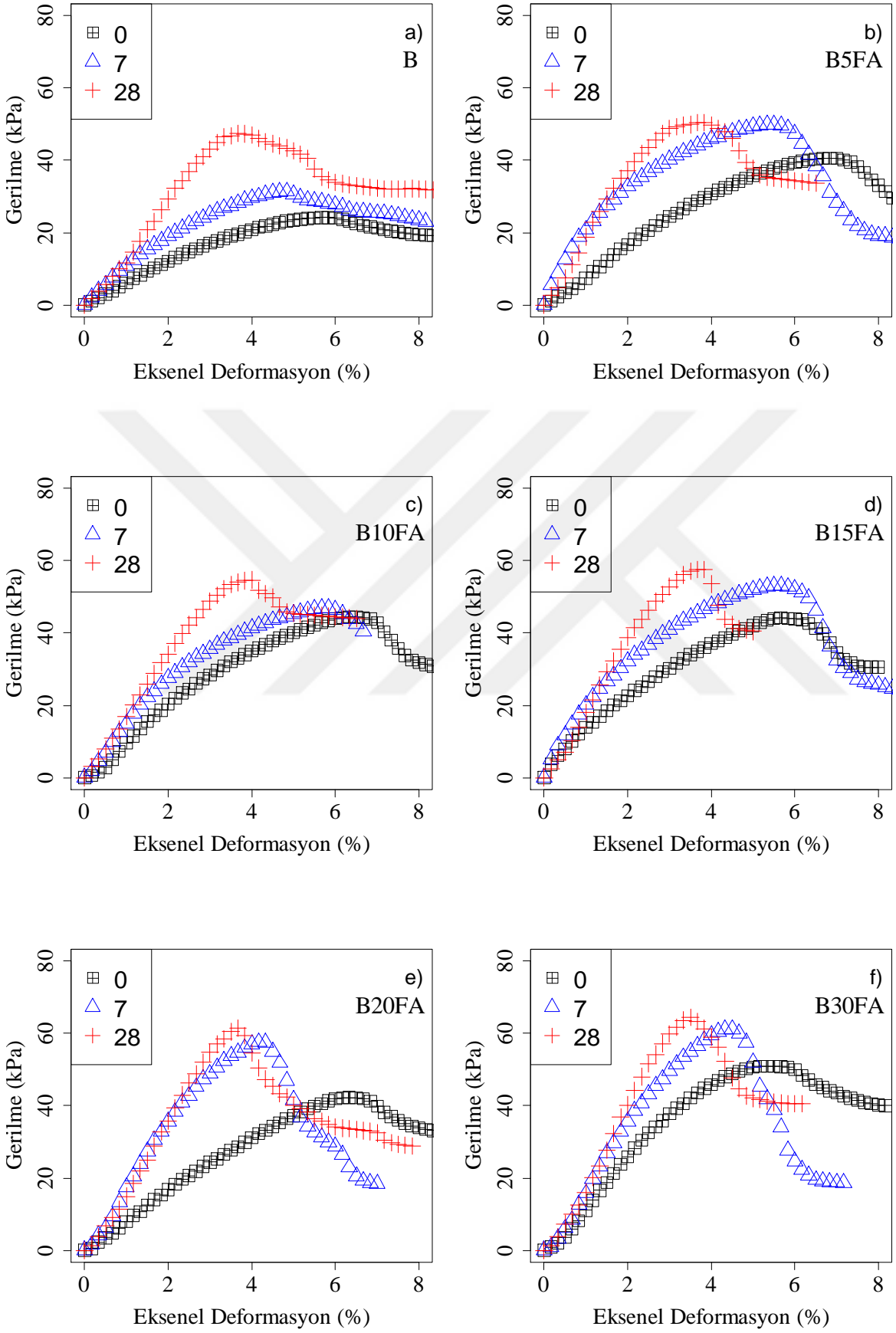
#### **4.4.2 Yüksek Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar**

Bu bölümde yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait eksenel deformasyon-gerilme grafikleri çizilmiştir. Dolaylı çekme deneyinde kür süresinin etkisinin her karışımında gözlenmesi amacıyla bu bölümdeki grafikler oluşturulmuştur. Ayrıca Çizelge 4.6'da B zemin ve bazı karışımlarına (B30FA, B5L ve B30FA5L) ait dolaylı çekme sonuçları verilmiştir. Çizelgede ITS, dolaylı çekme dayanımını ve  $\epsilon$  kırılma anında oluşan yüzdesel deformasyonu göstermektedir. Sonuçlara göre B zemini için ortalama  $\epsilon$  değeri % 3.67 ile % 5.67 aralığında değişmektedir. Yüzdece eksenel deformasyon değerleri B30FA karışımında % 3.50-% 5.33, B5L karışımında % 1.83 -% 3.33 ve B30FA5L karışımında % 1.67 civarında bulunmuştur.

**Çizelge 4.6** B zemin ve seçili karışımları için dolaylı çekme deney sonuçları.

Kür	Numune	B		B30FA		B5L		B30FA5L	
		ITS (kPa)	$\epsilon$ (%)	ITS (kPa)	$\epsilon$ (%)	ITS (kPa)	$\epsilon$ (%)	ITS (kPa)	$\epsilon$ (%)
0	1	23.49	5.67	51.27	5.33	56.06	3.33	48.05	1.67
	2	24.81	5.67	53.51	5.00	57.80	3.33	46.81	1.67
	3	24.18	5.67	47.94	5.67	55.62	3.33	45.16	1.67
	Ort.	24.16	5.67	50.91	5.33	56.49	3.33	46.67	1.67
7	1	32.37	4.83	62.96	4.50	74.02	3.17	61.08	1.83
	2	32.92	5.00	61.36	4.50	70.68	3.33	64.40	1.50
	3	28.99	5.17	59.22	4.50	68.31	3.50	62.11	1.67
	Ort.	31.43	4.83	61.18	4.50	71.00	3.33	62.53	1.67
28	1	47.82	3.67	65.95	3.33	87.55	1.83	93.49	1.50
	2	49.00	3.67	63.20	3.67	86.93	1.83	84.56	1.83
	3	45.66	3.67	64.25	3.50	84.08	1.83	92.32	1.67
	Ort.	47.49	3.67	64.46	3.50	86.19	1.83	90.12	1.67

B zemini ve uçucu kül katkılı karışımlarına ait dolaylı çekme deney sonuçları Şekil 4.12'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre Şekil 4.12a'daki B zeminin 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 5.67 olduğu yerde  $24.16 \pm 0.54$  kPa olarak bulunmuştur.



**Şekil 4.12** ITS deney sonuçları a) B b) B5FA c) B10FA d) B15FA e) B20FA f) B30FA.

Kür süresinin 7 güne çıkması ile B zemine ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 4.83 olduğu durumda  $31.43 \pm 1.74$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde daha düşük bir değerde (% 3.67) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 96.56 oranında artarak  $47.49 \pm 1.38$  kPa olarak bulunmuştur. B zemininde kür sürelerine göre bu deneyden elde edilen dayanımların oluştuğu deformasyonlar, serbest basınç deneyinden bulunanlara göre daha düşük olmuştur. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 3.67 ile % 5.67 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 5.17 ile % 6.17 arasında değişmektedir.

B5FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.12b incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre B5FA kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 6.83 olduğu yerde  $40.96 \pm 1.13$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile B5FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 5.50 olduğu durumda  $49.93 \pm 2.39$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde daha düşük bir değerde (% 3.67) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 23.10 oranında artarak  $50.42 \pm 1.84$  kPa olarak bulunmuştur. B5FA karışımında kür sürelerine göre bu deneyden elde edilen dayanımların oluştuğu deformasyonlar ile serbest basınç deneyinden bulunanlar birbirine yakındır. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 3.67 ile % 6.83 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 4.33 ile % 6.00 arasında değişmektedir.

B10FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.12c incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre B10FA kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 6.33 olduğu yerde  $44.46 \pm 1.71$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile B10FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 5.83 olduğu durumda  $46.99 \pm 1.37$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde daha düşük bir değerde (% 4.00) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 22.87 oranında artarak  $54.63 \pm 2.51$  kPa olarak bulunmuştur. B10FA karışımında kür sürelerine göre bu deneyden elde edilen dayanımların oluştuğu deformasyonlar serbest basınç deneyinden bulunanlara göre biraz daha düşüktür. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm

kürler için ortalama % 4 ile % 6.33 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 5.17 ile % 7.00 arasında değişmektedir.

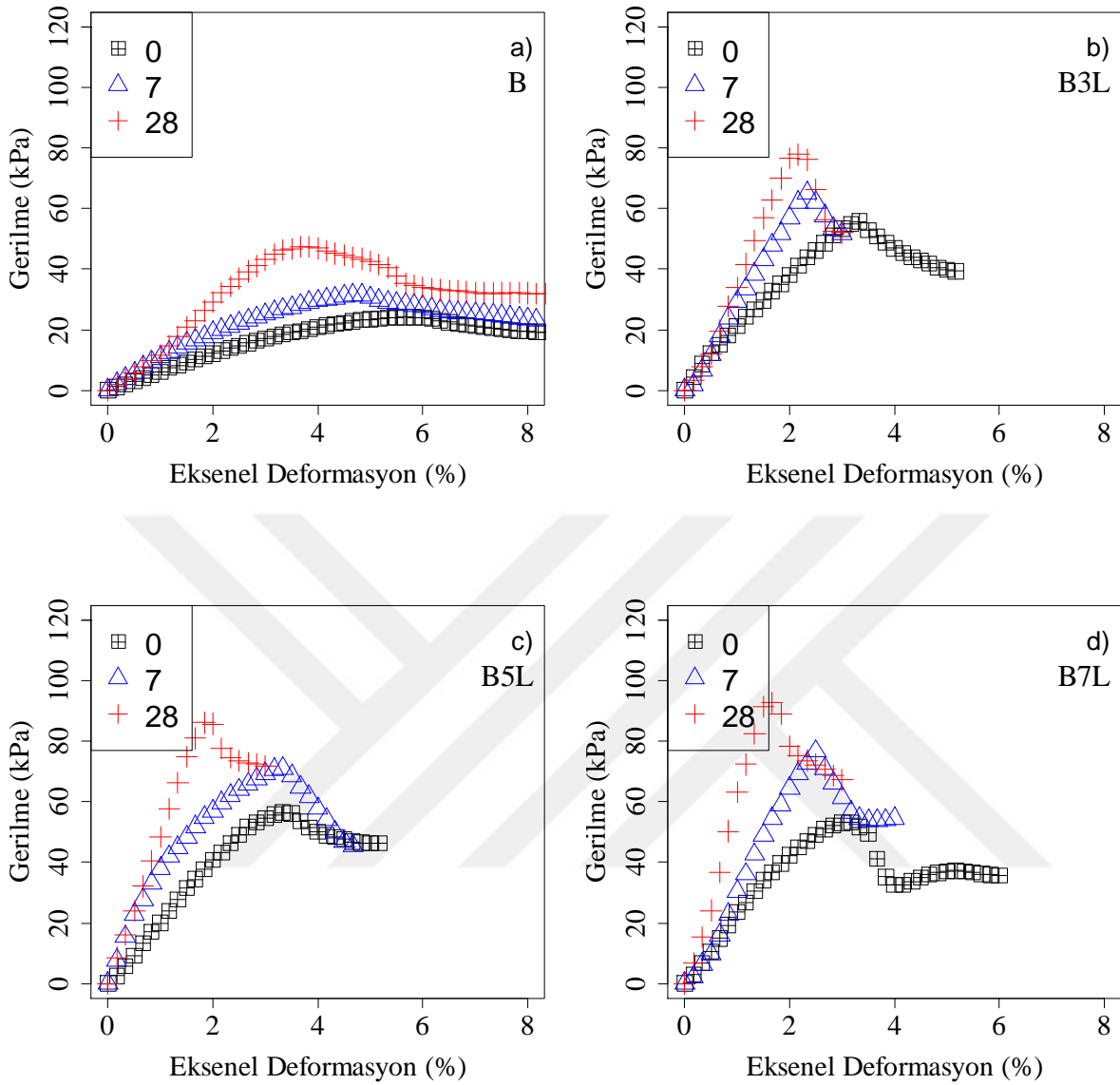
B15FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.12d incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre B15FA kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 5.67 olduğu yerde  $44.20 \pm 1.11$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile B15FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 5.50 olduğu durumda  $53.09 \pm 1.99$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde daha düşük bir değerde (% 3.83) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 30.27 oranında artarak  $57.58 \pm 2.35$  kPa olarak bulunmuştur. B15FA karışımında kür sürelerine göre bu deneyden elde edilen dayanımların olduğu deformasyonlar serbest basınç deneyinden bulunanlardan biraz daha düşüktür. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 3.83 ile % 5.67 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar % 3.33 ile % 7.00 arasında değişmektedir.

B20FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.12e incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre B20FA kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 6.33 olduğu yerde  $42.25 \pm 1.60$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile B20FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 4.17 olduğu durumda  $57.59 \pm 1.62$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde daha düşük bir değerde (% 3.67) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 45.33 oranında artarak  $61.40 \pm 0.98$  kPa olarak bulunmuştur. B20FA karışımında kür sürelerine göre bu deneyden elde edilen dayanımların olduğu deformasyonlar serbest basınç deneyinden bulunanlardan biraz daha yüksektir. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 3.67 ile % 6.33 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar yaklaşık % 3.83 civarındadır.

B30FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.12f incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre B30FA kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama

dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 5.33 olduğu yerde  $50.91 \pm 2.29$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile B30FA kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 4.50 olduğu durumda  $61.18 \pm 1.53$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde daha düşük bir değerde (% 3.50) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 26.62 oranında artarak  $64.46 \pm 1.13$  kPa olarak bulunmuştur. B30FA karışımında kür sürelerine göre bu deneyden elde edilen dayanımların olduğu deformasyonlar serbest basınç deneyinden bulunanlardan biraz daha yüksektir. Dolaylı çekme dayanımında deformasyon değerleri tüm kürler için ortalama % 3.50 ile % 5.33 arasında değişirken, serbest basınç deneyinden bulunanlar ise ortalama % 3.17 ile % 4.17 arasındadır.

B zemini ve kireç katkılı karışımlara ait dolaylı çekme deney sonuçları Şekil 4.13'de verilmektedir. B3L kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.13b incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre B3L kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 3.33 olduğu yerde  $55.78 \pm 0.32$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile B3L kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 2.33 olduğu durumda  $65.30 \pm 4.21$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde 0 güne göre daha düşük bir değerde (% 2.17) olup ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 39.66 oranında artarak  $77.90 \pm 2.20$  kPa olarak bulunmuştur. B3L karışımında serbest basınç dayanımına karşılık gelen deformasyon değerleri kür süresi 0, 7 ve 28 gün için sırasıyla % 3.33, % 6.33 ve % 1.67 olarak geniş bir aralıkta değişmiş iken, bu deneyde dolaylı çekme dayanımına karşılık gelen deformasyonlar % 2.17 ile % 3.33 gibi dar bir aralıkta değişmiştir.



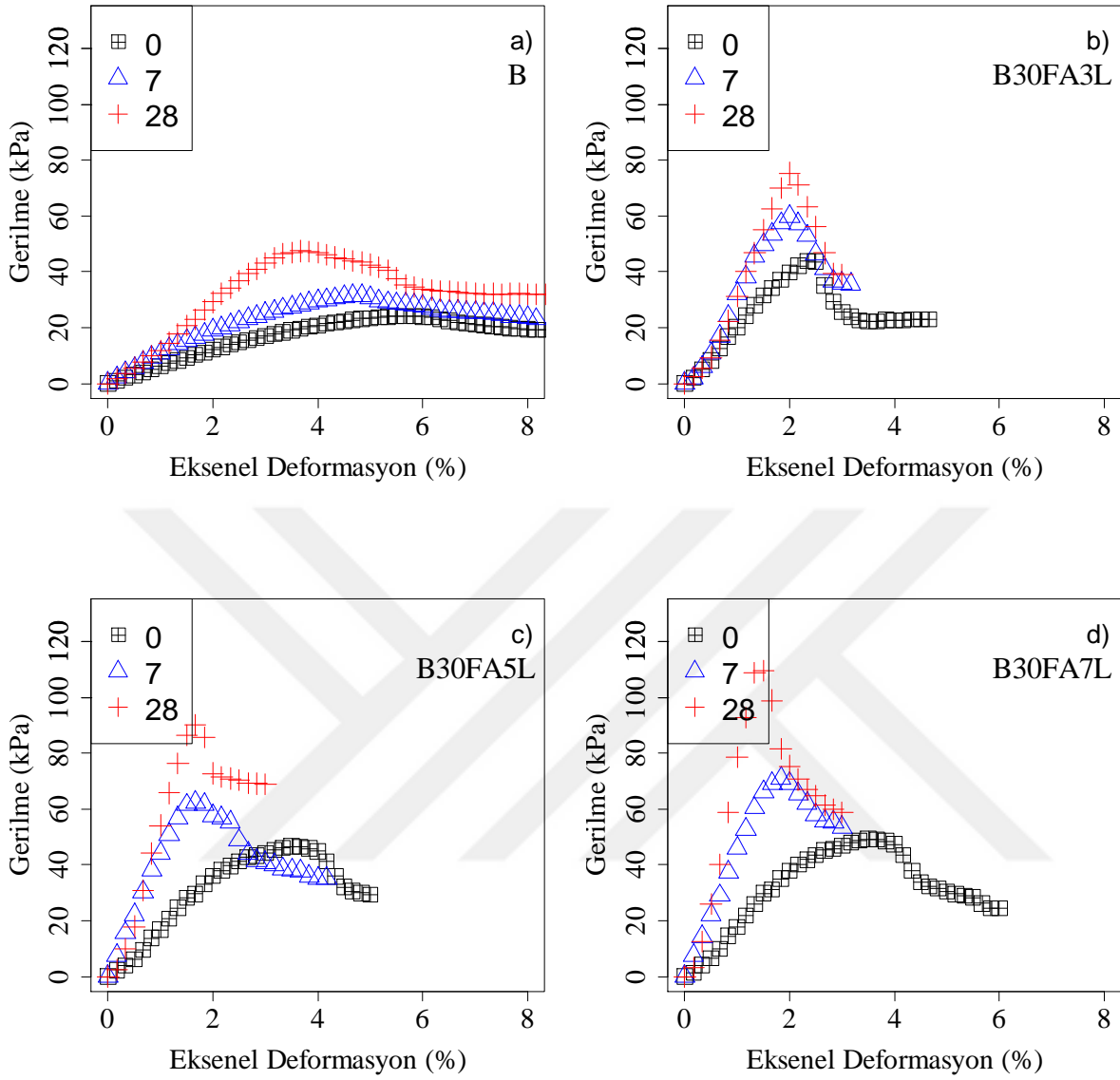
**Şekil 4.13** ITS deney sonuçları a) B b) B3L c) B5L d) B7L.

B5L kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.13c incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre B5L kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 3.33 olduğu yerde  $56.49 \pm 0.94$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile B5L kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 3.33 olduğu durumda  $71.00 \pm 2.34$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde daha düşük bir değerde (% 1.83) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 52.58 oranında artarak  $86.19 \pm 1.51$  kPa olarak bulunmuştur. B5L karışımında serbest basınç dayanımına karşılık gelen deformasyon

değerleri kür süresi 0, 7 ve 28 gün için sırasıyla % 3.17, % 5.67 ve % 1.67 olarak geniş bir aralıkta değişmiş iken, bu deneyde dolaylı çekme dayanımına karşılık gelen deformasyonlar % 1.83 ile % 3.33 gibi dar bir aralıkta değişmiştir.

B7L kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.13d incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre B7L kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 3.17 olduğu yerde  $53.28 \pm 1.82$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile B7L kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 2.50 olduğu durumda  $76.75 \pm 2.04$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde daha düşük bir değerde (% 1.67) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 74.38 oranında artarak  $92.91 \pm 1.58$  kPa olarak bulunmuştur. B7L kodlu karışımda ise serbest basınç deneyinde belirlenen dayanım değerlerine ait deformasyon değerleri % 1.83 ile % 2.83 arasında iken, bu deneyden elde edilenler ise % 1.67 ile % 3.17 arasında değişmektedir.

B zemini ile uçucu kül ve kireç katkılı karışımlara ait dolaylı çekme deney sonuçları Şekil 4.14'de verilmektedir. B30FA3L kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.14b incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre B30FA3L kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 2.33 olduğu yerde  $43.79 \pm 2.38$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile B30FA3L kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 2.00 olduğu durumda  $59.69 \pm 1.88$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde 7 gün ile aynı (% 2.00) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 72.12 oranında artarak  $75.37 \pm 0.66$  kPa olarak bulunmuştur. B30FA3L kodlu karışımda ise serbest basınç deneyinde belirlenen dayanım değerlerine ait deformasyon değerleri % 1.50 ile % 3.33 arasında iken, bu deneyden elde edilenler ise % 2.00 ile % 2.33 arasında değişmektedir.



**Şekil 4.14** ITS deney sonuçları a) B b) B30FA3L c) B30FA5L d) B30FA7L.

B30FA5L kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.14c incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre B30FA5L kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, aksenel deformasyonun % 1.67 olduğu yerde  $46.67 \pm 1.18$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile B30FA5L kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı aksenel deformasyonun % 1.67 olduğu durumda  $62.53 \pm 1.39$  kPa değerine yükselmiştir. Aksenel deformasyon 28 gün kür süresinde de % 1.67 olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 93.10 oranında artarak  $90.12 \pm 3.96$  kPa olarak bulunmuştur. B30FA5L kodlu karışımında ise serbest basınç deneyinde belirlenen

dayanım değerlerine ait deformasyon değerleri % 1.83 ile % 2.33 arasında iken, bu deneyden elde edilenler ise % 1.67 civarındadır. B30FA5L karışımında serbest basınç deneyinden elde edilen dayanımlara karşılık gelen deformasyonlar dolaylı çekme deneyinden bulunanlardan daha düşüktür.

B30FA7L kodlu karışıma ait dolaylı çekme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.14d incelendiğinde kür süresinin artması ile birlikte dolaylı çekme dayanımında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Buna göre B30FA7L kodlu karışımın 0 gün kürlü durumunda ortalama dolaylı çekme dayanımı, eksenel deformasyonun % 3.50 olduğu yerde  $49.29 \pm 2.17$  kPa olarak bulunmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile B30FA7L kodlu karışıma ait dolaylı çekme dayanımı eksenel deformasyonun % 1.83 olduğu durumda  $71.12 \pm 2.34$  kPa değerine yükselmiştir. Eksenel deformasyon 28 gün kür süresinde daha düşük bir değerde (% 1.50) olup, ilgili kür süresindeki dolaylı çekme dayanımı ise 0 gün kür süresine göre % 122.30 oranında artarak  $109.57 \pm 4.35$  kPa olarak bulunmuştur. B30FA7L kodlu karışımında ise serbest basınç deneyinde belirlenen dayanım değerlerine ait deformasyon değerleri % 1.17 ile % 3.33 arasında iken, bu deneyden elde edilenler ise % 1.50 ile % 3.50 arasındadır. B30FA5L karışımında serbest basınç deneyinden elde edilen dayanımlara karşılık gelen deformasyonlar dolaylı çekme deneyinden bulunanlar ile yaklaşık olarak aynıdır.

Uçucu kül katkılı karışımların hepsine ait dolaylı çekme dayanımlarının oluştuğu deformasyon değerleri, kür süreleri ile birlikte değerlendirilerek her karışım için ortalama deformasyon değeri hesaplanmıştır. B zeminin ortalama deformasyon değeri % 4.72'dir. Katkı oranı arttıkça elde edilen dayanıma karşılık gelen ortalama deformasyon değerleri % 10 katkıya kadar (% 10 dahil) az bir miktar artmış, daha sonra eklenen uçucu kül katkısından sonra düşüşe geçmiştir. En yüksek ortalama deformasyon değeri B10FA kodlu karışımında % 5.39 iken, B30FA kodlu karışımında en düşük değeri olan % 4.44'e düşmüştür. Kireç katkılı karışımlar için de düşünüldüğünde, katkı oranı arttıkça elde edilen dayanıma karşılık gelen ortalama deformasyon tüm katkılarda düşük miktarda da olsa bir artış göstermiştir. En yüksek ortalama deformasyon değeri B5L kodlu karışımında % 2.83 iken, B7L kodlu karışımında en düşük değeri olan % 2.45'e azalmıştır. Hem uçucu kül hem de kireç içeren karışımlarda ortalama deformasyon değeri en yüksek B30FA7L kodlu karışımında % 2.28 iken en düşük ise B30FA5L karışımında % 1.67 olmuştur. Tüm karışımlar içerisinde uçucu kül katkısının % 30'a çıkması ile ortalama deformasyon değerinde katkısız B zemine göre önemli bir değişim olmaz iken, kireç katkılı karışımlarda B7L kodlu karışımında % 2.45'e ve B30FA5L karışımında % 1.67'ye düşerken,

yüksek dayanımlı karışımların daha düşük deformasyon değerinde maksimum dolaylı çekme dayanımlarına ulaştıkları sonucuna varılmıştır.

#### 4.5 NEMLİLİK ŞARTLARI DENEY SONUÇLARI

MCV deney sonuçlarının hem düşük hem de yüksek plastisiteli kil ve karışımlarına ait sonuçları aşağıda verilmiştir. Her numune için deney 3'er kez tekrar edilmiştir. Burada x eksenlerindeki verilerin sayısal olarak aynı olması değerlendirmeyi kolaylaştırmıştır. Herhangi bir karışım için sunulan sonuçlar ise 3 numunenin ortalaması olarak hesap edilmiştir.

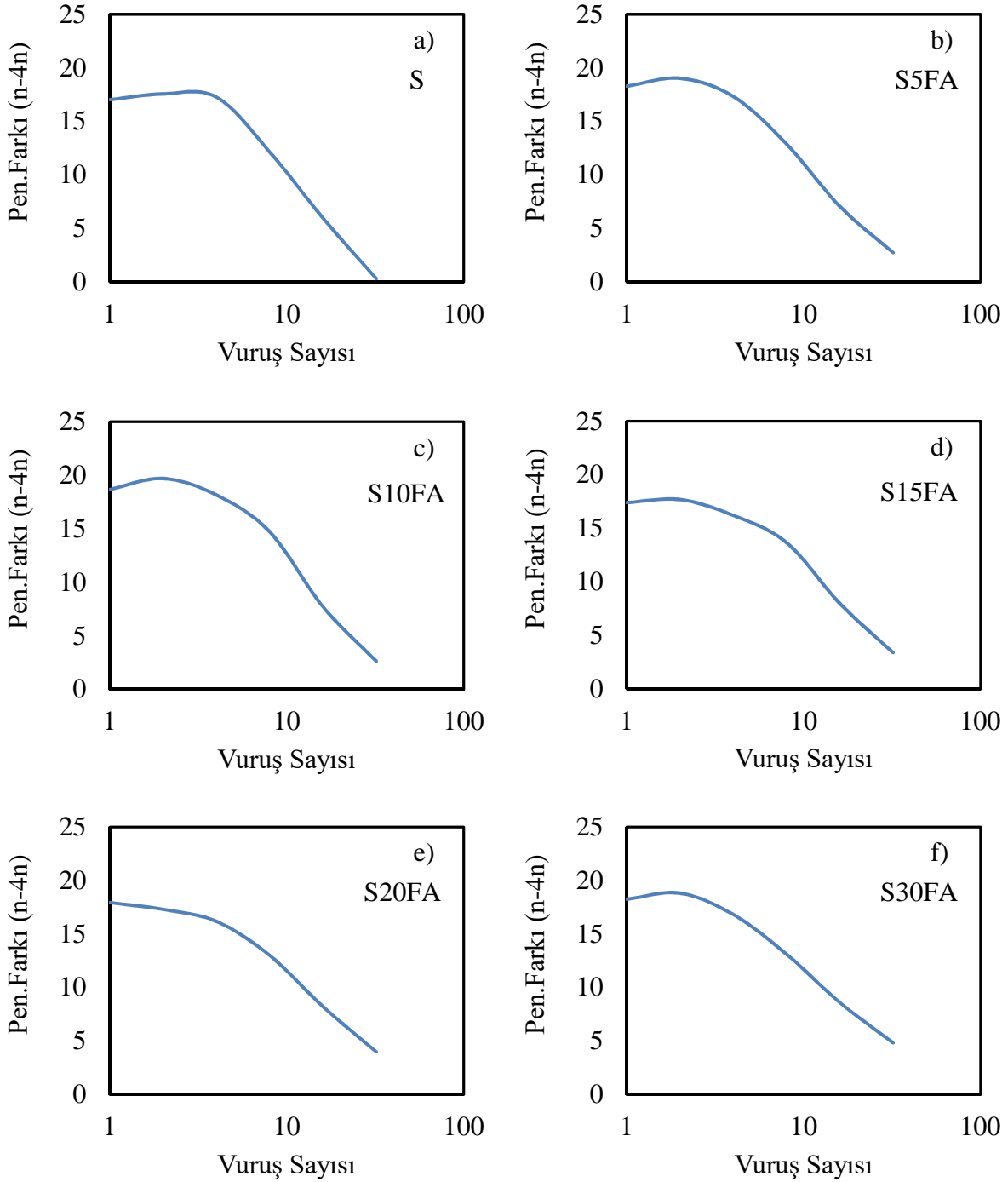
##### 4.5.1 Düşük Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar

Uçucu kül katkılı ve katkısız S zemine ait MCV deney sonuçları Şekil 4.15'de verilmiştir. Ayrıca S zemin ve bazı karışımlarına ait MCV değerleri Çizelge 4.7'de mevcuttur. Bu sonuçlara göre MCV değerlerinin S zeminde 12.48-12.63, S30FA karışımında 14.75-15.08, S5L karışımında 14.89-15.18 ve S30FA5L karışımında 16.34-16.79 aralığında olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.7** S zemin ve bazı karışımlarına ait MCV deney sonuçları.

Numune	S	S30FA	S5L	S30FA5L
1	12.48	15.08	15.18	16.79
2	12.63	14.93	14.89	16.43
3	12.53	14.75	15.08	16.34
Ort.	12.55	14.92	15.05	16.52

Şekil 4.15'de S zemini ve uçucu kül karışımlarına ait nemlilik şartları deneyinden (MCV) elde edilen vuruş sayısı-penetrasyon farkı grafikleri verilmiştir.



**Şekil 4.15** MCV deney sonuçları a) S b) S5FA c) S10FA d) S15FA e) S20FA f) S30FA.

S zemine ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.15a incelendiğinde vuruş sayısının artması ile ilk 4 vuruşta penetrasyon farkında hafif bir yükseliş varken 4 vuruştan sonra keskin bir azalış eğilimi gözlenmiştir. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki farkın 0.3 mm'ye düşmesi sonucu deney sonuçlandırılarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $12.55 \pm 0.06$  olarak tespit edilmiştir.

S5FA kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.15b incelendiğinde vuruş sayısının artması ile ilk 2 vuruşta penetrasyon farkında hafif bir yükseliş varken, 4 vuruşta penetrasyonda küçük bir azalma olmuş, 4 vuruştan sonra ise azalış hız kazanmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 2.74 mm olmuştur. Hesap sonucu MCV değeri  $13.48 \pm 0.14$  olarak belirlenmiştir.

S10FA kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.15c incelendiğinde vuruş sayısının artması ile ilk 2 vuruşta penetrasyon farkında hafif bir yükseliş varken, 4 vuruşta penetrasyonda küçük bir azalma olmuş ve sonra S5FA kodlu karışıma benzer şekilde 4 vuruştan sonra azalış hız kazanmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'nin altına düşerek 2.64 mm olmuştur. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $13.65 \pm 0.16$  olarak tespit edilmiştir.

S15FA kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.15d incelendiğinde vuruş sayısının artması ile ilk 2 vuruşta penetrasyon farkında hafif bir yükseliş varken, 4 vuruşta penetrasyonda küçük bir azalma olmuş ve sonra S5FA kodlu karışıma benzer şekilde yine 4 vuruştan sonra azalış hız kazanmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki farkın 3.38 mm'ye düşmesi ile 256 vuruşa gerek kalmamıştır. Deney sonucunda bulunan MCV değeri  $13.99 \pm 0.13$  olmuştur.

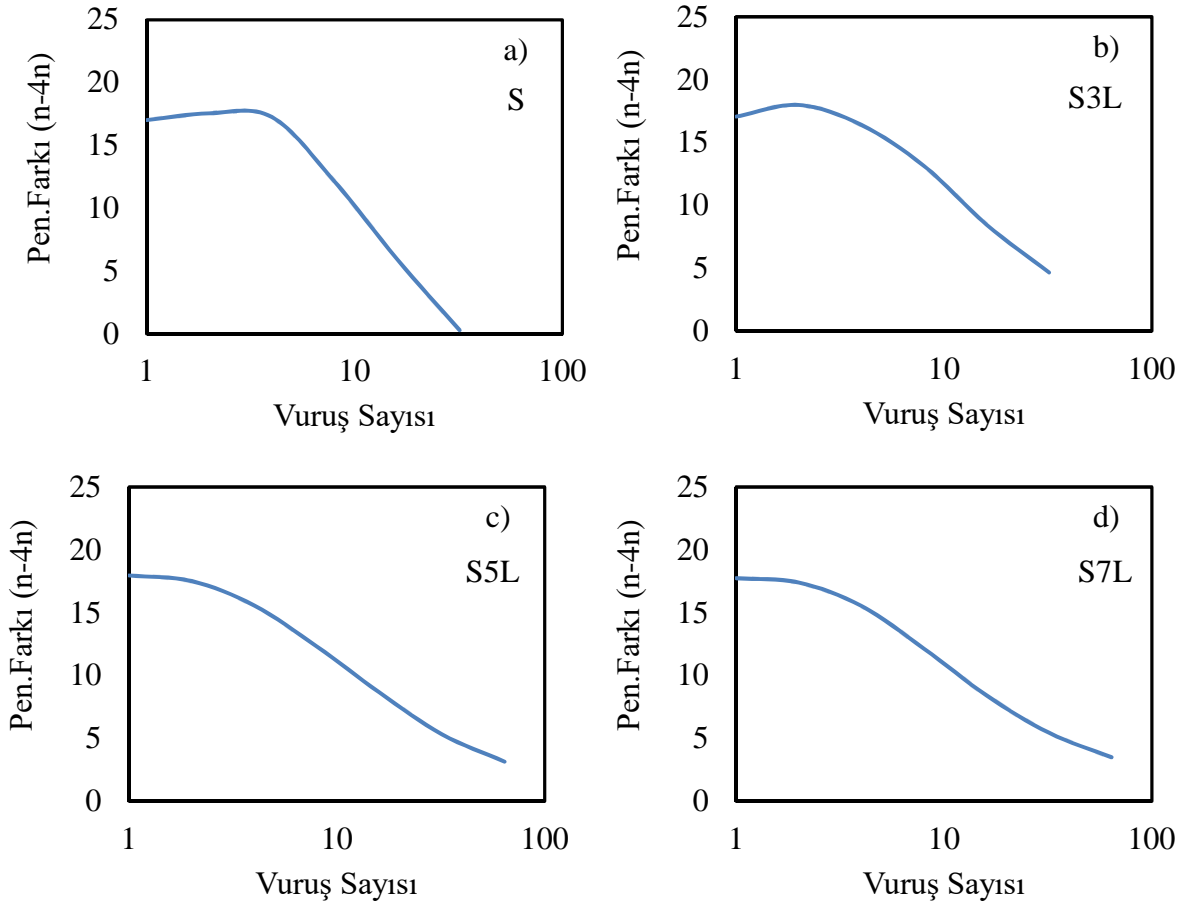
S20FA kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.15e incelendiğinde vuruş sayısının artması ile penetrasyon farkındaki değişimde S, S5FA, S10FA ve S15FA kodlu karışımlardan farklı olarak sürekli bir azalma olmuştur. 4 vuruştan sonra azalış hızı ise ilgili karışımlar ile benzerlik göstermektedir. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 4.00 mm'ye düşmüştür. Bu durumda MCV değeri  $14.34 \pm 0.14$  olarak tespit edilmiştir.

S30FA kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.15f incelendiğinde vuruş sayısının artması ile ilk 2 vuruşta penetrasyon farkında hafif bir yükseliş varken, 4 vuruşta penetrasyonda küçük bir azalma olmuş ve sonra tıpkı S, S5FA, S10FA, S15FA kodlu karışımlar gibi 4 vuruştan sonra azalış hız kazanmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki farkın 4.84 mm olduğu anlaşılmıştır. Bu durumda 256 vuruşa ihtiyaç kalmadığı için deney sonucu MCV değeri  $14.92 \pm 0.13$  olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.15 toplu olarak değerlendirildiğinde uçucu kül katkısı arttıkça 32 vuruş ile 128 vuruş arasındaki penetrasyon farkı 0.3 mm'den 4.84 mm'ye yükselmiştir. Bu durum artan uçucu kül katkısı ile numunenin dayanım olarak daha güçlenmesi sonucu sıkıştırılmasının zorlaştığının göstergesidir. S20FA karışımı hariç diğer S zemin ve uçucu kül katkılı diğer karışımların penetrasyon farkı değerleri ilk 2 vuruşta artış daha sonra da azalış eğilimi göstermiştir. Vuruş sayısı henüz 1 ve 2 iken penetrasyon farkında yeterli bir etki mevcut olmamıştır. S20FA karışımı için de 1 vuruş ve 2 vuruş sırasıyla 17.94 ve 17.30 mm penetrasyon farkına sahip olup önemli bir değişim göstermemiştir. Bu açıdan S20FA karışımının da diğer karışımlardan belirgin bir farkının olmadığı anlaşılmaktadır.

Kireç katkılı numunelerden ilki olan S3L kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.16b incelendiğinde, vuruş sayısının artması ile ilk 2 vuruşta penetrasyon farkında hafif bir yükseliş varken, 4 vuruşta penetrasyonda küçük bir azalma olmuştur. Daha sonra tıpkı S, S5FA, S10FA, S15FA, S30FA kodlu karışımlar gibi 4 vuruştan sonra azalışın hız kazandığı görülmektedir. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki farkın 4.66 mm olarak belirlenmiştir. Buna göre yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $14.28 \pm 0.14$  olarak tespit edilmiştir.

S5L kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.16c incelendiğinde S3L kodlu karışımda tüm vuruş sayılarında penetrasyonda azalma gözlenmiştir. 4 vuruştan sonraki azalışın hızlanması ise tüm karışımlarda ortak bir özellik olarak ortaya çıkmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla olduğu için (5.33 mm) olup, 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark 3.16 mm'ye düşmesi sonucu deney sonuçlandırılarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlara göre MCV değeri  $15.05 \pm 0.12$  olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.16 MCV deney sonuçları a) S b) S3L c) S5L d) S7L.

S7L kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.16d incelendiğinde S20FA kodlu karışımda olduğu gibi tüm vuruş sayılarında penetrasyonda azalma gözlenmiştir. 4 vuruştan sonraki azalışın hızlanması ise tüm karışımlar ile ortak bir özelliği olarak ortaya çıkmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla olduğu için (5.45 mm) olup, 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark 3.50 mm değerine gelmiştir. Bu durum dikkate alınarak yapılan hesaplama sonucu MCV değeri  $15.36 \pm 0.10$  olarak tespit edilmiştir.

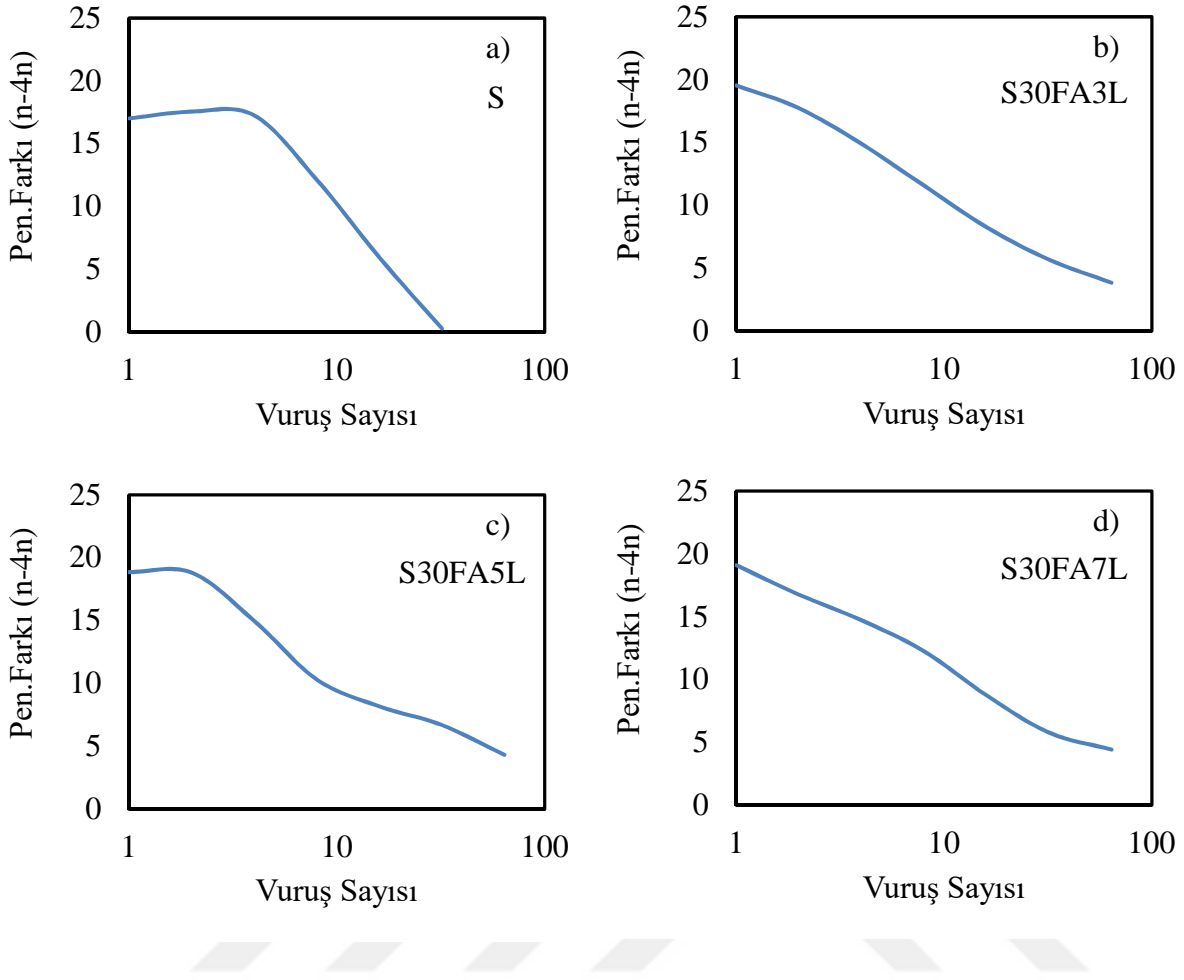
Şekil 4.16 toplu olarak değerlendirildiğinde uçucu kül katkısı arttıkça 32 vuruş ile 128 vuruş arasındaki penetrasyon farkı 0.3 mm'den 5.45 mm'ye yükselmiştir. Bu durum artan kireç katkısı ile numunenin dayanım olarak daha güçlenmesi sonucu sıkıştırılmasının zorlaştığının göstergesidir. S3L karışımında 128 vuruş yeterli iken penetrasyon 5 mm'nin altında iken S5L ve S7L karışımları için 256 vuruşa ihtiyaç duyulmuştur. Bu durum, ilgili karışımların MCV değerinin S3L'den daha yüksek olduğunu görsel olarak da anlatmaktadır. Ayrıca Şekil 4.16b'de

S3L karışımına ait grafikte penetrasyon farkı ilk başta bir miktar yükselirken, S5L ve S7L karışımlarında ise grafik sürekli azalma eğilimi göstermiştir. Sonuç olarak S5L ve S7L karışımları hem içerdikleri daha yüksek kireç oranları hem de grafiğin davranışı düşünüldüğünde S3L'ye göre daha iyi performans göstermişlerdir. S zemine ait grafikte 4 penetrasyona kadar artış var iken S3L karışımında 2 penetrasyona kadar artış vardır.

S zemin ile uçucu kül ve kireç katkılı numunelere ait sonuçlar Şekil 4.17'de sunulmuştur. S30FA3L kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.17a incelendiğinde S20FA, S5L ve S7 kodlu karışımlarda olduğu gibi tüm vuruş sayılarında penetrasyonda azalma gözlenmiştir. S20FA, S5L ve S7L kodlu karışımlarda ilk 4 vuruştaki azalma hızı daha az iken S30FA3L kodlu karışımda daha ivmeli bir azalış görülmüştür. 4 vuruştan sonraki azalışın eğimi ise diğer grafikler ile benzerlik göstermektedir. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla (5.68 mm) olduğu için 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki farkın 3.84 mm'ye düşmesi sonucu deney sonuçlandırılarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $15.00 \pm 0.16$  olarak tespit edilmiştir.

S30FA5L kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.17b incelendiğinde S20FA kodlu karışımda olduğu gibi tüm vuruş sayılarında penetrasyonda azalma gözlenmiştir. S30FA5L kodlu karışımda 4 vuruş ve 8 vuruştaki azalma hızı, 8 vuruştan sonra yavaşlamıştır. Bu durum, ilgili karışımı diğer karışımlardan ayırt edici bir özellik olarak göze çarpmaktadır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla (6.70 mm) olduğu için 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark 4.32 mm'ye düşmesi sonucu deney sonuçlandırılarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $16.52 \pm 0.19$  olarak tespit edilmiştir.

S30FA7L kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.17c incelendiğinde vuruş sayısının artması ile S20FA kodlu karışımda olduğu gibi tüm vuruş sayılarında penetrasyonda azalma gözlenmiştir. 4 vuruştan sonraki azalışın hızlanması ise tüm karışımlar ile ortak bir özelliği olarak ortaya çıkmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla (5.78 mm) olduğu için 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark 4.42 mm'ye düşmesi sonucu deney sonuçlandırılarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $15.85 \pm 0.12$  olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.17 MCV deney sonuçları a) S b) S30FA3L c) S30FA5L d) S30FA7L.

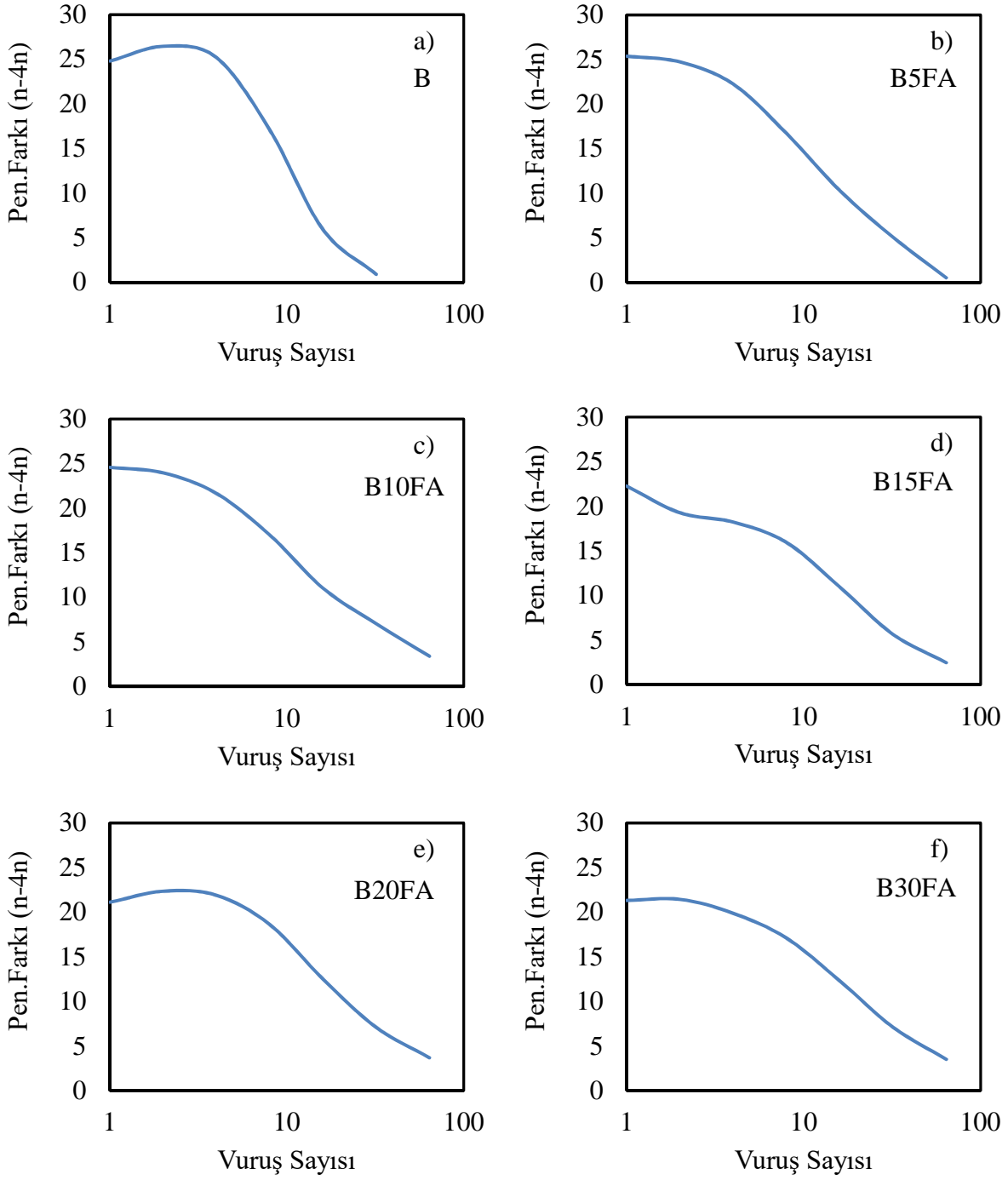
#### 4.5.2 Yüksek Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar

Uçucu kül katkılı ve katkısız B zemine ait MCV deney sonuçları bu bölümde verilmiştir. B zemin ve bazı karışımlarına ait MCV değerleri Çizelge 4.8'de mevcuttur. Bu sonuçlara göre MCV değerlerinin B zeminde 12.17-12.44, B30FA karışımında 16.13-16.42, B5L karışımında 19.43-19.61 ve B30FA5L karışımında 19.28-19.53 aralığında olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.8 B zemin ve bazı karışımlarına ait MCV deney sonuçları.

Numune	B	B30FA	B5L	B30FA5L
1	12.17	16.42	19.61	19.53
2	12.44	16.26	19.43	19.35
3	12.25	16.13	19.49	19.28
Ort.	12.29	16.27	19.51	19.39

Şekil 4.18'de B zemini ve uçucu kül karışımlarına ait nemlilik şartları deneyinden (MCV) elde edilen vuruş sayısı-penetrasyon farkı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.18 MCV deney sonuçları a) B b) B5FA c) B10FA d) B15FA e) B20FA f) B30FA.

B zemine ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.18a incelendiğinde vuruş sayısının artması ile ilk 4 vuruşta penetrasyon farkında hafif bir yükseliş varken 4 vuruştan sonra keskin bir azalış eğilimi gözlenmiştir. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki

farkın 0.90 mm'ye düşmesi sonucu deney sonuçlandırılarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $12.29 \pm 0.11$  olarak tespit edilmiştir.

B5FA kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.18b incelendiğinde tüm vuruş sayılarında penetrasyonda azalma gözlenmiştir. 4 vuruştan sonraki azalışın hızlanması ise tüm karışımlar ile ortak bir özelliği olarak ortaya çıkmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla (5.08 mm) olduğu için, 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark 0.54 mm'ye düşmesi sonucu deney sonuçlandırılarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $14.54 \pm 0.11$  olarak tespit edilmiştir.

B10FA kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.18c incelendiğinde tüm vuruş sayılarında penetrasyonda azalma gözlenmiştir. 4 vuruştan sonraki azalışın hızlanması ise tüm karışımlar ile ortak bir özelliği olarak ortaya çıkmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla (7.04 mm) olduğu için, 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark 3.40 mm'ye düşmesi sonucu deney sonuçlandırılarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $15.09 \pm 0.16$  olarak tespit edilmiştir.

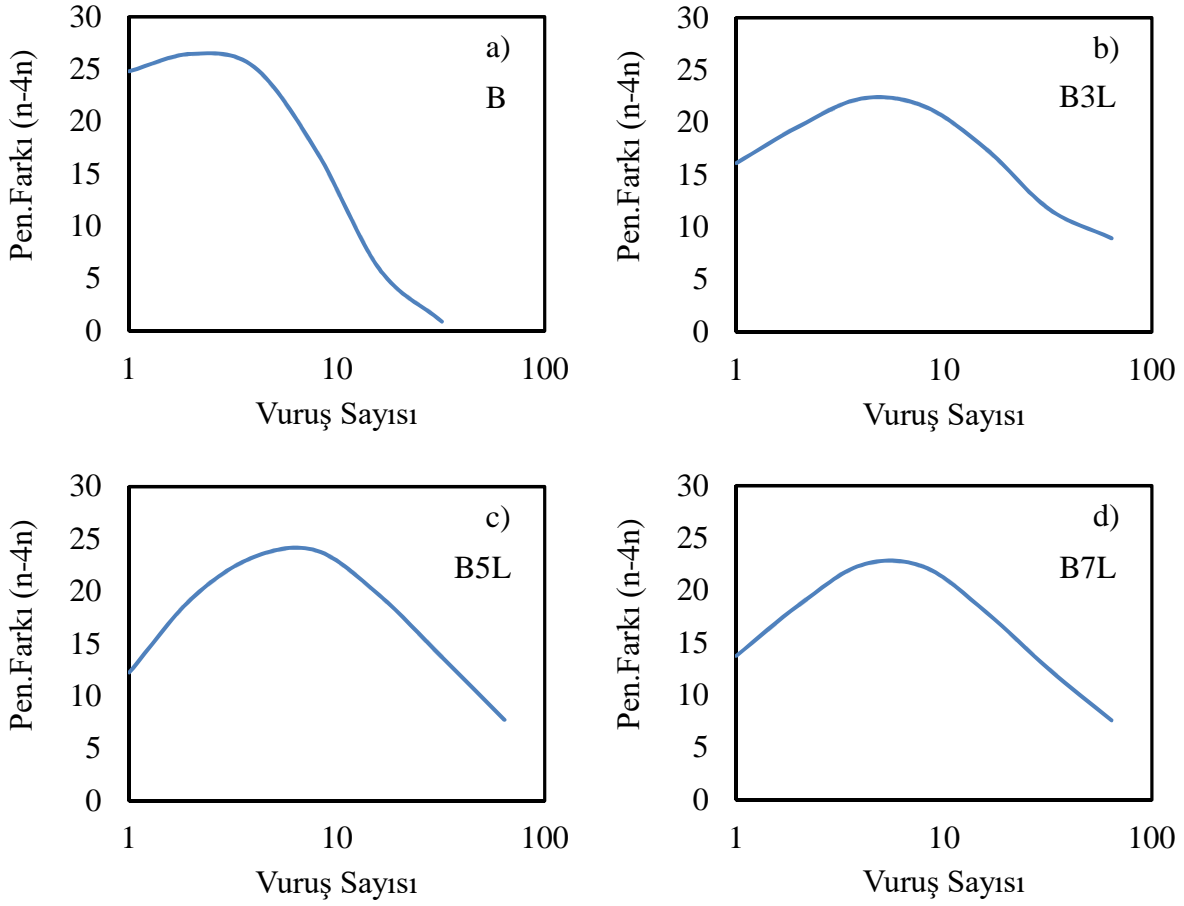
B15FA kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.18d incelendiğinde tüm vuruş sayılarında penetrasyonda azalma gözlenmiştir. 4 vuruştan sonraki azalışın hızlanması ise tüm karışımlar ile ortak bir özelliği olarak ortaya çıkmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla (5.64 mm) olduğu için, 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark 2.46 mm'ye düşmesi sonucu deney sonuçlandırılarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $15.42 \pm 0.15$  olarak tespit edilmiştir.

B20FA kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.18e incelendiğinde gibi tüm vuruş sayılarında penetrasyonda azalma gözlenmiştir. 4 vuruştan sonraki azalışın hızlanması ise tüm karışımlar ile ortak bir özelliği olarak ortaya çıkmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla (7.08 mm) olduğu için, 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark 3.68 mm'ye düşmesi sonucu deney sonuçlandırılarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $15.73 \pm 0.15$  olarak tespit edilmiştir.

B30FA kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.18f incelendiğinde tüm vuruş sayılarında penetrasyonda azalma gözlenmiştir. 4 vuruştan sonraki azalışın hızlanması ise tüm karışımlar ile ortak bir özelliği olarak ortaya çıkmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla (7.10 mm) olduğu için, 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark 3.50 mm'ye düşmesi sonucu deney sonuçlandırılarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $16.27 \pm 0.12$  olarak tespit edilmiştir.

B zemin ve kireçli karışımların sonuçları Şekil 4.19'da verilmiştir. B3L kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.19b incelendiğinde ilk 6 vuruşta penetrasyon farkında belirgin bir yükseliş gözlenmiştir. Grafikteki bu değişim, ilgili karışımın uçucu küllü karışımlardan daha farklı bir zemin davranışı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Azalış hızı altı vuruştan sonra 32 vuruşa kadar hızlanmış olup 32 ile 64 vuruş arasında yavaşlamıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla (11.74 mm) olduğu için, 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark yine 5 mm'nin üzerinde kalarak 8.95 mm'ye düşmüştür. Deneyde 256 vuruş olmasına rağmen penetrasyon farkı 5 mm'nin altına düşmemiştir ve BS EN 13286-46 (2003) standardına dayanarak daha fazla vuruş yapılmamıştır. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $18.60 \pm 0.18$  olarak tespit edilmiştir.

B5L kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.19c incelendiğinde tıpkı B3L kodlu karışımda olduğu gibi ilk 6 vuruşta penetrasyon farkında belirgin bir yükseliş gözlenmiştir. Grafikteki bu değişim, ilgili karışımın uçucu küllü karışımlardan daha farklı bir zemin davranışı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Altı vuruştan sonra azalış sabit bir ivme ile gerçekleşmiş olup bu anlamda B3L kodlu karışımdan farklı olarak aynı kalmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla (13.73 mm) olduğu için, 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark yine 5 mm'nin üzerinde kalarak 7.74 mm'ye düşmüştür. Deneyde 256 vuruş olmasına rağmen penetrasyon farkı 5 mm'nin altına düşmemiştir ve BS EN 13286-46 (2003) standardına dayanarak daha fazla vuruş yapılmamıştır. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $19.51 \pm 0.07$  olarak tespit edilmiştir.

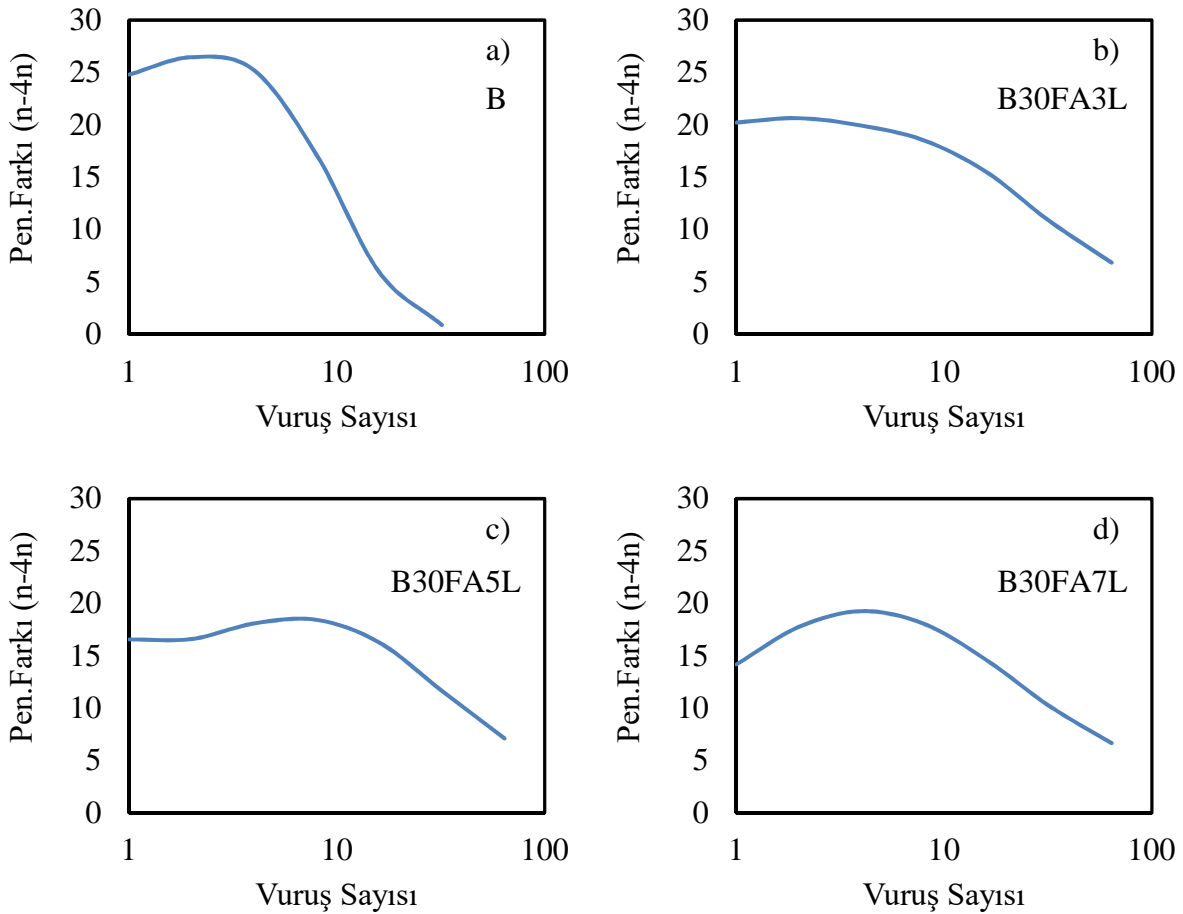


Şekil 4.19 MCV deney sonuçları a) B b) B3L c) B5L d) B7L.

B7L kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.19d incelendiğinde grafiğin davranışı B3L ve B5L kodlu karışımlar ile benzerlik göstermekte olup farklı olarak 4 vuruş ve 6 vuruş arasında penetrasyon farkı neredeyse sabit kalmıştır. İlk 6 vuruşta penetrasyon hızında artış var iken tıpkı B5L kodlu karışım gibi 6 vuruştan sonra aynı ivme ile penetrasyonda azalma gözlenmiştir. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla (12.47 mm) olduğu için, 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark yine 5 mm'nin üzerinde kalarak 7.60 mm'ye düşmüştür. Deneyde 256 vuruş olmasına rağmen penetrasyon farkı 5 mm'nin altına düşmemiştir ve BS EN 13286-46 (2003) standardına dayanarak daha fazla vuruş yapılmamıştır. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $19.19 \pm 0.14$  olarak tespit edilmiştir.

B zemin ile uçucu kül ve kireçli lkarışımların sonuçları Şekil 4.20'de sunulmuştur. B30FA3L kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.20b incelendiğinde tüm vuruş sayılarında penetrasyonda azalma gözlenmiştir. 4 vuruştan sonraki azalışın hızlanması ise tüm

karışımlar ile ortak bir özelliği olarak ortaya çıkmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla (10.85 mm) olduğu için, 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark yine 5 mm'nin üzerinde kalarak 6.85 mm'ye düşmüştür. Deneyde 256 vuruş olmasına rağmen penetrasyon farkı 5 mm'nin altına düşmemiştir ve BS EN 13286-46 (2003) standardına dayanarak daha fazla vuruş yapılmamıştır. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $18.84 \pm 0.15$  olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.20 MCV deney sonuçları a) B b) B30FA3L c) B30FA5L d) B30FA7L.

B30FA5L kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.20c incelendiğinde tüm vuruş sayılarında penetrasyonda azalma gözlenmiştir. 4 vuruştan sonraki azalışın hızlanması ise tüm karışımlar ile ortak bir özelliği olarak ortaya çıkmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla (11.65 mm) olduğu için, 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark yine 5 mm'nin üzerinde kalarak 7.10 mm'ye düşmüştür. Deneyde 256 vuruş olmasına rağmen penetrasyon farkı 5

mm'nin altına düşmemiştir ve BS EN 13286-46 (2003) standardına dayanarak daha fazla vuruş yapılmamıştır. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $19.39 \pm 0.11$  olarak tespit edilmiştir.

B30FA7L kodlu karışıma ait MCV deney sonucunun verildiği Şekil 4.20d incelendiğinde vuruş ise S20FA kodlu karışımda olduğu gibi tüm vuruş sayılarında penetrasyonda azalma gözlenmiştir. 4 vuruştan sonraki azalışın hızlanması ise tüm karışımlar ile ortak bir özelliği olarak ortaya çıkmıştır. Vuruş sayısının 128 olması ile 32 vuruş ve 128 vuruş arasındaki fark 5 mm'den fazla (10.23 mm) olduğu için, 256 vuruş değeri denenmiştir. 256 vuruş sonucunda 64 ile 256 vuruş arasındaki fark yine 5 mm'nin üzerinde kalarak 6.66 mm'ye düşmüştür. Deneyde 256 vuruş olmasına rağmen penetrasyon farkı 5 mm'nin altına düşmemiştir ve BS EN 13286-46 (2003) standardına dayanarak daha fazla vuruş yapılmamıştır. Burada yapılan hesaplama ile bulunan MCV değeri  $18.65 \pm 0.17$  olarak tespit edilmiştir.

#### **4.6 ANİ TAŞIMA İNDEKSİ DENEY SONUÇLARI**

Düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait ani taşıma indeksi (IBI) deney sonuçları değerlendirilmiştir. Deney sonuçları, kireç içermeyen uçucu kül katkılı, uçucu kül içermeyen kireç katkılı ve hem kireç hem de uçucu kül katkılı karışımların değerlendirilmesini içeren grafikler ile yorumlanmıştır. Her numune için deney 3'er kez tekrar edilmiştir. Burada x eksenlerindeki verilerin sayısal olarak aynı olması değerlendirmeyi kolaylaştırmıştır. Herhangi bir karışım için sunulan sonuçlar ise 3 numunenin ortalaması olarak hesap edilmiştir.

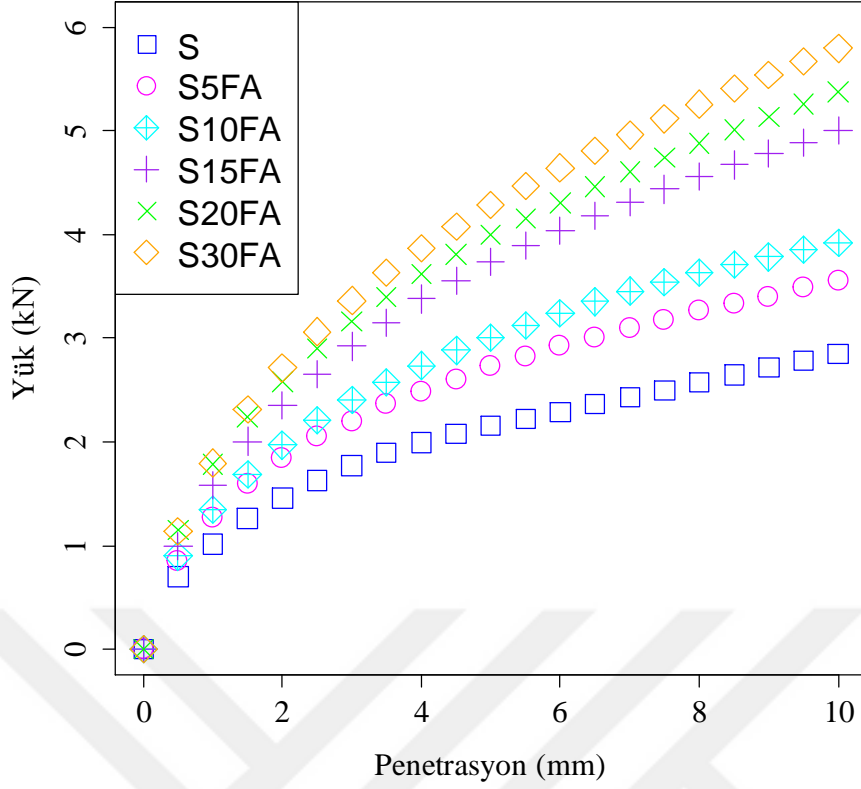
##### **4.6.1 Düşük Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar**

Bu bölümde düşük plastisiteli killi zemin (S) ve karışımlarına ait grafikler mevcuttur. Ayrıca Çizelge 4.9'da zemin ve bazı seçili karışımlarına ait ani taşıma indeksi (IBI) sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre IBI değerlerinin S zeminde % 11.04-13.74, S30FA karışımında % 22.09-23.30, S5L karışımında % 28.13-30.03 ve S30FA5L karışımında % 28.65-32.79 aralığında olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.9** S zemin ve bazı karışımlarına ait IBI deney sonuçları

Numune	S	S30FA	S5L	S30FA5L
1	% 13.74	% 23.30	% 29.86	% 28.65
2	% 12.14	% 23.99	% 30.03	% 32.79
3	% 11.04	% 22.09	% 28.13	% 30.03
Ort.	% 12.31	% 23.13	% 29.33	% 30.49

Deney sonuçları ayrıca Şekil 4.21, 4.22 ve 4.23'te detaylandırılmıştır. Şekil 4.21'de uçucu kül katkılı karışımların, 4.22'de kireç katkılı karışımların ve 4.23'de ise hem % 30 uçucu kül ile değişik oranlarda (%3, % 5 ve % 7) kireç içeren katkılı karışımların ani taşıma indeksi deney sonuçları mevcuttur. Buna göre Şekil 4.21'de penetrasyon-yük grafiği verilen uçucu kül katkılı ve katkısız S zemine ait ani taşıma indeksi deney sonuçları incelendiğinde, karışımdaki uçucu kül katkısı arttıkça, IBI değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır. Buna göre S zeminin IBI değeri %  $12.31 \pm 1.11$  olarak tespit edilmiştir. S30FA kodlu karışım, kireç içermeyen uçucu kül katkılı karışımlar arasında en yüksek IBI değerine sahiptir. İlgili karışımın IBI değeri %  $23.13 \pm 0.78$  olarak bulunmuştur.

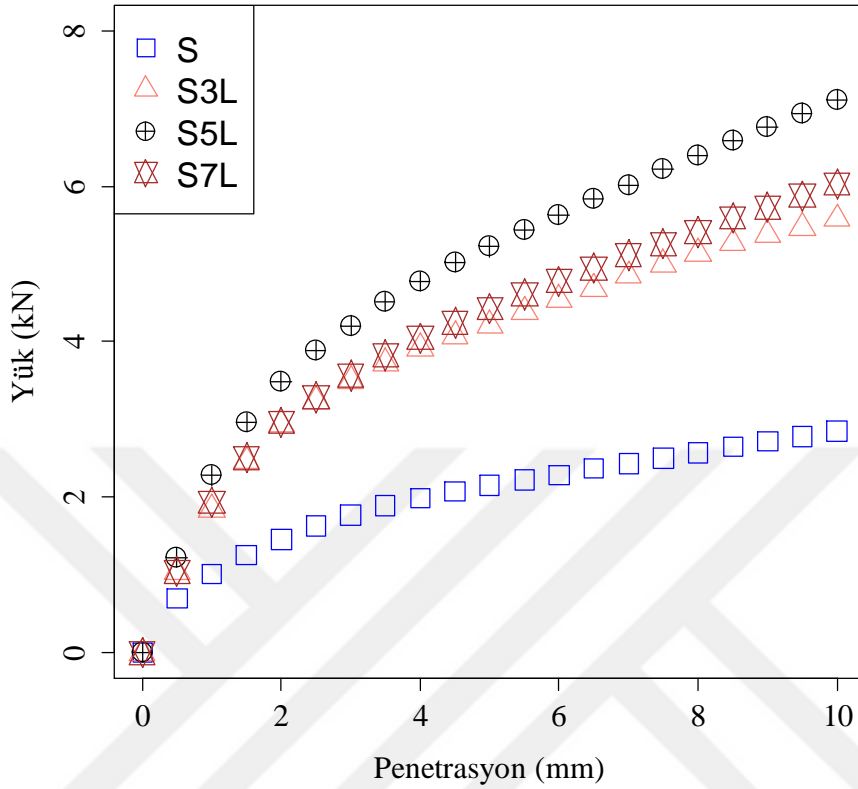


**Şekil 4.21** Uçucu kül katkıları ve katkısız S zeminin IBI deney sonuçları.

S20FA ve S30FA kodlu karışımların penetrasyon-yük grafikleri, penetrasyonun ilk 4 mm'sinde birbirine oldukça yakın iken daha sonra artan penetrasyon ile aralarında fark oluşmuştur. S zeminde penetrasyon 4 mm olduktan sonra, yük artış hızında azalma meydana gelmiştir. Uçucu kül katkısı arttıkça ilk 5 mm penetrasyondaki yük artış hızlarında, 10 mm ve 5 mm arasındaki artışa göre önemli farklılıklar oluşmuştur. S zeminde 5 mm penetrasyondaki yük, 2 mm'dekine göre % 47.60 oranında artarken % 15 uçucu kül katkıları S15FA kodlu karışımda aynı durum için artış oranı % 58.47 olarak gerçekleşmiştir. Böylece yük artışı % 47.60 ile % 58.47 arasında olmuştur. Penetrasyonun 5 mm'den sonraki kısmında ise artış hızı Şekil 4.21'deki tüm karışımlar için yaklaşık olarak aynı kalmıştır. S zeminde 10 mm penetrasyondaki yük, 5 mm penetrasyondaki yükten % 32.25 daha fazla iken, en yüksek artışın gerçekleştiği S30FA kodlu karışımda artış oranı % 35.29 olarak bulunmuştur. 10 mm penetrasyondaki yük ile 5 mm penetrasyondaki yük arasındaki artış dar bir aralıkta (% 30.24 ve % 35.29 arası) kalmıştır.

Şekil 4.22'de penetrasyon-yük grafiği verilen kireç katkıları ve katkısız S zemine ait ani taşıma indeksi deney sonuçları incelendiğinde, karışımdaki kireç katkısı arttıkça, IBI değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır. S5L kodlu karışım, uçucu kül içermeyen kireç katkıları karışımlar

arasında en yüksek IBI değerine sahiptir. İlgili karışımın IBI değeri  $\% 29.34 \pm 0.86$  olarak bulunmuştur.

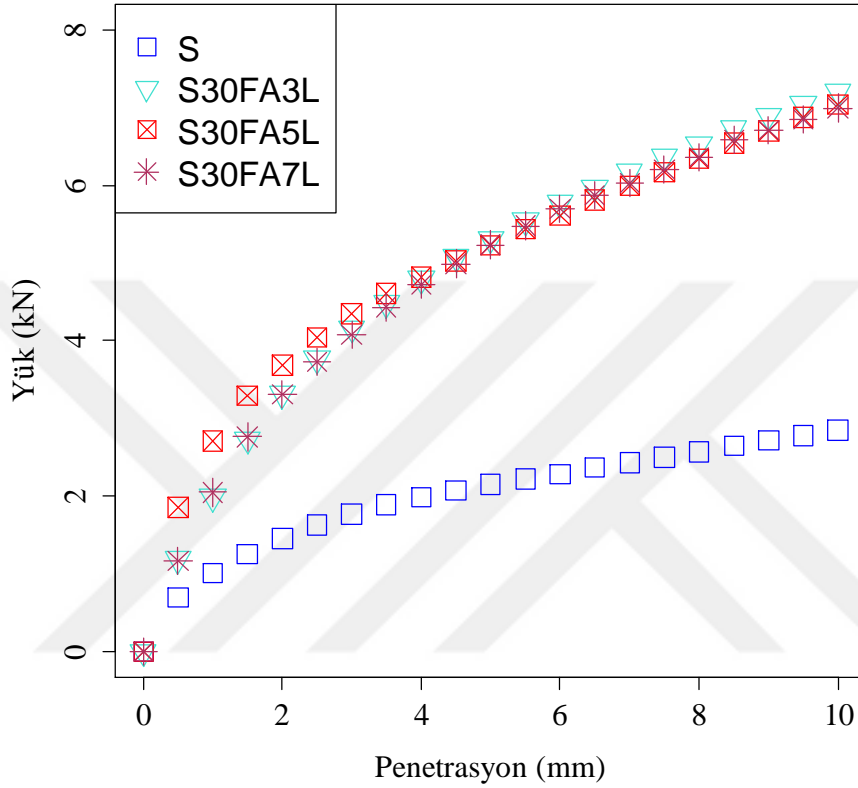


Şekil 4.22 Kireç katkıları S zemininin IBI deney sonuçları.

Kireç katkısı arttıkça ilk 5 mm penetrasyondaki yük artış hızlarında, 10 mm ve 5 mm arasındaki artışa göre önemli farklılıklar oluşmuştur. S zeminde 5 mm penetrasyondaki yük, 2 mm'dekine göre  $\% 47.60$  oranında artarken  $\% 3$  kireç katkıları S3L kodlu karışımda aynı durum için artış oranı S zemine göre daha az olup  $\% 43.26$  olarak gerçekleşmiştir. S5L ve S7L kodlu karışımlarda ise aynı durumda S3L karışımının aksine artış S zeminden daha fazla olup sırasıyla  $\% 49.86$  ve  $\% 49.36$  olarak gerçekleşmiştir. Burada artış hızı  $\% 43.26$  ile  $\% 49.86$  aralığında gerçekleşmiş olup kireç içermeyen uçucu kül katkıları S zeminine göre daha dar bir aralıktır.

Penetrasyonun 5 mm'den sonraki kısmında ise S artış miktarı S3L kodlu karışımda S ile neredeyse aynı iken, S5L ve S7L kodlu karışımlarda S zemine göre daha fazla olmuştur. S zemin için 10 mm penetrasyondaki yük değeri, 5 mm penetrasyondaki yük değerinden  $\% 32.25$  daha fazladır. S3L kodlu karışımda artış  $\% 32.37$  iken, S5L ve S7L kodlu karışımlardaki artış hızı aynı durum için sırasıyla  $\% 36.35$  ve  $\% 36.14$  olmuştur. 10 mm penetrasyondaki yük ile 5 mm penetrasyondaki yük arasındaki artış dar bir aralıktadır ( $\% 32.25$  ve  $\% 36.35$  arası) kalmıştır.

Şekil 4.23'de penetrasyon-yük grafiği verilen % 30 uçucu kül ve kireç katkısı içeren ve katkısız S zemine ait ani taşıma indeksi deney sonuçları incelendiğinde, karışımdaki kireç katkısı arttıkça, IBI değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır. S30FA5L kodlu karışım, % 30 uçucu kül + kireç içeren katkılı karışımlar arasında en yüksek IBI değerine sahiptir. İlgili karışımın IBI değeri  $30.49 \pm 1.72$  olarak bulunmuştur.



**Şekil 4.23** % 30 Uçucu kül katkısı sabit farklı kireç katkıları ile katkısız S zeminin IBI deney sonuçları.

Kireç katkısı arttıkça ilk 5 mm penetrasyondaki yük artış hızlarında, 10 mm ve 5 mm arasındaki artışa göre önemli farklılıklar oluşmuştur. S zeminde 5 mm penetrasyondaki yük, 2 mm'dekine göre % 47.60 oranında artarken % 5 kireç katkılı S30FA5L kodlu karışımda aynı durum için artış oranı S zemine göre daha az olup % 41.74 olarak gerçekleşmiştir. S30FA3L ve S30FA7L kodlu karışımlarda ise aynı durumda S30FA5L karışımının aksine artış S zeminden daha az olup sırasıyla % 60.23 ve % 58.29 olarak gerçekleşmiştir. Burada artış % 41.74 ile % 60.23 aralığında gerçekleşmiş olup, uçucu kül içermeyen kireç katkılı ve kireç içermeyen uçucu kül katkılı karışımlara göre daha geniş bir aralıkta değişmiştir.

Penetrasyonun 5 mm'den sonraki kısmında ise artış miktarı S zemin için % 32.25 iken, S30FA3L kodlu karışımda % 35.58 olup kireç içeriği arttıkça sırasıyla S30FA5L kodlu

karışımda % 34.69 ve S30FA7L kodlu karışımda % 33.62'ye düşmüştür. 10 mm penetrasyondaki yük ile 5 mm penetrasyondaki yük arasındaki artış dar bir aralıkta (% 32.25 ve % 35.58 arası) kalmıştır.

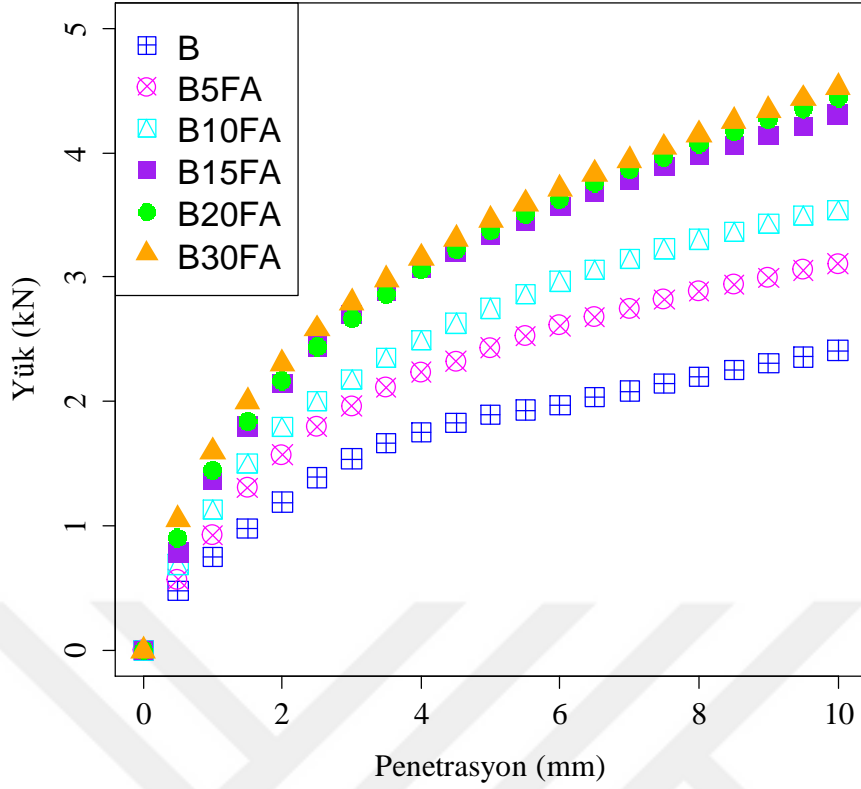
#### 4.6.2 Yüksek Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar

Bu bölümde yüksek plastisiteli killi zemin (B) ve karışımlarına ait grafikler mevcuttur. Ayrıca Çizelge 4.10'da zemin ve bazı seçili karışımlarına ait ani taşıma indeksi (IBI) sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre IBI değerlerinin B zeminde % 9.41-11.71, B30FA karışımında % 18.94-19.90, B5L karışımında % 25.40-26.67 ve B30FA5L karışımında % 27.65-30.03 aralığında olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.10** B zemin ve bazı karışımlarına ait IBI deney sonuçları.

Numune	B	B30FA	B5L	B30FA5L
1	% 11.71	% 19.45	% 25.72	% 27.65
2	% 10.35	% 19.90	% 26.67	% 29.64
3	% 9.41	% 18.94	% 25.40	% 30.03
Ort.	% 10.49	% 19.50	% 26.00	% 29.11

Deney sonuçları ayrıca Şekil 4.24, 4.25 ve 4.26'da detaylandırılmıştır. Şekil 4.24'de uçucu kül katkılı karışımların, 4.25'de kireç katkılı karışımların ve 4.26'da ise hem % 30 uçucu kül ile değişik oranlarda (%3, % 5 ve % 7) kireç içeren katkılı karışımların ani taşıma indeksi deney sonuçları mevcuttur. Buna göre Şekil 4.24'de penetrasyon-yük grafiği verilen uçucu kül katkılı ve katkısız B zemine ait ani taşıma indeksi deney sonuçları incelendiğinde, karışımdaki uçucu kül katkısı arttıkça, IBI değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır. Buna göre B zeminin IBI değeri %  $10.49 \pm 0.94$  olarak tespit edilmiştir. B30FA kodlu karışım, kireç içermeyen uçucu kül katkılı karışımlar arasında en yüksek IBI değerine sahiptir. İlgili karışımın IBI değeri %  $19.50 \pm 0.39$  olarak bulunmuştur.

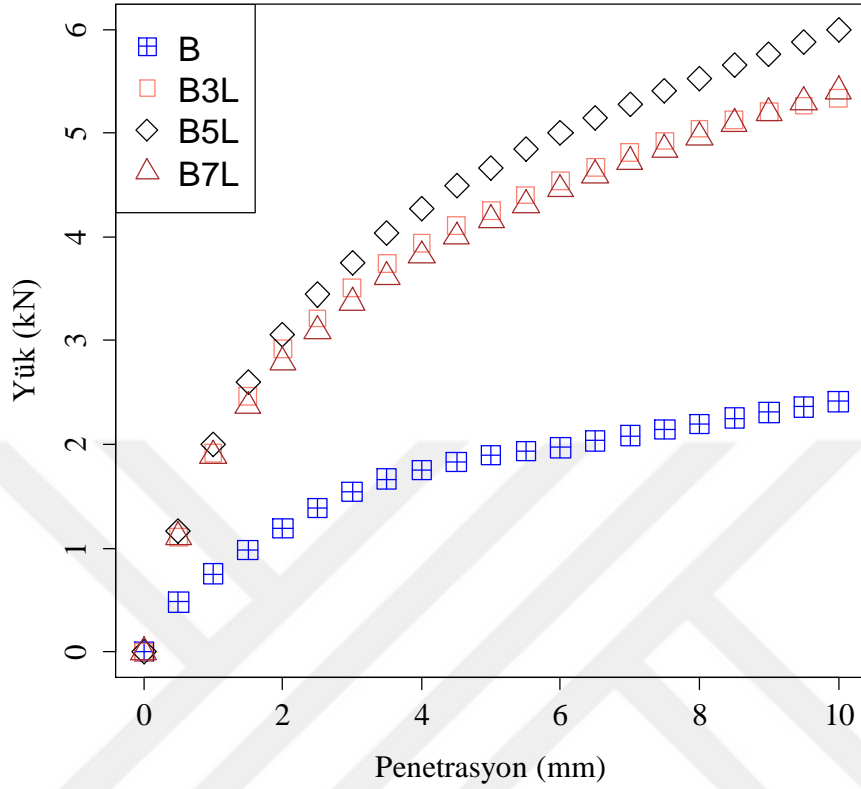


Şekil 4.24 Uçucu kül katkılı ve katkısız B zeminin IBI deney sonuçları.

B15FA, B20FA ve B30FA kodlu karışımların penetrasyon-yük grafikleri, penetrasyonun ilk 4 mm'sinde birbirine oldukça yakın iken daha sonra artan penetrasyon ile aralarında fark oluşmuştur. S zeminde penetrasyon 4 mm olduktan sonra, yük artış hızında azalma meydana gelmiştir. Uçucu kül katkısı arttıkça ilk 5 mm penetrasyondaki yük artış hızlarında, 10 mm ve 5 mm arasındaki artışa göre önemli farklılıklar oluşmuştur. B zeminde 5 mm penetrasyondaki yük, 2 mm'dekine göre % 58.62 oranında artarken % 15 uçucu kül katkılı B30FA kodlu karışımda aynı durum için artış oranı % 49.90 olarak gerçekleşmiştir. Böylece yük artışı % 49.90 ile % 58.62 arasında olmuştur. Penetrasyonun 5 mm'den sonraki kısmında ise artış hızı ise Şekil 4.24'deki tüm karışımlar için yaklaşık olarak aynı kalmıştır. B zemin için 10 mm penetrasyondaki yük değeri, 5 mm penetrasyondaki yükten % 27.46 fazladır. En yüksek artışın B20FA kodlu karışımda artış oranı % 31.92 olarak bulunmuştur. 10 mm penetrasyondaki yük ile 5 mm penetrasyondaki yük arasındaki artış dar bir aralıkta (% 27.46 ve % 31.92 arası) kalmıştır.

Şekil 4.25'de penetrasyon-yük grafiği verilen kireç katkılı ve katkısız B zemine ait ani taşıma indeksi deney sonuçları incelendiğinde, karışımdaki kireç katkısı arttıkça, IBI değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır. B5L kodlu karışım, uçucu kül içermeyen kireç katkılı karışımlar

arasında en yüksek IBI değerine sahiptir. İlgili karışımın IBI değeri  $\% 26.00 \pm 0.54$  olarak bulunmuştur.

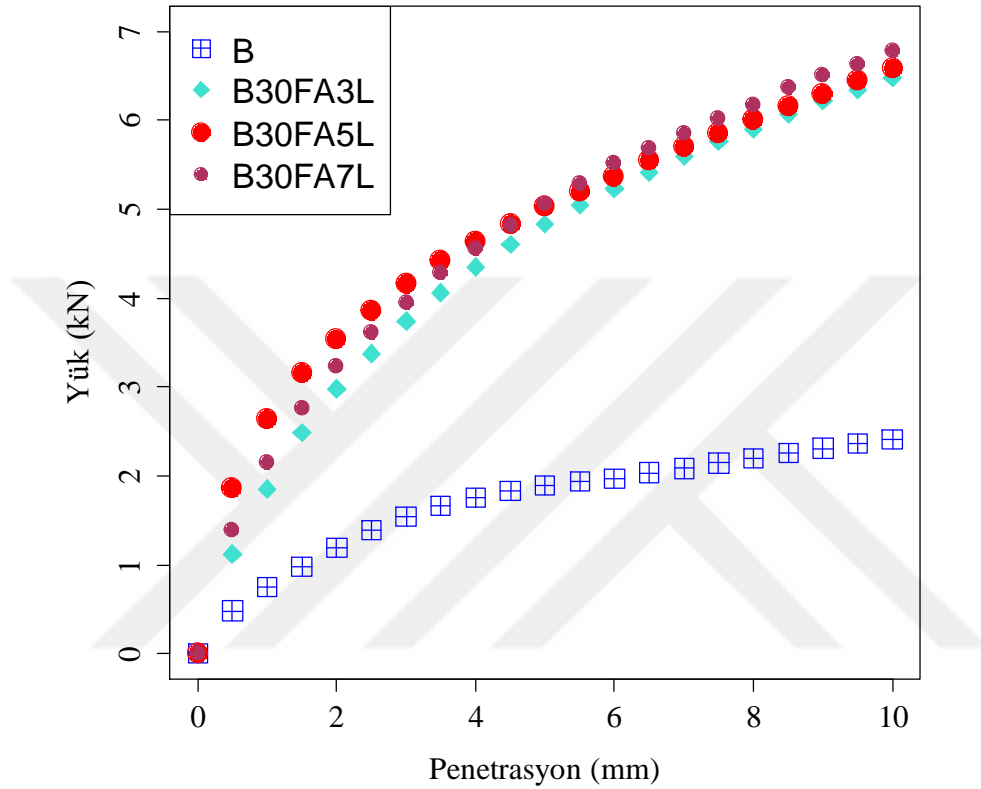


Şekil 4.25 Kireç katkılı ve katkısız B zeminin IBI deney sonuçları.

Kireç katkısı arttıkça ilk 5 mm penetrasyondaki yük artış hızlarında, 10 mm ve 5 mm arasındaki artışa göre önemli farklılıklar oluşmuştur. B zeminde 5 mm penetrasyondaki yük, 2 mm'dekine göre  $\% 58.62$  oranında artarken  $\% 3$  kireç katkılı B3L kodlu karışımda aynı durum için artış oranı B zemine göre daha az olup  $\% 45.31$  olarak gerçekleşmiştir. B5L ve B7L kodlu karışımlarda da S3L karışımının gibi artış miktarı S zeminden daha az olup sırasıyla  $\% 52.49$  ve  $\% 49.18$  olarak gerçekleşmiştir. Burada artış hızı  $\% 45.31$  ile  $\% 58.62$  aralığında gerçekleşmiştir.

Penetrasyonun 5 mm'den sonraki kısmında ise artış miktarı ise karışımlar ve B zemin için birbirlerine yakın değerlerdedir. B zeminde 10 mm penetrasyondaki yük, 5 mm penetrasyondaki yükten  $\% 27.46$  daha fazladır. B5L ve B7L kodlu karışımda sırasıyla  $\% 28.48$   $\% 29.85$  olup B ile neredeyse aynı olmuştur. B3L karışımında ise artış oranı  $\% 25.45$  olarak gerçekleşmiştir. 10 mm penetrasyondaki yük ile 5 mm penetrasyondaki yük arasındaki artış dar bir aralıkta ( $\% 25.45$  ve  $\% 29.85$  arası) kalmıştır.

Şekil 4.26'da penetrasyon-yük grafiği verilen % 30 uçucu kül ve kireç katkısı içeren ve katkısız B zemine ait ani taşıma indeksi deney sonuçları incelendiğinde, karışımdaki kireç katkısı arttıkça, IBI değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır. B30FA5L kodlu karışım, % 30 uçucu kül + kireç içeren katkılı karışımlar arasında en yüksek IBI değerine sahiptir. İlgili karışımın IBI değeri  $29.11 \pm 1.04$  olarak bulunmuştur.



**Şekil 4.26** % 30 Uçucu kül katkısı sabit farklı kireç katkıları ile katkısız B zeminin IBI deney sonuçları.

Kireç katkısı arttıkça ilk 5 mm penetrasyondaki yük artış hızlarında, 10 mm ve 5 mm arasındaki artışa göre önemli farklılıklar oluşmuştur. B zeminde 5 mm penetrasyondaki yük, 2 mm'dekine göre % 58.62 oranında artarken % 5 kireç katkılı B30FA5L kodlu karışımda aynı durum için artış oranı % 42.24 olup B zeminden daha azdır. B30FA3L ve B30FA7L kodlu karışımlarda ise aynı durumda B30FA3L karışımının aksine yükteki artış B zeminden daha fazla olup sırasıyla % 62.15 ve % 56.60 olarak gerçekleşmiştir. Burada artış % 42.24 ile % 62.15 aralığında gerçekleşmiş olup, uçucu kül içermeyen kireç katkılı ve kireç içermeyen uçucu kül katkılı karışımlara göre daha geniş bir aralıkta değişmiştir.

Penetrasyonun 5 mm'den sonraki kısmında ise karışımlarda görülen artış miktarları B zemine göre biraz daha fazla olmuştur. B zeminde 10 mm penetrasyondaki yük, 5 mm penetrasyondaki

yükten % 27.46 daha fazladır. B30FA3L kodlu karışımda % 34.07 olup kireç içeriği arttıkça sırasıyla B30FA5L kodlu karışımda % 30.91 ve B30FA7L kodlu karışımda % 34.01 olarak gerçekleşmiştir. 10 mm penetrasyondaki yük ile 5 mm penetrasyondaki yük arasındaki artış dar bir aralıkta (% 27.46 ve % 34.07 arası) kalmıştır.

#### 4.7 KALİFORNİYA TAŞIMA ORANI DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait CBR deney sonuçları değerlendirilmiştir. Deney sonuçları, kireç içermeyen uçucu kül katkılı, uçucu kül içermeyen kireç katkılı ve hem kireç hem de uçucu kül katkılı karışımların değerlendirilmesini içeren grafikler ile yorumlanmıştır. Her numune için deney 3'er kez tekrar edilmiştir. Burada x eksenlerindeki verilerin sayısal olarak aynı olması değerlendirmeyi kolaylaştırmıştır. Herhangi bir karışım için sunulan sonuçlar ise 3 numunenin ortalaması olarak hesap edilmiştir.

##### 4.7.1 Düşük Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar

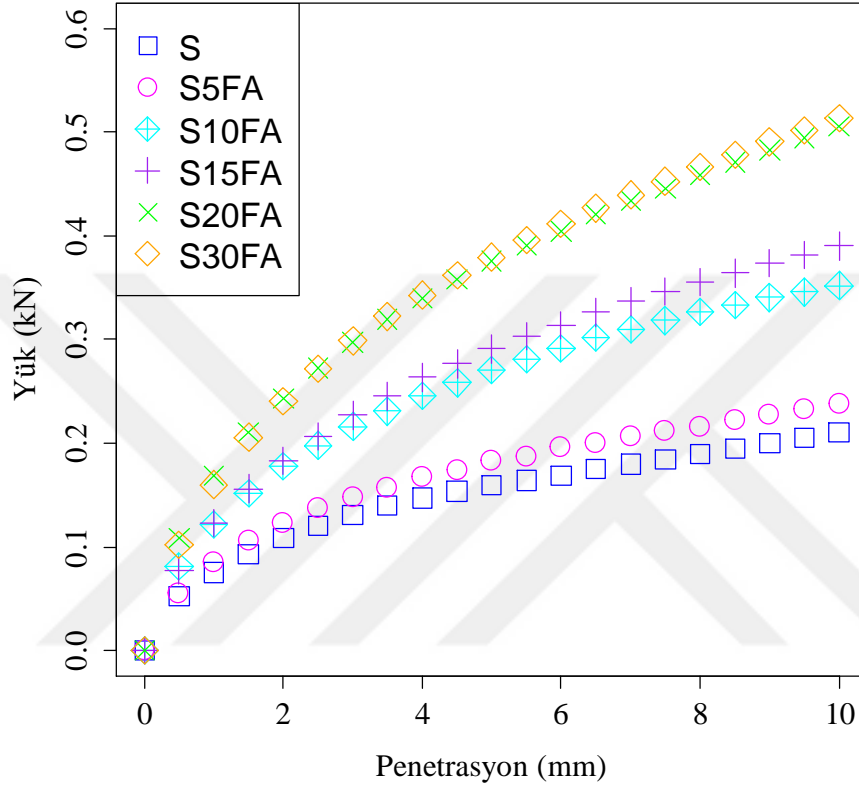
Bu bölümde düşük plastisiteli killi zemin (S) ve karışımlarına ait grafikler mevcuttur. Çizelge 4.11'de zemin ve bazı seçili karışımlarına ait Kaliforniya taşıma oranı (CBR) sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre CBR değerlerinin S zeminde % 0.81-1.00, S30FA karışımında % 1.95-2.21, S5L karışımında % 14.96-16.40 ve S30FA5L karışımında % 33.16-35.90 aralığında olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.11** S zemin ve bazı karışımlarına ait CBR deney sonuçları.

Numune	S	S30FA	S5L	S30FA5L
1	% 0.91	% 1.95	% 15.92	% 33.14
2	% 0.81	% 2.00	% 16.40	% 35.90
3	% 1.00	% 2.21	% 14.96	% 34.86
Ort.	% 0.91	% 2.05	% 15.76	% 34.63

Deney sonuçları ayrıca Şekil 4.27, 4.28 ve 4.29'te detaylandırılmıştır. Şekil 4.27'de uçucu kül katkılı karışımların, 4.28'de kireç katkılı karışımların ve 4.29'da ise hem % 30 uçucu kül ile değişik oranlarda (%3, % 5 ve % 7) kireç içeren katkılı karışımların CBR deney sonuçları mevcuttur. Buna göre Şekil 4.27'de penetrasyon-yük grafiği verilen uçucu kül katkılı ve katkısız S zemine ait CBR deney sonuçları incelendiğinde, karışımdaki uçucu kül katkısı arttıkça, CBR

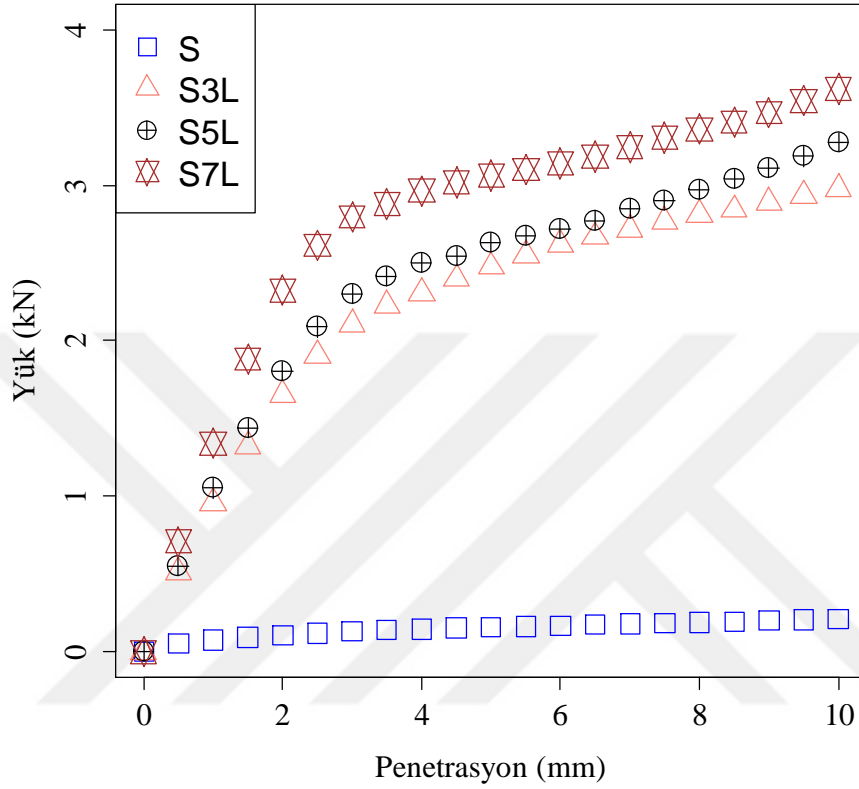
değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır. Buna göre S zeminin CBR değeri %  $0.91 \pm 0.08$  olarak tespit edilmiştir. S20FA kodlu karışım, kireç içermeyen uçucu kül katkıli karışımlar arasında en yüksek CBR değerine sahiptir. İlgili karışımın CBR değeri %  $2.06 \pm 0.13$  olarak bulunmuştur. Uçucu kül katkısının % 30 olması CBR değerini yaklaşık olarak sabit tutmuş olup ilgili karışımın CBR değeri %  $2.05 \pm 0.11$  olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.27 Uçucu kül katkıli ve katkısiz S zeminin CBR deney sonuçları.

S20FA ve S30FA kodlu karışımların penetrasyon-yük grafikleri, birbirine oldukça yakındır. S zeminde penetrasyon 4 mm olduktan sonra, yük artış hızında azalma meydana gelmiştir. Uçucu kül katkısı arttıkça ilk 5 mm penetrasyondaki yük artış hızlarında, 10 mm ve 5 mm arasındaki artışa göre önemli farklılıklar oluşmuştur. S zeminde 5 mm penetrasyondaki yük, 2 mm'dekine göre % 47.03 oranında artarken % 15 uçucu kül katkıli S15FA kodlu karışımda aynı durum için artış oranı % 59.17 olarak gerçekleşmiştir. Böylece yük artışı % 47.03 ile % 59.17 arasında olmuştur. S zeminde 10 mm penetrasyondaki yük değeri, 5 mm penetrasyondaki yükten % 32.08 daha fazladır. İlgili durum için en yüksek artış S30FA karışımında % 35.34 olarak gerçekleşmiştir. Penetrasyonun 5 mm'den sonraki kısmında ise artış hızı Şekil 4.27'deki tüm karışımlar için yaklaşık olarak aynı kalmış ve 10 mm penetrasyondaki yük ile 5 mm penetrasyondaki yük arasındaki artış dar bir aralıkta (% 30.00 ve % 35.34 arası) kalmıştır.

Şekil 4.28'de penetrasyon-yük grafiği verilen kireç katkılı ve katkısız S zemine CBR deney sonuçları incelendiğinde, karışımdaki kireç katkısı arttıkça, CBR değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır. S7L kodlu karışım, uçucu kül içermeyen kireç katkılı karışımlar arasında en yüksek CBR değerine sahiptir. İlgili karışımın CBR değeri  $19.73 \pm 0.22$  olarak bulunmuştur.

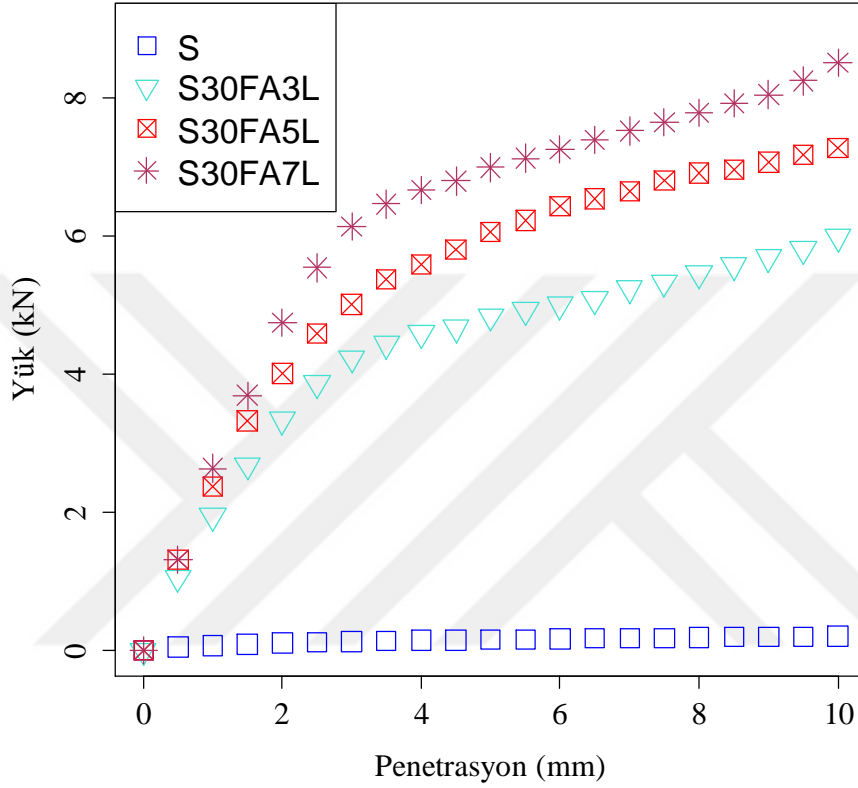


Şekil 4.28 Kireç katkılı ve katkısız S zeminin CBR deney sonuçları.

Kireç katkısı arttıkça ilk 5 mm penetrasyondaki yük artış hızlarında, 10 mm ve 5 mm arasındaki artışa göre önemli farklılıklar oluşmuştur. S zeminde 5 mm penetrasyondaki yük, 2 mm'dekine göre % 47.03 oranında artarken % 3 kireç katkılı S3L kodlu karışımda aynı durum için artış oranı S zemine göre daha fazla olup % 49.77 olarak gerçekleşmiştir. S5L ve S7L kodlu karışımlarda ise aynı durumda S3L karışımının aksine artış S zeminden daha az olup sırasıyla % 45.57 ve % 31.80 olarak gerçekleşmiştir. Burada artış hızı % 31.80 ile % 47.03 aralığında gerçekleşmiş olup kireç içermeyen uçucu kül katkılı karışımlara göre daha geniş bir aralıktadır.

Penetrasyonun 5 mm'den sonraki kısmında ise artış miktarı S zeminde uçucu kül içermeyen karışımlara göre daha yüksektir. S zeminde artış % 32.18 iken, S3L kodlu karışımda artış S zemine göre % 20.31'e düşmüştür. S5L ve S7L kodlu karışımlarda da artış miktarı sırasıyla % 24.64 ve % 18.16 olarak bulunmuştur. Burada artış hızının % 18.16 ile % 32.18 arasında değiştiği gözlenmiştir.

Şekil 4.29'da penetrasyon-yük grafiği verilen % 30 uçucu kül ve kireç katkısı içeren ve katkısız S zemine ait CBR deney sonuçları incelendiğinde, karışımdaki kireç katkısı arttıkça, CBR değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır. S30FA7L kodlu karışım, % 30 uçucu kül + kireç içeren katkılı karışımlar arasında en yüksek CBR değerine sahiptir. İlgili karışımın CBR değeri %  $41.82 \pm 0.49$  olarak bulunmuştur.



**Şekil 4.29** % 30 Uçucu kül katkısı sabit farklı kireç katkıları ile katkısız S zeminin CBR deney sonuçları.

Kireç katkısı arttıkça ilk 5 mm penetrasyondaki yük artış hızlarında, 10 mm ve 5 mm arasındaki artışa göre önemli farklılıklar oluşmuştur. S zeminde 5 mm penetrasyondaki yük, 2 mm'dekine göre % 47.03 oranında artarken % 5 kireç katkılı S30FA5L kodlu karışımda aynı durum için artış oranı S zemine göre daha fazla olup % 51.06 olarak gerçekleşmiştir. S30FA3L karışımında artış ise S zemine göre daha az (% 45.12) olmuştur. Burada artış % 45.12 ile % 51.06 aralığında gerçekleşmiş olup, uçucu kül içermeyen kireç katkılı ve kireç içermeyen uçucu kül katkılı karışımlara göre daha dar bir aralıkta değişmiştir.

Penetrasyonun 5 mm'den sonraki kısmında ise artış miktarı S zemine göre daha az olmuştur. S zeminde artış % 32.18 iken, S30FA3L kodlu karışımda % 23.53 olup kireç içeriği arttıkça sırasıyla S30FA5L kodlu karışımda % 20.20 ve S30FA7L kodlu karışımda % 21.70'e kadar

düşmüştür. 10 mm penetrasyondaki yük ile 5 mm penetrasyondaki yük arasındaki artış dar bir aralıkta (% 20.20 ve % 32.18 arası) kalmıştır.

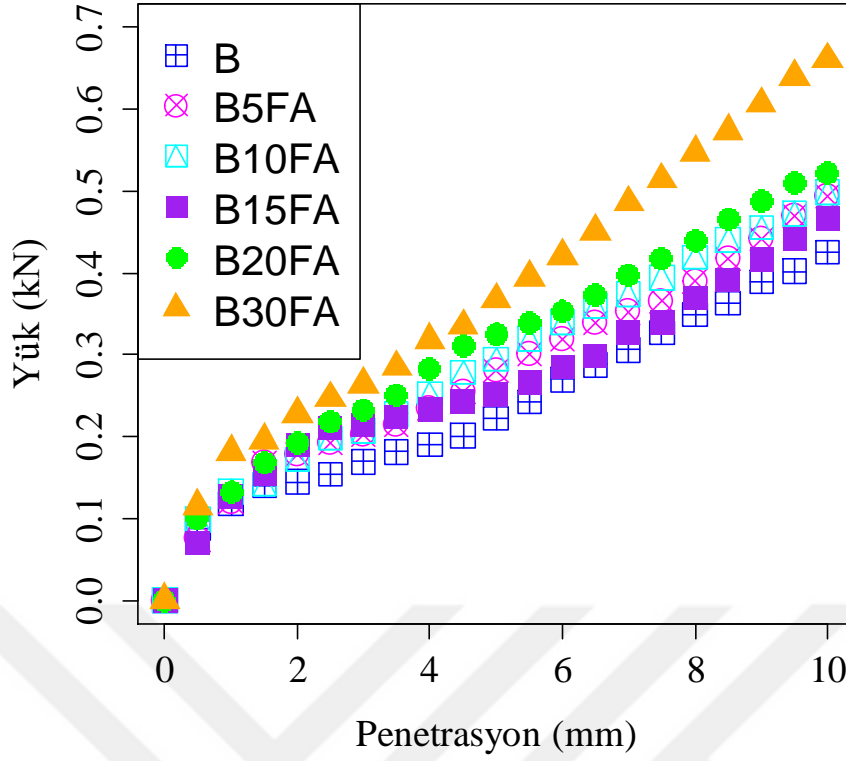
#### 4.7.2 Yüksek Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar

Bu bölümde yüksek plastisiteli killi zemin (B) ve karışımlarına ait grafikler mevcuttur. Çizelge 4.12'de zemin ve bazı seçili karışımlarına ait Kaliforniya taşıma oranı (CBR) sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre CBR değerlerinin B zeminde % 1.04-1.31, B30FA karışımında % 1.66-2.0, B5L karışımında % 52.01-57.36 ve B30FA5L karışımında % 71.79-76.28 aralığında olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.12** B zemin ve bazı karışımlarına ait CBR deney sonuçları.

Numune	B	B30FA	B5L	B30FA5L
1	1.14	1.86	52.01	76.28
2	1.31	2.07	57.36	79.73
3	1.04	1.66	52.90	71.79
Ort.	1.16	1.86	54.09	75.94

Deney sonuçları ayrıca Şekil 4.30, 4.31 ve 4.32'de detaylandırılmıştır. Şekil 4.30'da uçucu kül katkılı karışımların, 4.31'de kireç katkılı karışımların ve 4.32'de ise hem % 30 uçucu kül ile değişik oranlarda (%3, % 5 ve % 7) kireç içeren katkılı karışımların CBR deney sonuçları mevcuttur. Buna göre Şekil 4.30'da penetrasyon-yük grafiği verilen uçucu kül katkılı ve katkısız S zemine ait CBR deney sonuçları incelendiğinde, karışımdaki uçucu kül katkısı arttıkça, CBR değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır. Buna göre B zeminin CBR değeri %  $1.16 \pm 0.11$  olarak tespit edilmiştir. B30FA kodlu karışım, kireç içermeyen uçucu kül katkılı karışımlar arasında en yüksek CBR değerine sahiptir. İlgili karışımın CBR değeri %  $1.86 \pm 0.17$  olarak bulunmuştur.

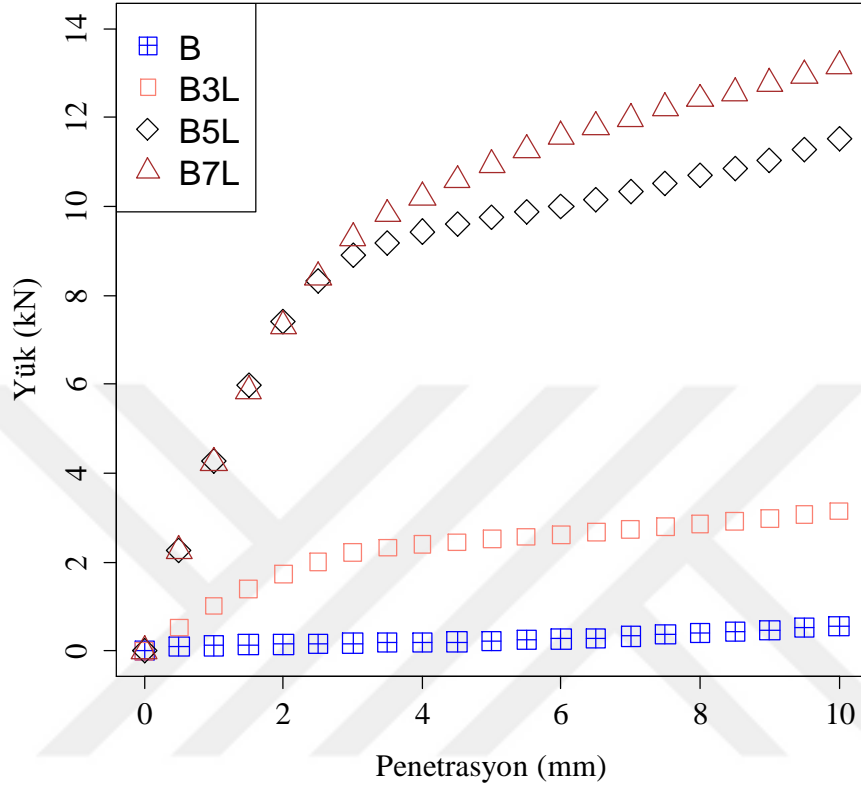


Şekil 4.30 Uçucu kül katkılı ve katkısız B zeminin CBR deney sonuçları.

B5FA ile B10FA karışımlarının penetrasyon yük grafikleri birbirine benzemektedir. Eğrinin eğimi incelendiğinde benzer rijitliğe sahip oldukları görülmektedir. B30FA kodlu karışımın rijitliği ise diğer tüm karışımlara göre daha belirgindir. Bu da ilgili karışımın CBR değerinin daha yüksek olmasına yol açmıştır. Uçucu kül katkısı arttıkça ilk 5 mm penetrasyondaki yük artış hızlarında, 10 mm ve 5 mm arasındaki artışa göre önemli farklılıklar oluşmuştur. B zeminde 5 mm penetrasyondaki yük, 2 mm'dekine göre % 53.68 oranında artarken % 10 uçucu kül katkılı B10FA kodlu karışımında aynı durum için artış oranı % 70.80 olarak gerçekleşmiştir. Yük artışının en az olduğu karışım ise B15FA karışımı olup ilgili karışımında aynı durum için artış % 32.00 seviyesinde kalmıştır. Böylece yük artışı % 32.00 ile % 70.80 arasında olmuştur. B zeminde 10 mm penetrasyondaki yük değeri, 5 mm penetrasyondaki yükten % 91.22 daha fazladır. İlgili durum için en düşük artış B20FA karışımında % 60.78 olarak gerçekleşmiştir. Penetrasyonun 5 mm'den sonraki kısmında ise artış hızı Şekil 4.30'daki katkısız zemin harici tüm karışımlar için yaklaşık olarak aynı kalmış ve 10 mm penetrasyondaki yük ile 5 mm penetrasyondaki yük arasındaki artış daha dar bir aralıkta (% 60.78 ve % 91.22 arası) olmuştur.

Şekil 4.31'de penetrasyon-yük grafiği verilen kireç katkılı ve katkısız B zemine CBR deney sonuçları incelendiğinde, karışımdaki kireç katkısı arttıkça, CBR değerlerinin arttığı

anlaşılmaktadır. B5L karışımının CBR değeri  $\% 54.04 \pm 2.34$  olarak tespit edilmiştir. Katkı oranının  $\% 5$ 'ten  $\% 7$ 'ye yükselmesi CBR değerini çok az bir miktar yükseltse de neredeyse sabit tutmuştur. İlgili karışımın CBR değeri  $\% 54.68 \pm 2.07$  olarak bulunmuştur.

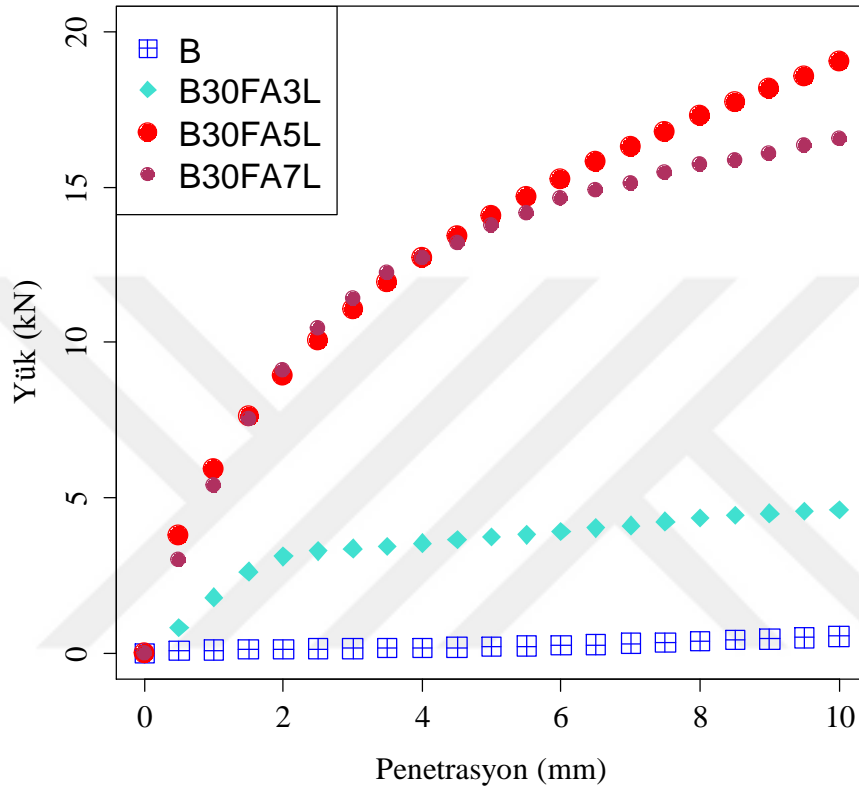


Şekil 4.31 Kireç katkılı ve katkısız B zeminin CBR deney sonuçları.

Kireç katkısı arttıkça ilk 5 mm penetrasyondaki yük artış hızlarında, 10 mm ve 5 mm arasındaki artışa göre önemli farklılıklar oluşmuştur. B zeminde 5 mm penetrasyondaki yük, 2 mm'dekine göre  $\% 53.68$  oranında artarken  $\% 3$  kireç katkılı B3L kodlu karışımda aynı durum için artış oranı B zemine göre daha az olup  $\% 45.57$  olarak gerçekleşmiştir. B5L karışımında artış oranı en az seviyesine gelerek  $\% 31.80$  olmuştur. B7L kodlu karışımda ise artış oranı tekrar yükselerek  $\% 49.77$  seviyesine gelmiştir. Burada artış hızı  $\% 31.80$  ile  $\% 53.68$  aralığında gerçekleşmiş olup kireç içermeyen uçucu kül katkılı karışımlara göre daha dar bir aralıktır.

Penetrasyonun 5 mm'den sonraki kısmında ise artış miktarı B zeminde uçucu kül içermeyen kireç katkılı karışımlara göre daha yüksektir. B zeminde artış  $\% 91.22$  iken, B3L kodlu karışımda artış hızı B zemine göre oldukça azalarak  $\% 24.64$ 'e düşmüştür. B5L ve B7L kodlu karışımlarda da artış miktarı sırasıyla  $\% 18.86$  ve  $\% 20.94$  olarak bulunmuştur. Burada artış hızının  $\% 18.86$  ile  $\% 91.22$  arasında değiştiği gözlenmiştir.

Şekil 4.32'de penetrasyon-yük grafiği verilen % 30 uçucu kül ve kireç katkısı içeren ve katkısız B zemine ait CBR deney sonuçları incelendiğinde, karışımdaki kireç katkısı arttıkça, CBR değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır. B30FA7L kodlu karışım, % 30 uçucu kül + kireç içeren katkılı karışımlar arasında en yüksek CBR değerine sahiptir. İlgili karışımın CBR değeri %  $78.81 \pm 2.35$  olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 4.32** % 30 Uçucu kül katkısı sabit farklı kireç katkıları ile katkısız B zeminin CBR deney sonuçları.

Kireç katkısı arttıkça ilk 5 mm penetrasyondaki yük artış hızlarında, 10 mm ve 5 mm arasındaki artışa göre önemli farklılıklar oluşmuştur. B zeminde 5 mm penetrasyondaki yük, 2 mm'dekine göre % 53.68 oranında artarken, B30FA3L kodlu karışımda artış sadece % 19.67 seviyesinde kalmıştır. % 5 kireç katkılı B30FA5L kodlu karışımda aynı durum için artış oranı B zemine göre daha fazla olup % 57.59 olarak gerçekleşmiştir. B30FA7L karışımında artış ise B zemine göre daha az (% 51.38) olmuştur. Burada artış % 51.38 ile % 57.59 aralığında gerçekleşmiş olup, uçucu kül içermeyen kireç katkılı ve kireç içermeyen uçucu kül katkılı karışımlara göre daha dar bir aralıkta değişmiştir.

Penetrasyonun 5 mm'den sonraki kısmında ise artış miktarı B zemine göre daha az olmuştur. B zeminde artış % 91.22 iken, B30FA3L kodlu karışımda % 23.71 olmuştur. Katkı oranının

% 5'e çıkması sonucunda aynı artış oranı B zemine göre az ama B30FA3L kodlu karışıma göre artarak % 35.34 olmuştur. B30FA7L kodlu karışımda % 20.48'e kadar düşmüştür. 10 mm penetrasyondaki yük ile 5 mm penetrasyondaki yük arasındaki artış dar bir aralıkta (% 20.48 ve % 32.18 arası) kalmıştır.

#### 4.8 LİNEER ŞİŞME DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde hem düşük plastisiteli hem de yüksek plastisiteli kil karışımlarına (hem katkısız hem de katkılı) ait lineer şişme deney sonuçları irdelenmiştir. Her numune için deney 3'er kez tekrar edilmiştir. Burada x eksenlerindeki verilerin sayısal olarak aynı olması değerlendirmeyi kolaylaştırmıştır. Herhangi bir karışım için sunulan sonuçlar ise 3 numunenin ortalaması olarak hesap edilmiştir.

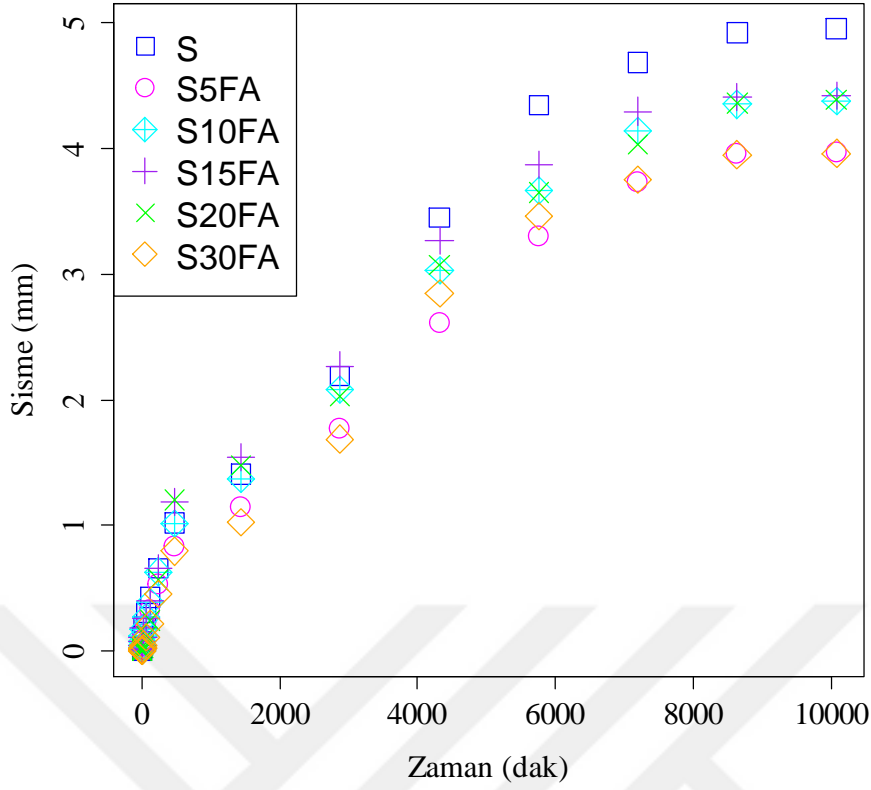
##### 4.8.1 Düşük Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar

Bu bölümde uçucu kül katkılı ve katkısız S zemine ait lineer şişme deney sonuçları değerlendirilmiştir. Çizelge 4.13'de zemin ve bazı seçili karışımlarına ait lineer şişme değerleri mm biriminde verilmiştir. Bu sonuçlara göre lineer şişme değerlerinin S zeminde 4.729 -5.186 mm, S30FA karışımında 3.809-4.103 mm, S5L karışımında 0.176-0.189 mmve S30FA5L karışımında 0.101-0.113 mm aralığında olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.13** S zemin ve bazı karışımlarına ait lineer şişme deney sonuçları.

Numune	S	S30FA	S5L	S30FA5L
1	5.186 mm	4.103 mm	0.189 mm	0.113 mm
2	4.729 mm	3.973 mm	0.176 mm	0.105 mm
3	4.949 mm	3.809 mm	0.184 mm	0.101 mm
Ort.	4.955 mm	3.968 mm	0.183 mm	0.106 mm

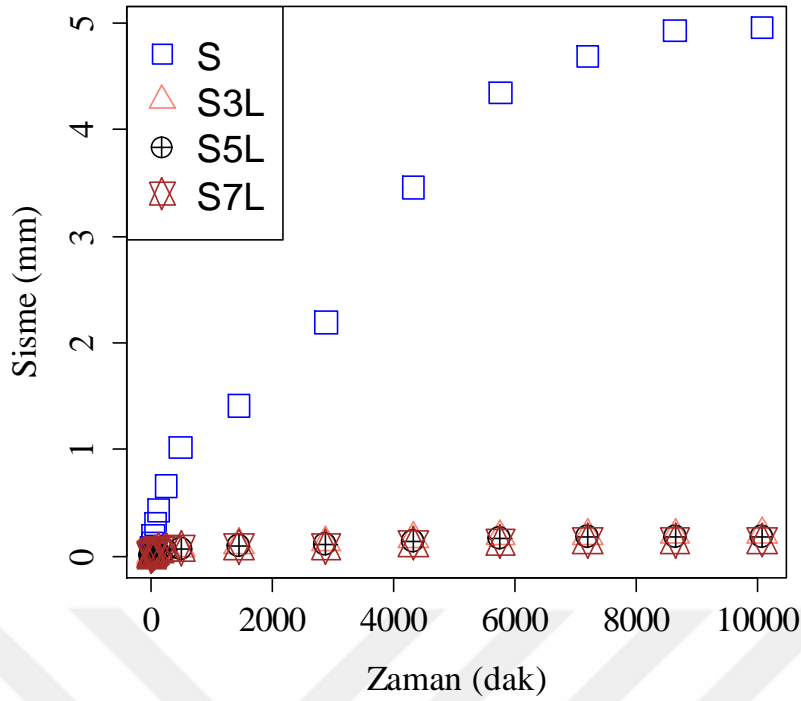
Deney sonuçları ayrıca Şekil 4.33, 4.34 ve 4.35'de detaylandırılmıştır. Şekil 4.33'de uçucu kül katkılı karışımların zamana bağlı şişme değerlerinin değişimi görülmektedir. Uçucu kül katkılı ve katkısız S zemine ait lineer şişme deney sonuçları incelendiğinde uçucu kül katkı oranının artması ile şişme değerlerinde bir azalma olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.33** Uçucu kül katkılı ve katkısız S zemine ait lineer şişme deney sonucu.

Yapılan deneyler neticesinde katkısız S zemine ait ortalama numune şişmesi  $4.96 \pm 0.34$  mm olarak hesaplanmıştır. En düşük şişme S5FA ve S30FA kodlu karışımlarda sırasıyla  $3.97 \pm 0.36$  ve  $3.96 \pm 0.12$  mm olmuştur. Tüm karışımlar için 6 günlük şişme sürecinden sonra şişme yaklaşık olarak sabit ilerlemiştir. 7. gün sonunda da deney sonuçlandırılmıştır.

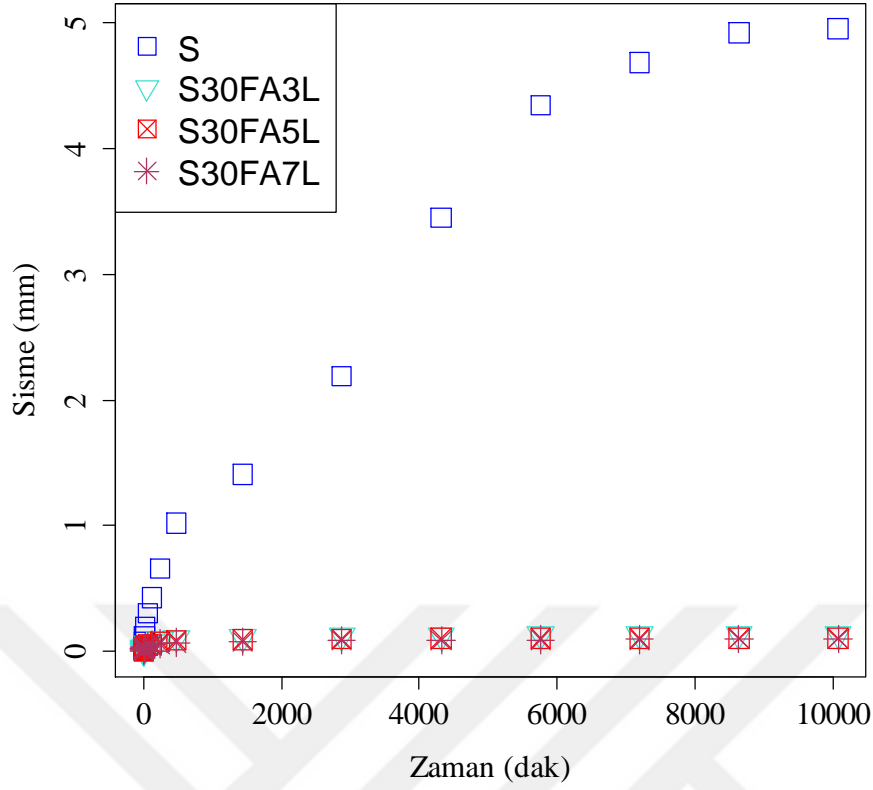
Uçucu kül içermeyen kireç katkılı S zemine ait lineer şişme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.34 incelendiğinde kireç oranının artması ile şişme değerlerinde önemli bir azalma olduğu görülmektedir. Kireç içeren karışımlarda şişme değerlerinin 500 dakikadan sonra yaklaşık olarak sabit kaldığı, S zeminde ise şişme değerlerinin yükselişinin ivmesi azalarak da olsa devam ettiği anlaşılmaktadır.



**Şekil 4.34** Kireç katkılı ve katkısız S zemine ait lineer şişme deney sonucu.

En düşük şişme S7L kodlu karışımlarda sırasıyla  $0.15 \pm 0.03$  mm olmuştur. En büyük şişme ise S3L kodlu karışımda  $0.20 \pm 0.02$  mm olmuştur. Zemine eklenen % 3 kireç, zeminin şişmesini önemli oranda düşürmüştür. % 3'ten daha fazla eklenen kireç ise şişmeyi fazla değiştirmemiştir.

Hem uçucu kül hem de kireç katkılı S zemine ait lineer şişme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.35 incelendiğinde kireç oranının artması ile şişme değerlerinde çok ciddi bir azalma olduğu görülmektedir. Kireç içeren karışımlarda şişme değerlerinin 500 dakikadan sonra yaklaşık olarak sabit kaldığı, S zeminde ise şişme değerlerinin yükselişinin ivmesi azalarak da olsa devam ettiği anlaşılmaktadır. En düşük şişme S30FA7L kodlu karışımlarda sırasıyla  $0.10 \pm 0.005$  mm olmuştur. En büyük şişme ise S30FA3L kodlu karışımda  $0.14 \pm 0.009$  mm olmuştur.



**Şekil 4.35** % 30 Uçucu kül katkısı sabit farklı kireç katkıları ile katkısız S zeminine ait lineer şişme deney sonucu.

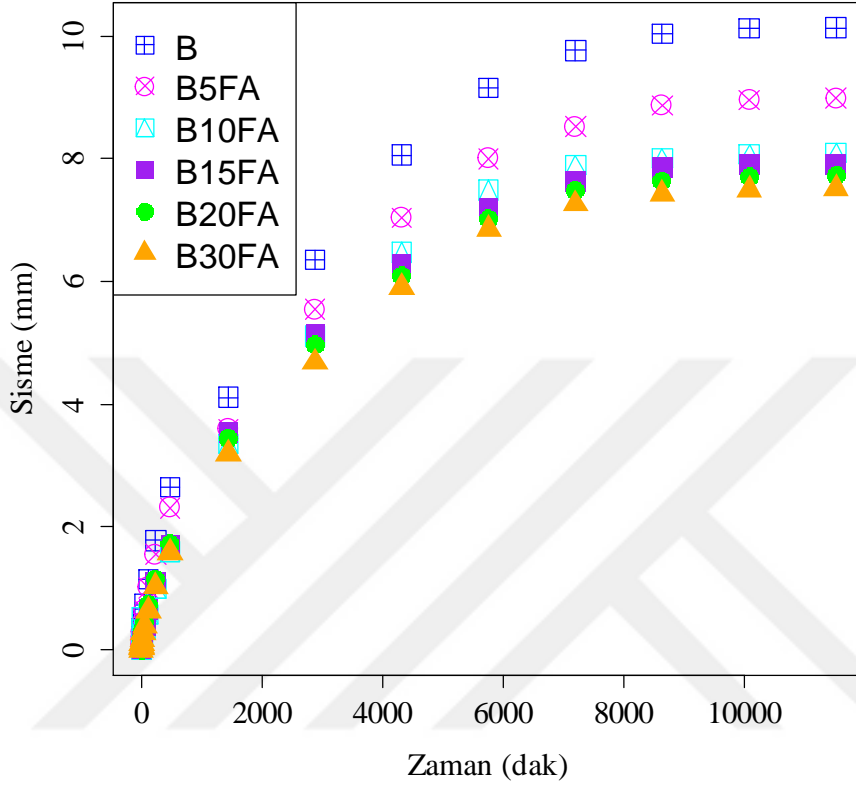
#### 4.8.2 Yüksek Plastisiteli Killi Zemin ve Karışımlarına Ait Sonuçlar

Bu bölümde uçucu kül katkılı ve katkısız B zemine ait lineer şişme deney sonuçları değerlendirilmiştir. Çizelge 4.14'de zemin ve bazı seçili karışımlarına ait lineer şişme değerleri mm biriminde verilmiştir. Bu sonuçlara göre lineer şişme değerlerinin B zeminde 9.673 -10.581 mm, B30FA karışımında 7.019-7.962 mm, B5L karışımında 0.162-0.213 mm ve B30FA5L karışımında 0.175-0.233 mm aralığında olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.14** B zemin ve bazı karışımlarına ait lineer şişme deney sonuçları.

Numune	B	B30FA	B5L	BS30FA5L
1	10.581 mm	7.554 mm	0.185 mm	0.233 mm
2	9.673 mm	7.019 mm	0.162 mm	0.175 mm
3	10.173 mm	7.962 mm	0.213 mm	0.186 mm
Ort.	10.142 mm	7.512 mm	0.187 mm	0.198 mm

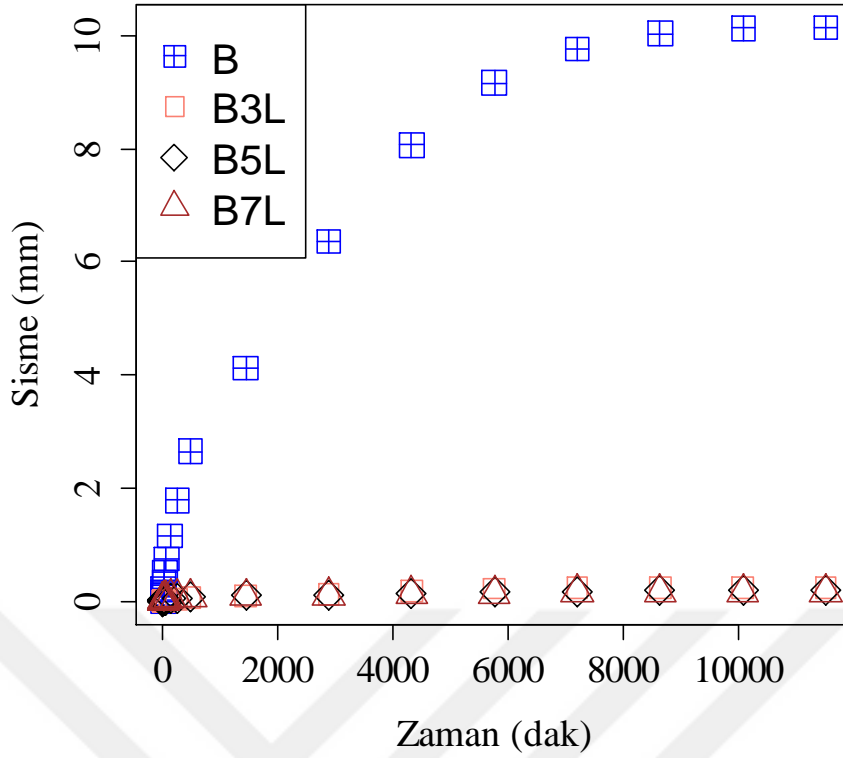
Deney sonuçları ayrıca Şekil 4.36, 4.37 ve 4.38'de detaylandırılmıştır. Şekil 4.36'da uçucu kül katkıli karışımların zamana bağlı şişme değerlerinin değişimi görülmektedir. Uçucu kül katkıli ve katkısız B zemine ait lineer şişme deney sonuçları incelendiğinde uçucu kül katkı oranının artması ile şişme değerlerinde bir azalma olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.36** Uçucu kül katkıli ve katkısız B zemine ait lineer şişme deney sonucu.

Yapılan deneyler neticesinde katkısız B zemine ait ortalama numune şişmesi  $10.14 \pm 0.39$  mm olarak hesaplanmıştır. En düşük şişme B30FA kodlu karışımda  $7.51 \pm 0.33$  mm olmuştur. Tüm karışımlar için 5 günlük şişme sürecinden sonra şişme yaklaşık olarak sabit ilerlemiştir. 7. gün sonunda da deney sonuçlandırılmıştır.

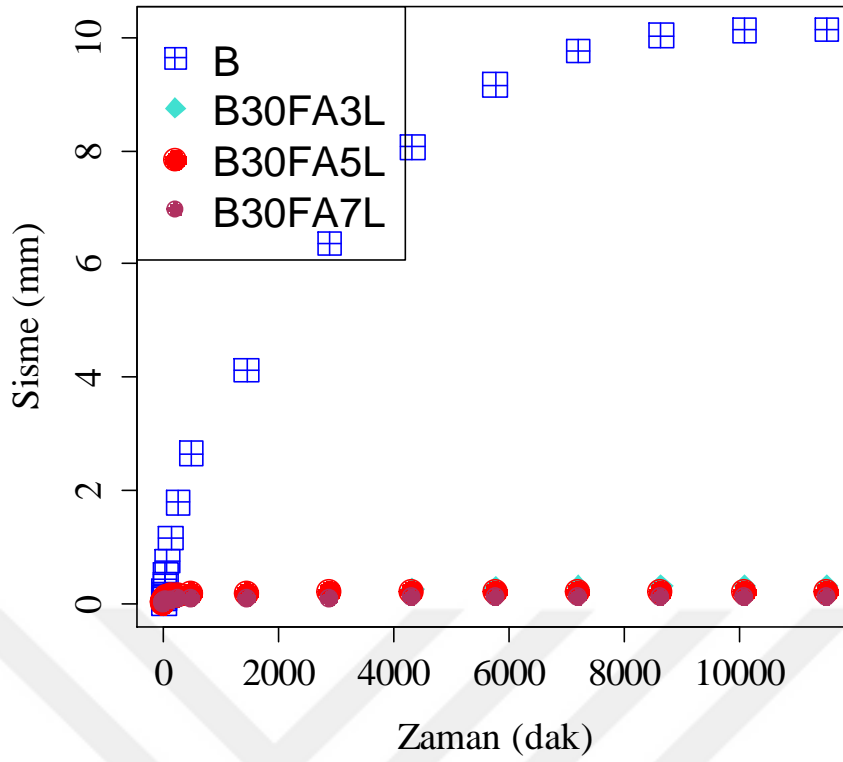
Uçucu kül içermeyen kireç katkıli B zemine ait lineer şişme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.37 incelendiğinde kireç oranının artması ile şişme değerlerinde önemli bir azalma olduğu görülmektedir. Tüm kireç içeren karışımlarda şişme değerlerinin 500 dakikadan sonra yaklaşık olarak sabit kaldığı, B zeminde ise şişme değerlerinin yükselişinin ivmesi azalarak da olsa devam ettiği anlaşılmaktadır. B zeminde 6 günden sonra şişme sabitlenmeye başlamıştır.



**Şekil 4.37** Kireç katkılı ve katkısız B zemine ait lineer şişme deney sonucu.

En büyük şişme B3L kodlu karışımda  $0.24 \pm 0.006$  mm olmuştur. Kireç içeriği arttıkça şişme miktarlarında azalma devam etmiştir. B5L kodlu karışımın şişmesi  $0.19 \pm 0.02$  mm olarak elde edilmiştir. En düşük şişme ise B7L kodlu karışımlarda sırasıyla  $0.15 \pm 0.02$  mm olmuştur.

Hem uçucu kül hem de kireç katkılı B zemine ait lineer şişme deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.38 incelendiğinde kireç oranının artması ile şişme değerlerinde çok ciddi bir azalma olduğu görülmektedir. Kireç içeren karışımlarda şişme değerlerinin 500 dakikadan sonra yaklaşık olarak sabit kaldığı, B zeminde ise şişme değerlerinin yükselişinin ivmesi azalarak da olsa devam ettiği anlaşılmaktadır.



**Şekil 4.38** % 30 Uçucu kül katkısı sabit farklı kireç katkıları ile katkısız B zeminine ait lineer şişme deney sonucu.

En büyük şişme B30FA3L kodlu karışımda  $0.31 \pm 0.03$  mm olarak bulunmuştur. Kireç içeriği arttıkça şişme değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Katkı oranının % 5'e çıktığı B30FA5L kodlu karışımda şişme  $0.20 \pm 0.02$  mm olarak elde edilmiştir. En düşük şişme ise B30FA7L kodlu karışımlarda sırasıyla  $0.10 \pm 0.01$  mm olmuştur.



## BÖLÜM 5

### BULGULARIN TARTIŞILMASI

#### 5.1 GİRİŞ

Bu bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan uçucu kül ve kireç katkılarının zeminlerin mühendislik özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Grafiklerde, kür sürelerini temsil etmesi açısından bazı kodlamalar yapılmıştır. Buna göre " $(SFA)_0$ " kodu, 0 gün kür süreli uçucu kül katkılı ve katkısız S zemin karışımlarını temsil etmektedir. Burada ilk "S" ifadesi zemin tipini, yanındaki "FA" ifadesi katkı tipini ve parantez dışındaki "0" ifadesi ise kür süresini belirtmektedir. Aynı şekilde " $(BL)_7$ " kodu, 7 gün kür süreli kireç katkılı ve katkısız B zeminini belirtmektedir. Hem uçucu kül hem de kireç içeren " $(S30FA\_L)_{28}$ " kodu ise 28 gün kür süreli % 30 uçucu kül ve çeşitli oranlarda kireç katkılı ve katkısız S zeminini ifade etmektedir.

#### 5.2 SERBEST BASINÇ DAYANIMI BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Deneylerde birbirinin aynısı (kür süresi ve katkı oranı) olan üçer adet numune hazırlanmıştır. Kür süresinin etkisinin de incelenmesi amacıyla 0, 7 ve 28 gün kür süreleri kullanılmıştır. Tüm değerlerin etkisi incelenirken, 0 gün kürü zeminlerin ortalama serbest basınç dayanımı referans alınmıştır.

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinden önce, yazıda belirtilen ifadelerin daha anlaşılabilir hale gelmesi açısından Çizelge 5.1'de detaylı açıklaması verilen bazı kodlamalar yapılmıştır.

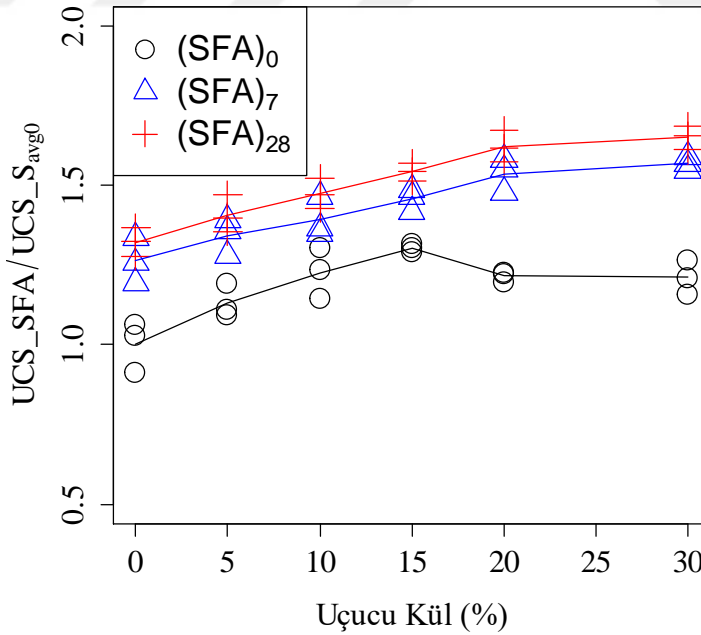
**Çizelge 5.1** UCS deney sonuçlarında kullanılan kodların açıklamaları.

UCS_S <sub>avg0</sub>	0 gün kür süreli S zeminin ortalama serbest basınç dayanımı (UCS)
UCS_B <sub>avg0</sub>	0 gün kür süreli B zeminin ortalama serbest basınç dayanımı (UCS)
UCS_SFA/UCS_S <sub>avg0</sub>	Uçucu kül katkılı ve katkısız S zemine ait tüm kür sürelerinde bulunan UCS değerinin, UCS_S <sub>avg0</sub> değerine oranı
UCS_SL/UCS_S <sub>avg0</sub>	Kireç katkılı ve katkısız S zemine ait tüm kür sürelerinde bulunan UCS değerinin, UCS_S <sub>avg0</sub> değerine oranı
UCS_B30FA_L/UCS_B <sub>avg0</sub>	% 30 Uçucu kül ile kireç katkılı ve katkısız B zemine ait tüm kür sürelerinde bulunan UCS değerinin, UCS_B <sub>avg0</sub> değerine oranı

Bundan sonraki alt bölümlerde bu kodlama mantığına göre değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir.

### 5.2.1 S Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması

Şekil 5.1'de uçucu kül katkısının (FA) düşük plastisiteli killi zeminin (S) serbest basınç dayanımına (UCS) etkisi gösterilmiştir.



**Şekil 5.1** Uçucu külün S zeminin serbest basınç dayanımına etkisi.

Sonuçlar incelendiğinde düşük plastisiteli kile eklenen uçucu kül katkısının kilin serbest basınç dayanımını artırdığı görülmektedir. Sıfır gün kür süresine göre değerlendirme yapıldığında en

yüksek dayanım artışı % 15 uçucu kül katkı oranında gerçekleşmiştir. Daha fazla eklenen uçucu kül, serbest basınç dayanımını fazla etkilememiş olup, % 20 ve % 30 uçucu kül katkısındaki serbest basınç dayanımı değeri UCS\_Savg0 değerinin sırasıyla 1.22 ve 1.21 katı olmuştur. 7 günlük kür süresi uçucu kül katkılı tüm karışımların dayanımını zeminin 1.34 ile 1.57 katına çıkarmıştır. 7 günlük kürde S30FA karışımının serbest basınç dayanımı UCS\_Savg0 değerinin 1.57 katı iken kür süresi 28 güne çıktığında bu oran 1.65 olmuştur. S zemin için kür süresinin artması ile serbest basınç dayanımı 7 gün kür süresinde 1.26 katına çıkarken, 28 gün kür süresinde ise 1.32 katına çıkmıştır. Burada S zemini ve uçucu kül katkılı karışımlarındaki dayanım artışının ilk 7 günde daha hızlı olduğu ve 7 günden sonra artış hızında azalmanın olduğu tespit edilmiştir.

Altun vd. (2009), zemine eklenen % 10, % 20 ve % 30 uçucu külün, zeminin serbest basınç değerini 7 gün kürde sırasıyla 3.00, 5.11 ve 5.17 katına çıkardığını bulmuşlardır. Aynı çalışmada kür süresinin 28 güne çıkması ile elde edilen dayanımlar ise aynı katkı oranları için katkısız zeminin sırasıyla 3.32, 7.97 ve 9.58 katına yükselmiştir. Modarres ve Nosoudy (2015) tarafından yapılan çalışmada zemine eklenen % 3 uçucu kül zeminin serbest basıncı dayanımını 7 gün kür süresinde 1.67 katına çıkarmıştır. Daha fazla eklenen uçucu kül de dayanımı artırırken % 6 ve % 9 katkıda sırasıyla 1.83 ve 1.94 katına çıkarmıştır. Kür süresinin 28 güne çıkması ile aynı katkı oranları için dayanım değerleri zeminin sırasıyla 1.83, 2.00 ve 2.11 katına çıkmış olup 7 günden sonra dayanım artış hızında belirgin bir azalma olmuştur.

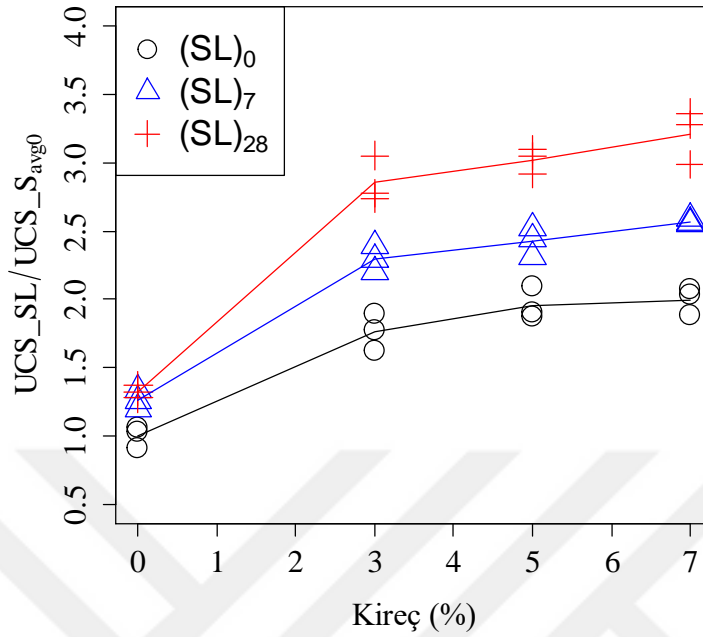
Bu duruma benzer sonuçlara literatürde de rastlanılmış olup Dayıoğlu vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada da 7 günlük kür süresinde % 30 uçucu kül içeren killi karışımın serbest basınç dayanımı, killi zeminin 0 günlük değerinin 1.54 katı iken 28 günde çok değişmeyerek 1.62 katına çıkmıştır. Aynı çalışmada % 10 ve % 20 katkılarında ise artan kür süresi ile serbest basınç dayanımı neredeyse hiç değişmemiş olup, hatta % 10 katkıda 28 gün kür süresindeki serbest basınç dayanımı, 7 gün kürden bir miktar daha az çıkmıştır. Bu durumda Dayıoğlu vd. (2017) çalışmasından farklı olarak zeminin serbest basıncı % 30 katkılı durumda artan kür ile daha hızlı bir dayanım artışı göstermiştir. Altun vd. (2009) çalışmasında kullanılan uçucu külün CaO yüzdesinin fazla olmasının bu farkın oluşmasında önemli bir rolü olmuştur. Jha ve Sivapullaiah (2017) tarafından yapılan çalışmada da 7 gün kürlü % 20 katkılı karışımda karışımın serbest basınç dayanımı katkısız zeminin 1.40 katı iken, kür süresinin 28 güne çıkması ile dayanım değeri 7 günlük küre göre daha az olarak katkısız zeminin 1.10 katına inmiştir. 7 gün kürlü % 30 katkılı karışımda karışımın serbest basınç dayanımı katkısız zeminin 1.50 katı iken, kür

süresinin 28 güne çıkması ile dayanım değeri 7 günlük küre göre daha az olarak katkısız zeminin 1.20 katına inmiştir. Yılmaz (2015) çalışmasında, % 20 katkıda 7 gün kürlü serbest basınç değeri kontrol zeminin 1.34 katı iken % 30 katkıda 1.48 katına çıkmıştır. 28 gün kür süresinde artış hızlanmış ve % 20 katkılı zeminin dayanımı zeminin 1.79 katına ve % 30 katkılı karışım ise 2.15 katına çıkmıştır. Diğer katkıları ( % 5, % 10 ve % 15) için ise 7 ve 28 gün kür sürelerinde elde edilen serbest basınç dayanımı değerleri birbirine yakın olmuştur. Yılmaz vd. (2019) çalışmasında, zemine % 5, % 10 ve % 20 oranında eklenen uçucu kül zeminin serbest basınç dayanımını 28 günde fazla değiştirmemiştir. İlgili karışımların dayanımı zeminin sırasıyla 0.95, 1.05 ve 1.20 katı olmuştur. Deepak vd. (2021) çalışmasında % 3 ve % 5 uçucu kül katkılarında 7 kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımı, zeminin sırasıyla 1.00, 1.05 katı iken, 28 gün kür süresinde 1.05 ve 1.11 katı olmuştur.

Literatür çalışmaları toplu olarak değerlendirildiğinde Altun vd. (2009) ile Jha ve Sivapullaiah (2017) haricindeki çalışmaların bu tez çalışmasına benzerlik gösterdiği görülmektedir. Modarres ve Nosoudy (2015), Yılmaz (2015), Dayıoğlu vd. (2017) ve Yılmaz vd. (2019) çalışmasında artan uçucu kül katkısı zeminin serbest basınç dayanımını düşük yüzde ile artırmıştır. Modarres ve Nosoudy (2015) çalışmasında kullanılan uçucu külün CaO miktarı % 2.28 olup neredeyse bu tez çalışmasındaki değer (% 2.49) ile aynıdır. Yılmaz (2015) ve Dayıoğlu vd (2017) çalışmalarında CaO miktarları sırasıyla % 13.1 ve % 14.3 olmasına rağmen dayanım artışında bu tez çalışması ile benzerlik göstermişlerdir. Altun vd. (2009) çalışmasındaki uçucu külün CaO oranının (% 18.67) yüksek olması ile dayanım artış oranı oldukça yüksek olmuştur. Jha ve Sivapullaiah (2017) tarafından yapılan çalışmada ise Altun vd. (2009) çalışmasının aksine düşük CaO (% 0.97) miktarı ile dayanım artışı düşük kalmıştır. Ayrıca diğer çalışmalardan farklı olarak artan kür süresi ile de dayanım azalmıştır.

Şekil 5.2'de kireç katkısının (L) düşük plastisiteli killi zeminin (S) serbest basınç dayanımına (UCS) etkisi gösterilmiştir. Şekil 5.2'de görüldüğü gibi eklenen kireç katkısı ile zeminin serbest basınç dayanımının gözle görünür şekilde arttığı, ancak % 5 katkıdan sonra özellikle 0 ve 7 gün kürlü durumda artışın yavaşladığı gözlenmiştir. Zemine eklenen % 3 kireç katkısı 0 gün kür süresinde dayanımı 1.76 katına çıkarırken, % 5 ve % 7 katkıdaki değerler ise zeminin 1.95 ve 1.99 katıdır. Kür süresinin 7 güne çıkması ile kireç katkılı karışımların dayanım değerleri en düşük S3L ve en yüksek S7L karışımında olmak üzere zeminin 2.30 ile 2.57 katı arasında değişmektedir. S3L ve S5L karışımlarında 28 gün kür süresindeki dayanım değerleri zeminin 2.86 ile 3.02 katıdır. En yüksek serbest basınç dayanımı değeri ise 28 gün kür süresinde ve %

7 kireç eklenen karışımda gerçekleşmiş olup elde edilen değer, katkısız zeminin serbest basınç dayanımının 3.21 katına çıkmıştır.



**Şekil 5.2** Kirecin S zeminin serbest basınç dayanımına etkisi.

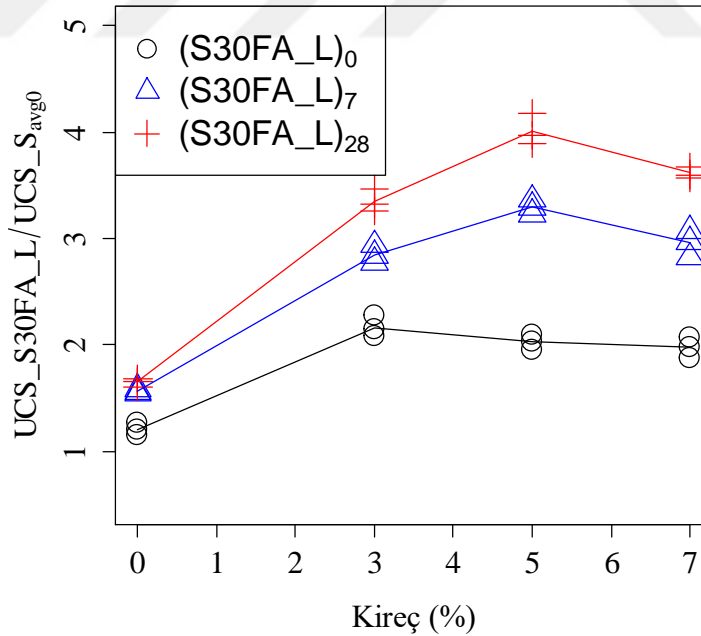
Bell (1996) tarafından yapılan çalışmada % 4 oranında eklenen kireç dayanımı 7 günde 1.74 katına ve 28 günde 2.78 katına çıkarmıştır. % 6 oranında eklenen kireç dayanımı 7 günde 2.24 katına ve 28 günde 3.01 katına çıkarmıştır. Osinubi ve Nwaiwu (2006) tarafından yapılan çalışmada 7 gün kür süresinde % 3 kireç katkısına ait serbest basınç dayanımı killi zeminin 1.85 katıdır. Katkı oranının % 5'e çıkması ile dayanım katkısız zeminin 2.58 katına yükselmiştir. Daha fazla eklenen kireç ise serbest basınç dayanım artış hızını düşürmüştür ve % 8 katkılı zeminde serbest basınç dayanımı katkısız zeminin 2.82 katı olmuştur. Kireç katkısının 28 güne çıkması ile dayanım artışı hızlanmış olup % 3 kireç katkılı karışımın serbest basınç dayanımı killi zeminin 4.35 katına ulaşmıştır. En yüksek dayanım % 5 kireçli karışımda olmuştur. Bu karışımda ilgili değer kontrol zemininin 4.68 katına çıkarken, katkı oranı % 8'e yükseldiğinde serbest basınç dayanımı % 5 katkılı karışımın değerine göre azalmış olup kontrol zemininin 3.79 katına düşmüştür. Solanki vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada ise 28 gün kür süresinde zeminin dayanımı eklenen % 3 kireç ile 1.52 katına çıkarken, kireç katkısının % 6'ya çıkması ile dayanım neredeyse aynı kalarak zeminin 1.6 katına gelmiştir. En yüksek dayanım ise % 9 kireç katkılı karışımda gerçekleşmiş olup karışımın serbest basınç dayanım kontrol zemininin 2 katı olmuştur. Kavak ve Baykal (2012) tarafından yapılan çalışmada zemine eklenen % 4 kireç, zeminin serbest basınç dayanımını 0 gün kürde, 1.70 katına, 7 gün kür süresinde 4 katına

ve 28 gün kür süresinde yaklaşık 8 katına yükselmiştir. Mccarthy vd. (2014), 7 gün kür süresinde zemine eklenen % 3 kirecin killi zeminin serbest basınç dayanımını 2.00 katına çıkardığını ve kür süresi 28 güne çıktığında aynı kireç oranının zeminin dayanımını 2.71 katına getirdiğini tespit etmişlerdir. Modarres ve Nosoudy (2015) tarafından yapılan çalışmada zemine eklenen % 3 kireç, zeminin serbest basınç dayanımını 7 gün kür süresinde 2.56 katına çıkarmıştır. Daha fazla eklenen kireç de dayanımı artırırken % 6 ve % 9 katkıda sırasıyla 3.61 ve 4.33 katına çıkarmıştır. Kür süresinin 28 güne çıkması ile aynı katkı oranları için dayanım değerleri zeminin sırasıyla 3.06, 4.22 ve 5.00 katına çıkmış olup, 7 günden sonra dayanım artış hızında belirgin bir azalma olmuştur. Diallo ve Ünsever (2019) tarafından yapılan çalışmada ise % 2 kireç katkısı, zeminin dayanımını 7 gün kürde 4.24 ve 28 gün kürde 4.27 katına çıkarmıştır.

Literatür çalışmaları toplu olarak değerlendirildiğinde (Bell, 1996, Solanki vd. 2009, Kavak ve Baykal 2012; Mccarthy vd. 2014; Modarres ve Nosoudy 2015) 7 gün kür süresinde kirecin zeminin dayanımını ortalama 2.91 katına (en düşük 1.48 kat ve en yüksek 4.33 kat) çıkardığı gözlenmiştir. Kür süresinin artması ile 28 gün kür süresinde elde edilen serbest basınç dayanımları zeminin ortalama 3.70 katına (1.52 ile 8.00 katı aralığına) yükselmiştir. İlgili tez çalışmasında bulunan değerlerin hem 7 gün hem de 28 gün kür süresi için literatür sonuçlarından elde edilen ortalama değerlere yakın olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 5.3'de % 30 uçucu kül sabit olmak üzere eklenen farklı (% 3, % 5 ve % 7) kireç oranlarında düşük plastisiteli killi zeminin serbest basınç dayanımının nasıl değiştiği ortaya konulmuştur. Bu şekilde S30FA karışımı üzerine eklenen % 3 kireç dayanımın tüm kür sürelerinde önemli miktarda artmasına yol açmıştır. Burada 0 gün kür süresinde en yüksek dayanım artışı S30FA3L kodlu karışımda ve diğer kür sürelerinde S30FA5L kodlu karışımda elde edilmiştir. Sıfır gün kür süresinde S30FA3L karışımının serbest basınç dayanımı, katkısız zeminin 2.17 katı olmuştur. Katkının % 5 ve % 7 olması dayanımda çok büyük değişime yol açmamıştır. İlgili karışımlardaki serbest basınç dayanımları sırasıyla zeminin 2.03 katına ve 1.98 katına düşmüştür. Kür süresinin 7 güne çıkması ile S30FA3L karışımının serbest basınç dayanımı katkısız zeminin 2.85 katı, % 5 katkıda 3.30 katı ve % 7 katkıda 2.96 katı olmuştur. 28 gün kür süresinde ise aynı oranlar S30FA3L için 3.35 katına S30FA5L için 4.00 katına ve S30FA7L için 3.61 katına yükselmiştir. Bu değerler Şekil 5.1'deki S zeminin % 30 uçucu kül katkısındaki sonuçlar ile karşılaştırıldığında, 28 gün kür süresinde elde edilen 1.65 kat değerine göre oldukça yüksek olup (% 30 küle kireç eklenince minimum 3.35 katına çıkması) kirecin dayanımı artırıcı

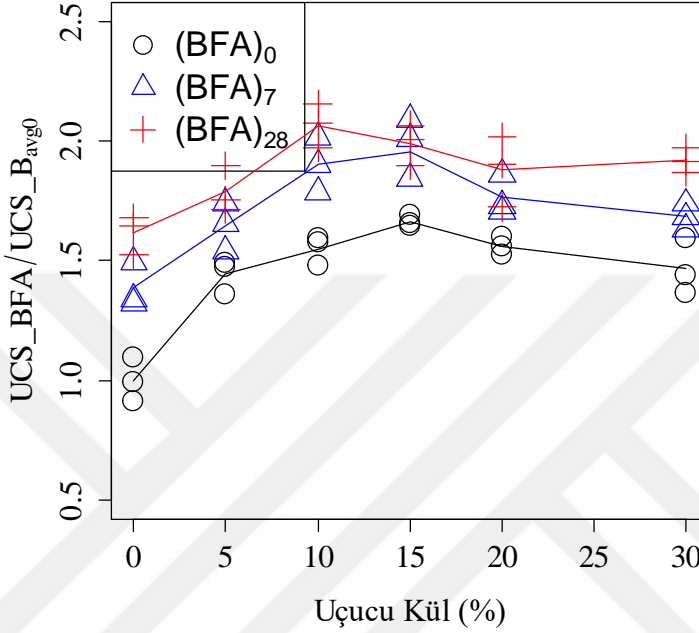
özelliğini göstermektedir. Ayrıca Şekil 5.2'de kireç ile ilgili olarak en yüksek serbest basınç dayanımı değeri katkısız zeminin 3.21 katı iken, % 30 uçucu kül eklenen kireç katkılı karışımlarda en yüksek dayanım katkısız zeminin 4.01 katıdır. Kirece eklenen uçucu külün dayanımı çok yükseltmese de olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır. Mccarthy vd. (2014) zemine eklenen % 3 kireç katkısı sabit ve % 6 uçucu kül katkılı karışımın 7 gün kür süresindeki serbest basınç dayanımı, katkısız zeminin 2.28 katı iken, uçucu kül oranı arttıkça dayanım artmış ve en yüksek dayanıma % 24 uçucu kül ve % 3 kireç katkısında ulaşılmıştır. İlgili karışımın serbest basınç dayanımı, kontrol zeminin 3.21 katına çıkmıştır. Kür süresinin artması ile birlikte 28 gün kür süresinde serbest basınç dayanımı, % 3 kireç sabit olan % 6 uçucu kül katkısında zeminin 3.71 katı iken % 24 uçucu kül içeren karışımda 4.43 katı olmuştur. Diallo ve Ünsever (2019) tarafından yapılan çalışmada ise % 25 uçucu kül + % 2 kireç içeren karışımın serbest basınç dayanımı 7 ve 28 gün kür süresinde zeminin sırasıyla 20.27 ve 34.20 katına çıkarmıştır. Deepak vd. (2021), çalışmasında ise % 4 uçucu kül ve % 5 kireç katkılı karışımda 7 ve 28 gün kür süresindeki serbest basınç dayanımı zeminin sırasıyla 3.00 ve 4.00 katı olmuştur. İlgili literatürlerden Mccarthy vd. (2014) ile Deepak vd. (2021) tarafından elde edilen sonuçların ile tezden elde edilenler ile birbirine yakın olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.3** % 30 Uçucu kül ve kirecin S zeminin serbest basınç dayanımına etkisi.

### 5.2.2 B Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması

Şekil 5.4'de uçucu kül katkısının (FA) düşük plastisiteli killi zeminin (B) serbest basınç dayanımına (UCS) etkisi gösterilmiştir. Tüm değerlerin etkisi incelenirken, 0 gün kürlü B zeminin ortalama serbest basınç dayanımı referans alınmıştır.



Şekil 5.4 Uçucu külün B zeminin serbest basınç dayanımına etkisi.

Şekil 5.4'de yüksek plastisiteli kile (B) eklenen uçucu kül katkısı ile kilin serbest basınç dayanımının belirli bir düzeye kadar arttığı gözlenmektedir. B zeminin 0 günlük dayanımı 219.86 kPa iken kürün 7 ve 28 gün olduğu durumlardaki dayanım kürsüz halin sırasıyla 1.37 ve 1.62 katına yükselmiştir. Kürsüz (0 gün) durumda dayanım artışları 1.44 ile 1.66 kat arasında değişmiştir. Zemine eklenen % 5 uçucu kül, zeminin serbest basınç dayanımını 0 gün kür süresinde 1.44 katına çıkarırken % 15 katkıya kadar artış devam etmiştir. En yüksek dayanım B15FA kodlu karışımda zeminin 1.66 katı olarak gerçekleşmiştir. Daha sonra dayanım bir miktar azalarak % 30 katkıda zeminin 1.47 katı olmuştur. Kürün 7 gün olduğu durumda uçucu kül katkılı karışımların dayanımı zeminin 1.65 ile 1.98 katı arasına çıkmıştır. İlgili kür süresinde % 15 katkıya kadar serbest basınçta yükselme, % 15 katkıdan sonra ise bir miktar azalma gözlenmiştir. 7 gün kür süresi için en yüksek değer B15FA karışımında zeminin 1.98 katı olmuştur. Kür süresinin 28 gün olduğu durumda ise dayanım % 10 katkıya kadar arttıktan sonra % 20 katkıya kadar azalmış olup, daha sonra neredeyse sabitlenmiştir. Bu kür süresi için dayanım değerlerinin zeminin 1.79 ve 2.07 katı arasında değiştiği bulunmuştur. Bu değerler

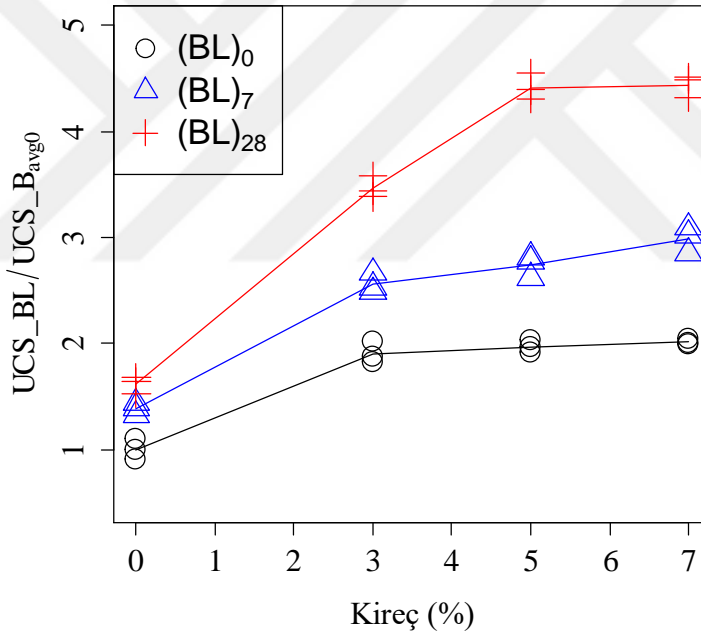
B5FA ve B10FA karışımları için elde edilmiştir. Katkı oranının % 20'ye çıkması ile 7 gün ve 28 gün kür süresinde dayanım zeminin sırasıyla 1.78 ve 1.88 katı iken, katkıının % 30'a yükselmesi dayanımda önemli bir değişime yol açmamıştır. İlgili karışımın 7 ve 28 gün kür süresindeki UCS değeri zeminin 1.68 ve 1.92 katı olmuştur. Tıpkı S zeminde olduğu gibi B zeminde de kür süresi ile ilgili olarak ilk 7 günde daha hızlı bir artış var iken 7 ve 28 gün kür süresi aralığında dayanım artış hızı önemli miktarda azalmıştır. Bu duruma sebep olarak uçucu kül malzemesinde silt partikülünün daha çok olması sonucu bağ yapamayan bu partiküllerin zeminin dayanımı artırmaya yönelik bir katkısının olamayabileceği, kimi durumda da azaltıcı etkisinin olabileceği bildirilmiştir (Bell 1996; Kate 2005; Zha vd. 2008). Elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırıldığında uyumlu olduğu görülmektedir. Sridharan vd. (1997), zemine eklenen % 9 oranında uçucu külün 7 gün kür süresinde kilin serbest basınç dayanımını 1.40 katına çıkardığını tespit etmişlerdir. Katkı oranının % 22 olduğu durumda dayanım zeminin 1.68 ve % 35 olduğunda ise 1.80 katına yükselmiştir. Kür süresinin 28 güne çıkması ile % 9, % 22 ve % 35 kireç katkılı karışımlarda dayanım değerleri zeminin sırasıyla 1.68, 2.08 ve 2.20 katına yükselmiştir. Burada kürün ilk 7 gününde artışın hızlı olduğu sonra da oldukça yavaşladığı göze çarpmaktadır. Zha vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada 7 gün kür süreli kireç içermeyen uçucu kül katkılı karışımda katkı oranı % 12 iken maksimum serbest basınç dayanımı elde edilmiştir. Buna göre % 3 katkılı karışımın dayanımı kontrol zeminin 1.12 katı iken % 12 katkıda 1.28 katı olmuş ve % 15 katkıda ise neredeyse aynı kalarak 1.27 katına gelmiştir. En yüksek dayanımın elde edildiği uçucu kül oranı % 9 olup bu tez çalışmasından elde edilene oldukça yakındır. Bunun yanında Yılmaz (2015) tarafından yapılan çalışmada % 30 katkıda elde edilen dayanım zeminin 0 günlük serbest basınç dayanımının 2.15 katıdır. Bu tez çalışmasında ise % 30 katkı oranı ve 28 gün kür süresinde elde edilen değer zeminin serbest basınç dayanımının 1.92 katı olup bu açıdan ilgili çalışmayla benzerlik göstermektedir. Dayıoğlu vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada ise dayanım artışı en yüksek % 20 uçucu kül katkısında gerçekleşmiş ve elde edilen değer zeminin ortalama serbest basınç dayanımının 1.69 katıdır. Bu tez çalışmasındaki sonuçtan farklı olarak Yılmaz (2015) ise en yüksek dayanım artışı % 30 uçucu kül katkısında 28 gün kür süresinde elde edilmiştir. Jha ve Sivapullaiah (2017) tarafından yapılan çalışmada da en yüksek serbest basınç dayanımı % 10 katkıda elde edilmiş ve ilgili değer kontrol zemininin 1.60 katı olmuştur. Mahedi vd. (2020) çalışmasında ise uçucu kül katkısı kür zeminin serbest basınç dayanımını % 5, % 10 ve % 20 katkı oranları için sırasıyla 7 gün kür süresinde 3.25, 3.12 ve 2.50 katına, 28 günde ise 3.50, 3.25 ve 3.12 katına çıkarmıştır. Turan vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada ise, % 20 ve % 30 uçucu kül katkılarında elde

edilen serbest basınç dayanım değerleri 7 gün kürlü durumda zeminin sırasıyla 2.17 ve 2.65 katı iken 28 gün kürde ise 2.63 ve 2.15 katı olmuştur.

Literatür çalışmaları birlikte değerlendirildiğinde Zha vd. (2008) ile Jha ve Sivapullaiah (2017) tarafından elde edilen serbest basınç dayanımı değerlerinde en yüksek katkının elde edildiği uçucu kül yüzdeleri (%10) bu tez çalışması ile benzer olup Yılmaz (2015) ile Dayioğlu vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada % 30 ve Turan vd. (2020) çalışmasında ise % 20 uçucu kül katkısında elde edilmiştir. Dayanım artış miktarları ise bu tez çalışmasından elde edilen en yüksek serbest basınç dayanımına (zeminin 2.07 katı) benzer bir şekilde zeminin 1.69 ile 2.65 katı arasındadır.

Şekil 5.5'de kirecin yüksek plastisiteli killi zeminin serbest basınç dayanımına etkisi görülmektedir. Eklenen kireç katkısı ile zeminin serbest basınç dayanımında artış meydana gelmiştir. Sıfır gün kür süresinde eklenen % 3 kireç katkısı zeminin serbest basınç dayanımını 1.87 kata çıkartırken bu oran % 5 katkıda 2.03 katına çıkmış ve % 7 katkıda çok değişmeyerek 2 katında kalmıştır. Yedi gün kür süresinde kireç katkılı serbest basınç dayanımı % 3 katkıda zeminin 2.56 katına çıkarken % 5 katkıda 2.74 ve % 7 katkıda 2.99 katına çıkmıştır. 28 gün kür süresinde ise kireç katkılı serbest basınç dayanımı % 3 katkıda zeminin 3.47 katına çıkarken % 5 katkıda 4.41 ve % 7 katkıda 4.44 katına çıkmıştır. Birlikte değerlendirildiğinde optimum olarak % 5 eklenen kirecin, yüksek plastisiteli killi zeminin serbest basınç dayanımını 28 günlük kür süresinde yaklaşık 4.41 katına çıkardığı, daha fazla eklenen kirecin ise dayanımda önemli bir değişime yol açmadığı anlaşılmaktadır. Burada elde edilen en yüksek değer ise uçucu kül katkılı karışımlarda elde edilen en yüksek değer yaklaşık 2.13 katıdır. Bell (1996) tarafından yapılan çalışmada ise % 2 oranında eklenen kireç dayanımı 7 günde 2.72 katına ve 28 günde 3.38 katına çıkarmıştır. Daha fazla eklenen kireç katkıları ile de dayanım artmaya devam etmiştir. % 4 oranında eklenen kireç dayanımı 7 günde 4.06 katına ve 28 günde 4.92 katına çıkarmıştır. % 6 oranında eklenen kireç dayanımı 7 günde 3.76 katına ve 28 günde 4.94 katına çıkarmıştır. Al-Mukhtar vd. (2012), tarafından yapılan çalışmada zemine eklenen % 4 kireç, 7 gün kür süresinde zeminin serbest basınç dayanımını (UCS) 4 katına çıkarırken 90 gün kür süresinde ise 6 katına yükseltmiştir. En yüksek dayanım ise % 10 katkılı karışımda olmuştur. İlgili karışımın UCS değeri 7 gün kür süresinde zeminin 5.33 katı iken kür süresi 90 olduğunda 8 katına yükselmiştir. McCarthy vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada ise 7 gün kür süresinde CH zemine eklenen % 3 kireç, zeminin serbest basınç dayanımını 1.86 katına çıkartmıştır. Kür süresi 28 güne çıktığında aynı kireç oranı, zeminin dayanımını 2.86 katına çıkarmıştır. Dayioğlu

vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada 7 gün kür süresinde % 4 oranında eklenen kireç serbest basınç dayanımını, kontrol zeminin 1.15 katına çıkarırken, kür süresinin 28 güne çıkması ile dayanım artarak kontrol zeminin 1.54 katı olmuştur. 7 gün kür süresinde % 8 oranında eklenen kireç serbest basınç dayanımını, kontrol zeminin 1.38 katına çıkarırken, kür süresinin 28 güne çıkması ile dayanım artarak kontrol zeminin 1.85 katı olmuştur. 7 gün kür süresinde % 12 oranında eklenen kireç serbest basınç dayanımını, kontrol zeminin 1.62 katına çıkarırken, kür süresinin 28 güne çıkması ile dayanım artarak kontrol zeminin 1.92 katı olmuştur. Mahedi vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada zemine eklenen % 3, % 5 ve % 7 kireç, 7 gün kür süresinde zeminin serbest basınç dayanımını sırasıyla 4.25, 4.00 ve 3.88 katına, 28 günde ise 5.50, 6.25 ve 6.00 katına çıkarmıştır. Dolayısı ile kireçli karışımlarda uçucu küllü karışımların aksine kür süresinin artması dayanımın artışına yol açmıştır. Bu durum çimentolaşma reaksiyonlarının gerçekleşmeye devam ettiğini göstermektedir.

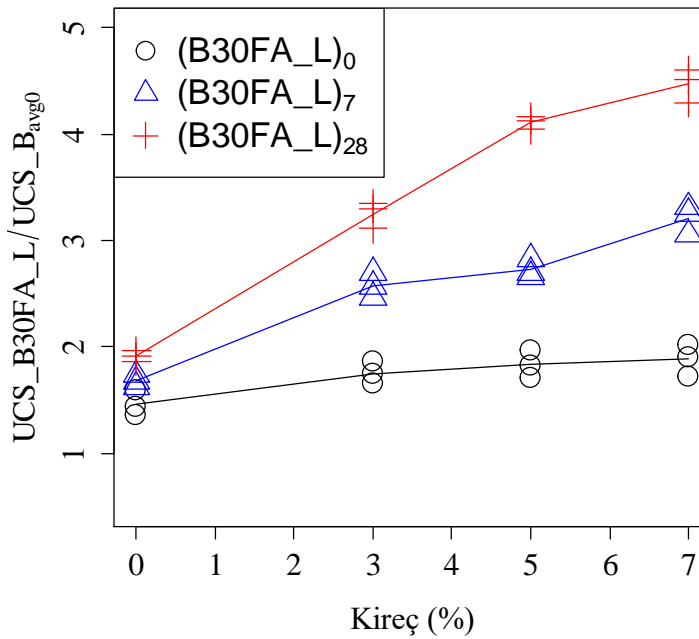


**Şekil 5.5** Kirecin B zeminin serbest basınç dayanımına etkisi.

Konu ile ilgili literatürler (Bell 1996; Al-Mukhtar vd. 2012; Mccarthy vd. 2014; Dayıoğlu vd. 2017) değerlendirildiğinde kirecin zeminin serbest basınç dayanımını 7 gün kür süresinde 1.15 ile 4.06 kat, 28 günde ise 1.54 ile 4.94 kat aralığına çıkardığı sonucu bulunmuştur. Bu değerler, tez çalışmasından bulunan sonuçlara oldukça yakındır.

Şekil 5.6'da % 30 uçucu kül sabit olmak üzere eklenen farklı (% 3, % 5 ve % 7) kireç oranlarında yüksek plastisiteli killi (B) zeminin serbest basınç dayanımının nasıl değiştiği gösterilmektedir.

Bu şekilde B30FA karışımı üzerine eklenen kireç katkılarının S zeminin aksine 0 gün kür süresinde serbest basınç dayanımına olumlu bir katkısının olmadığı gözlenmektedir. Kür süresi arttıkça çimentolaşma reaksiyonları için gerekli olan sürenin sağlanması ile kireçsiz B30FA karışımı ile hem % 30 uçucu kül hem kireç içeren karışımlar arasındaki fark artmaya başlamış ve kireç etkisini belirgin bir şekilde göstermiştir. Burada tüm kür süreleri için en yüksek dayanım artışı B30FA7L kodlu karışımda elde edilmiştir. Sıfır gün kür süresinde B30FA3L karışımının serbest basınç dayanımı katkısız zeminin 1.75 katı iken, % 5 katkıda 1.84 katına ve % 7 katkıda, 1.88 katına çıkmıştır. Kür süresinin 7 güne çıkması ile B30FA3L karışımının serbest basınç dayanımı katkısız zeminin 2.58 katı, % 5 katkıda 2.73 katı ve % 7 katkıda 3.21 katı olmuştur. 28 gün kür süresinde ise aynı oranlar B30FA3L için 3.25 katına, B30FA5L için 4.11 katına ve B30FA7L için 4.47 katına yükselmiştir. Bu değerler Şekil 5.4'deki B zeminin % 30 uçucu kül katkısındaki sonuçlar ile karşılaştırıldığında, 28 gün kür süresinde elde edilen 1.91 kat değerine göre oldukça yüksek olup (% 30 küle kireç eklenince minimum 3.25 katına çıkması) kirecin dayanımı artırıcı özelliğini göstermektedir. Ayrıca Şekil 5.5'de kireç ile ilgili olarak en yüksek serbest basınç dayanımı değeri katkısız zeminin 4.44 katı iken, % 30 uçucu kül eklenen kireç katkılı karışımlarda en yüksek dayanım katkısız zeminin 4.47 katıdır. Kirece eklenen uçucu külün dayanımda önemli bir değişime yol açmadığı görülmektedir.



**Şekil 5.6** % 30 Uçucu kül ve kirecin B zeminin serbest basınç dayanımına etkisi.

Zha vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada 7 gün kür süresinde % 15 uçucu kül katkısı ve killi zemin üzerine eklenen % 1, % 2 ve % 3 kireç katkıları, karışımların serbest basınç dayanımı,

kontrol zeminin sırasıyla; 1.36, 1.60 ve 1.65 katına çıkarmıştır. Bu durumda bu tez çalışmasında % 30 uçucu kül ve % 3 kireç katkıli karışımda ise 7 gün kürdeki dayanım kontrol zeminin 1.75 katı olup birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Mccarthy vd. (2014) zemine eklenen % 3 kireç katkısı sabit ve % 6 uçucu kül katkıli karışımın 7 gün kür süresindeki dayanımı, katkısız zeminin 2.00 katı iken, uçucu kül oranı arttıkça dayanım artmış ve en yüksek dayanıma % 24 uçucu kül ve % 3 kireç katkısında ulaşılmıştır. İlgili karışımın serbest basınç dayanımı, kontrol zeminin 3.00 katına çıkmıştır. Kür süresinin artması ile birlikte 28 gün kür süresinde serbest basınç dayanımı, % 3 kireç sabit olan % 6 uçucu kül katkısında zeminin 3.14 katı iken % 24 uçucu kül içeren karışımda 4.00 katı olmuştur. Jha ve Sivapullaiah (2017), % 6 kireç sabit tutulurken % 10, % 20 ve % 30 uçucu kül oranlarında serbest basınç deneyi yapmışlardır. Buna göre 7 gün kür süresinde % 30 uçucu kül ve % 6 kireç katkısı içeren karışımın dayanımı, kontrol zeminin 1.72 katı iken, kür süresinin 28 güne çıkması sonucunda oluşan dayanım zeminin 3.97 katına çıkmıştır. Deepak vd. (2021), çalışmasında ise % 4 uçucu kül ve % 5 kireç katkıli karışımda 7 ve 28 gün kür süresindeki serbest basınç dayanımı zeminin sırasıyla 3.50 ve 4.50 katı olmuştur. Dolayısıyla bu yönden uçucu kül + kireç katkısı içeren karışımlarda da tıpkı kireç katkısı gibi 7 günden sonra serbest basınç dayanım artışı devam etmiştir. Literatür ile birlikte değerlendirildiğinde 7 gün kür süresinde dayanım değerinin zeminin 1.36 ile 3.50 katı arasında olduğu, kür süresinin 28 güne çıkması ile yaklaşık 4-4.5 katına yükseldiği anlaşılmaktadır. Bu karışımlar için bulunan değerlerin ise 7 gün kür için zeminin 2.58 ile 3.21 katı arasında olduğu, kür süresinin 28 güne çıkması ile 3.25 ile 4.47 kat arasına yükseldiği görülmektedir. Bu durum tez çalışmasından elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

Yukarıda düşük ve yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait verilen deneysel sonuçlar ve literatür ile karşılaştırılmaları Çizelge 5.2'de özetlenmiştir. Çizelgede verilen sonuçlarda "KAT" ifadesi ilgili serbest basınç dayanımı değerinin, o zeminin kürsüz durumdaki serbest basınç dayanımı değerine oranını temsil etmektedir.

**Çizelge 5.2** Serbest basınç dayanımı sonuçlarının özeti.

KARIŞIM TİPİ	Tezden Elde Edilen Sonuçlar Tezdeki uçucu kül CaO = % 2.49				Yayınlarından Elde Edilen Sonuçlar				
	Karışım	KAT			Yazar	CaO (%)	Katki (%)	KAT	
		0 gün	7 gün	28 gün				7 gün	28 gün
UÇUCU KÜL KATKISI	S	X	1.26	1.32	Sridharan vd. (1997)	9.00	9 22 35	1.40 1.68 1.80	1.68 2.08 2.20
	S5FA	1.13	1.34	1.41	Zha vd. (2008)	2.82	3 12 15	1.12 1.28 1.27	.....
	S10FA	1.23	1.40	1.47	Altun vd. (2009)	18.67	10 20 30	3.00 5.11 5.17	3.32 7.97 9.58
	S15FA	1.30	1.46	1.54	Modarres vd. (2015)	2.28	3 6 9	1.67 1.83 1.94	1.83 2.00 2.11
	S20FA	1.22	1.54	1.62	Yılmaz (2015)	13.10	20 30	1.34 1.48	1.79 2.15
	S30FA	1.21	1.57	1.65	Dayıoğlu vd. (2017)	14.30	10 20 30	1.57 1.67 1.54	1.54 1.65 1.62
	B	X	1.37	1.62	Jha ve Sivapulaia h (2017)	0.97	20 30	1.40 1.50	1.10 1.20
	B5FA	1.44	1.65	1.79	Yılmaz vd. (2019)	1.50	5 10 20	... ... ...	0.95 1.05 1.20
	B10FA	1.55	1.90	2.07	Yılmaz vd. (2019)	11.80	10 20	... ...	1.67 3.00
	B15FA	1.66	1.98	1.99	Mahedi vd. (2020)	26.20	5 10 20	3.25 3.12 2.50	3.50 3.25 3.12
	B20FA	1.56	1.77	1.88	Turan vd. (2020)	32.40	20 30	2.17 1.96	2.63 2.15
	B30FA	1.47	1.68	1.92	Deepak vd. (2021)	3.80	3 5	1.00 1.05	1.05 1.11

**Çizelge 5.2** Serbest basınç dayanımı sonuçlarının özeti (devam ediyor).

KARIŞIM TİPİ	Tezden Elde Edilen Sonuçlar Tezdeki uçucu kül CaO = % 2.49				Yaynlardan Elde Edilen Sonuçlar				
	Karışım	KAT			Yazar	CaO (%)	Katkı (%)	KAT	
		0 gün	7 gün	28 gün				7 gün	28 gün
KİREÇ	S3L	1.76	2.30	2.86	Bell (1996)	...	4 6	1.74 2.78	2.24 3.01
	S5L	1.95	2.42	3.02	Bell (1996)	...	4 6	4.06 3.76	4.92 4.94
	S7L	1.99	2.57	3.21	Osinubi vd. (2006)	...	3 5 8	1.85 2.58 2.82	4.35 4.58 3.79
					Solanki vd. (2009)	...	3 6 9	...	1.52 1.60 2.00
	B3L	1.90	2.56	3.47	Al-Mukhtar vd. (2012)	...	4	4.00	6.00
	B5L	1.97	2.74	4.41	Kavak ve Baykal (2012)	...	4	4.00	8.00
	B7L	2.02	2.99	4.44	Mccarthy vd. (2014)	...	3	2.00	2.71
					Dayıoğlu vd. (2017)	...	4 8 12	1.15 1.38 1.62	1.54 1.85 1.92
					Diallo ve Ünsever (2019)	...	2	4.24	4.27
					Mahedi vd. (2020)	...	3 5 7	4.25 4.00 3.88	5.50 6.25 6.00
UÇUCU KÜL + KİREÇ	S30FA3L	2.17	2.85	3.35	Mccarthy vd. (2014)	3.60	6 FA+3L 24FA+3L	2.28 3.21	3.71 4.43
	S30FA5L	2.03	3.30	4.01	Mccarthy vd. (2014)	3.60	6 FA+3L	2.00	3.14
	S30FA7L	1.98	2.96	3.61			24FA+3L	3.00	4.00
	B30FA3L	1.75	2.58	3.25	Diallo ve Ünsever (2019)	...	25FA+2L	20.27	34.20
	B30FA5L	1.84	2.73	4.11	Deepak vd. (2021)	10.97	4 FA+5L	3.50	4.50
	B30FA7L	1.88	3.21	4.47	Deepak vd. (2021)	3.80	4 FA+5L	3.00	4.00

### 5.3 DONMA-ÇÖZÜLME SONRASI SERBEST BASINÇ DAYANIMI BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

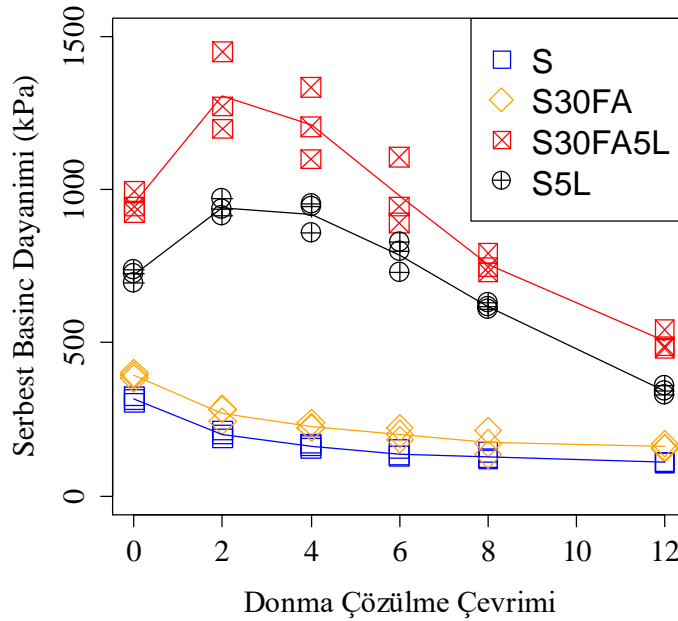
Bu bölümde düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait farklı donma-çözülme çevrimlerinden sonra elde edilen serbest basınç deneyi sonuçları değerlendirilmiştir.

### 5.3.1 S Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması

Düşük plastisiteli killi zemin ve karışımları 28 gün küre tabi tutulduktan sonra S, S30FA, S30FA5L ve S5L kodlu karışımlara 2, 4, 6, 8 ve 12 donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır. Sonrasında numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır.

Birbirinin tamamen aynısı (katkı oranı, kür süresi ve donma-çözülme çevrimi sayısı) olan 3 adet numuneye ait sonuçların hepsi Şekil 5.7'de verilmiştir. Katkısız S zemin ve S30FA kodlu karışımın artan donma-çözülme çevrimi ile serbest basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. S zemine ait UCS değeri 2 donma-çözülme çevriminden sonra donma-çözülmesiz halinin 0.64 katına gelmiştir. Donma çözülme çevriminin artması ile dayanım azalış hızında yavaşlama gözlenmiş olup en düşük UCS değerine 12 donma-çözülme çevriminde ulaşılmıştır. İlgili çevrimdeki UCS değeri, donma-çözülme çevrimsiz durumun 0.35 katına gelmiştir. S30FA karışımına ait UCS değeri 2 donma-çözülme çevriminden sonra donma-çözülmesiz halinin 0.69 katıdır. Donma çözülme çevriminin artması ile dayanım azalış hızında yavaşlama gözlenmiş olup en düşük UCS değerine 12 donma-çözülme çevriminde ulaşılmıştır. İlgili çevrimdeki UCS değeri, donma-çözülme çevrimsiz durumun 0.41 katına gelmiştir. En yüksek serbest basınç dayanımı % 30 uçucu kül ve % 5 kireç katkısı içeren S30FA5L kodlu karışımda elde edilmiştir. S30FA5L ve S5L kodlu karışımlara ait serbest basınç dayanımlarında 2 ve 4 çevrimlerde bir miktar dayanım artışı gözlenmiştir. S30FA5L ve S5L karışımlarına ait 2 donma-çözülme çevriminde UCS değeri donma çözülmesiz durumlarının sırasıyla 1.37 ve 1.31 katı olmuştur. Donma-çözülme çevrimi sayısı 6 olduğunda bile neredeyse donma-çözülme çevrimsiz serbest basınç dayanımına yakın bir değer görünmektedir. İlgili çevrimdeki UCS değeri, donma-çözülmesiz durumdakinin S30FA5L ve S5L karışımları için sırasıyla 1.03 ve 1.09 katı olmuştur. Donma-çözülme çevrimi 8 ve 12 olduğunda ise dayanım azalışı hızlanmış ve donma-çözülme çevriminden önceki serbest basınç dayanımının altında değerlere doğru ilerlemiştir. S30FA5L ve S5L karışımlarına ait en düşük UCS değerleri 12 donma-çözülme çevriminin olduğu durumda gerçekleşmiş olup, donma-çözülmesiz hallerine göre ilgili değerler sırasıyla 0.53 ve 0.48 katına düşmüştür. Burada ilk 4 çevrimde S30FA5L ve S5L kodlu karışımların serbest basınç dayanımlarının yükselmesinin nedeni, CaO miktarlarının fazla olması (sırasıyla % 3.24 ve % 6.12) ve çimentolaşma reaksiyonları için yeterli bir süre olmasından dolayı bağların kuvvetli kalmasıdır (Dayıoğlu vd. 2017). Donma-çözülme çevrimi sayısı 6'yı geçtikten sonra çimentolaşmadan kaynaklı etkiyi sönmülemeye başlayarak serbest basınç dayanımında azalmaya sebebiyet vermiştir. S zemininde CaO bileşeninin bulunmaması ve

S30FA kodlu karışımda ise CaO miktarının az olması (% 0.71) nedeniyle dayanım sürekli azalma eğilimi göstermiştir. Önemli sonuçlardan biri de 12 donma çözülme çevrimine uğramış S30FA5L ve S5L kodlu karışımların dayanımının, donma çözülme çevrimsiz S zeminden fazla olmasıdır. Literatürde buna benzer sonuçlar not edilmiştir (Bin-Shafique vd. 2010; Dayıoğlu vd. 2017). Aldaood vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada % 3 kireç içeren karışım ilk 4 çevrimde donma-çözülmesiz duruma göre daha yüksek dayanıma sahipken artan çevrim ile dayanım azalmıştır. Azaldığı durumda dahi, 7 donma-çözülme çevriminde dayanım katkısız zeminin 0.87 katı olmuştur. Altun vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada ise % 10 uçucu kül katkılı karışımda 7 donma-çözülme çevriminden sonra dayanım, donma-çözülmesiz durumun 0.88 katı olmuştur. Katkı oranının % 30 olduğu durumda da 7 donma-çözülme çevriminden sonra dahi serbest basınç dayanımı, katkısız durumun 0.93 katıdır. Güllü ve Khudir (2014) tarafından yapılan çalışmada ise katkısız zemine ait 2 donma-çözülme çevrimi sonrası serbest basınç dayanımı, donma-çözülmesiz halin 0.71 katı iken, çevrim 3'e yükseldiğinde 0.52 katına düşmüştür. Eskişar vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada donma-çözülmesiz durumda dayanım 250 kPa iken, 1 donma-çözülmede UCS değeri donma-çözülmesiz halin 0.50 katına düşmüştür. Donma-çözülme çevriminin 5 olması ile dayanım azalış hızı yavaşlamış ve ilgili çevrimdeki UCS değeri, donma-çözülmesiz durumun 0.34 katı olmuştur.



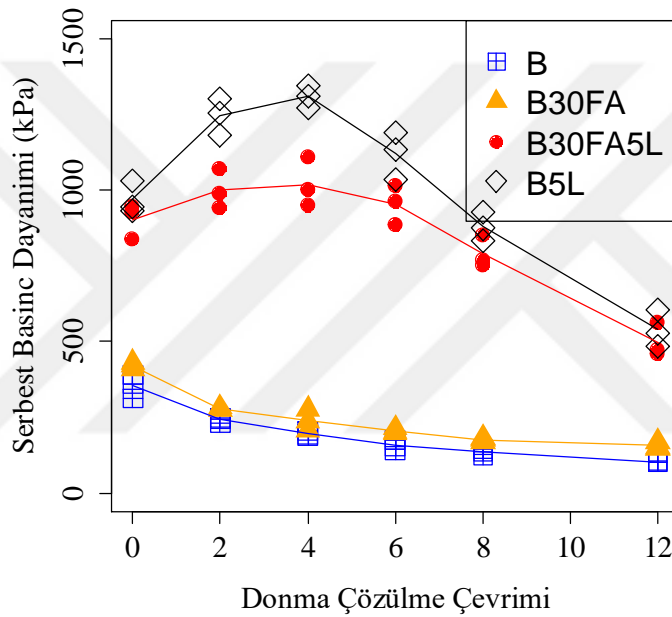
**Şekil 5.7** S zemin ve karışımlarına ait donma-çözülme sonrası serbest basınç dayanımları.

### 5.3.2 B Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması

Yüksek plastisiteli killi zemin için 28 gün küre tabi tutulmuş B, B30FA, B30FA5L ve B5L kodlu karışımlara 2, 4, 6, 8 ve 12 donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır. Sonrasında numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır.

Birbirinin tamamen aynısı (katkı oranı, kür süresi ve donma-çözülme çevrimi sayısı) olan 3 adet B numuneye ait sonuçların hepsi Şekil 5.8'de verilmiştir. Katkısız B zemin ve B30FA kodlu karışımın artan donma-çözülme çevrimi ile serbest basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. B zemine ait UCS değeri 2 donma-çözülme çevriminden sonra donma-çözülmesiz halinin 0.68 katına gelmiştir. Donma çözülme çevriminin artması ile dayanım azalış hızında yavaşlama gözlenmiş olup en düşük UCS değerine 12 donma-çözülme çevriminde ulaşılmıştır. İlgili çevrimdeki UCS değeri, donma-çözülme çevrimsiz durumun 0.29 katıdır. B30FA karışımına ait UCS değeri 2 donma-çözülme çevriminden sonra donma-çözülmesiz halinin 0.57 katıdır. Donma çözülme çevriminin artması ile dayanım azalış hızında yavaşlama gözlenmiş olup, en düşük UCS değerine 12 donma-çözülme çevriminde ulaşılmıştır. İlgili çevrimdeki UCS değeri, donma-çözülme çevrimsiz durumun 0.37 katına gelmiştir. En yüksek serbest basınç dayanımı S zemin karışımlarının aksine uçucu kül içermeyen % 5 kireç katkılı B5L karışımında elde edilmiştir. B30FA5L ve B5L kodlu karışımlara ait serbest basınç dayanımlarında 2 ve 4 çevrimlerde bir miktar dayanım artışı gözlenmiştir. B30FA5L ve B5L karışımlarına ait 2 donma-çözülme çevriminde UCS değeri donma çözülmesiz durumlarının sırasıyla 1.11 ve 1.28 katı olmuştur. Donma-çözülme çevrimi sayısı 6 olduğunda bile neredeyse donma-çözülme çevrimsiz serbest basınç dayanımına yakın bir değer görünmektedir. İlgili çevrimdeki UCS değeri, donma-çözülmesiz durumdakinin B30FA5L ve B5L karışımları için sırasıyla 1.06 ve 1.15 katı olmuştur. Donma-çözülme çevrimi 8 ve 12 olduğunda ise dayanım azalışı hızlanmış ve donma-çözülme çevriminden önceki serbest basınç dayanımının altında değerlere doğru ilerlemiştir. B30FA5L ve B5L karışımlarına ait en düşük UCS değerleri 12 donma-çözülme çevriminin olduğu durumda gerçekleşmiş olup, donma-çözülmesiz hallerine göre ilgili değerler sırasıyla 0.55 ve 0.56 katına düşmüştür. Donma-çözülme çevrimi sayısı 6 olduğunda bile neredeyse donma-çözülme çevrimsiz serbest basınç dayanımına yakın bir değer görünmektedir. Donma-çözülme çevrimi 8 ve 12 olduğunda ise dayanım azalışı hızlanmış ve donma-çözülme çevriminden önceki serbest basınç dayanımının altında değerlere doğru ilerlemiştir. Burada ilk 4 çevrimde B30FA5L ve B5L kodlu karışımların serbest basınç dayanımlarının yükselmesinin nedeni, CaO miktarlarının fazla olması (sırasıyla % 7.59 ve %

9.21) ve çimentolaşma reaksiyonları için yeterli bir süre olmasından dolayı bağların kuvvetli kalmasıdır (Dayıoğlu vd. 2017). Donma-çözülme çevrimi sayısının 6 olması ile sıcaklık değişimindeki tekrar sayısı, çimentolaşmadan kaynaklı etkiyi sönmülemeye başlayarak serbest basınç dayanımında azalmaya sebebiyet vermiştir. B zemininde CaO bileşeninin bulunmaması ve B30FA kodlu karışımda ise CaO miktarının az olması (% 4.47) nedeniyle donma-çözülme etkisine karşı koyabilecek bir etki oluşmadığı için dayanım sürekli azalma eğilimi göstermiştir. Önemli sonuçlardan biri de 12 donma çözülme çevrimine uğramış B30FA5L ve B5L kodlu karışımların dayanımının, donma çözülme çevrimsiz B zeminden fazla olmasıdır.



**Şekil 5.8** B zemin ve karışımlarına ait donma-çözülme sonrası serbest basınç dayanımları.

Literatürde buna benzer sonuçlar not edilmiştir (Bin-Shafique vd. 2010; Dayıoğlu vd. 2017). Dayıoğlu vd. (2017), zemine eklenen % 8 kirecin dayanımı 2 çevrimde donma-çözülmesiz duruma göre 1.33 katına çıkardığını, 4 donma-çözülmede 1.39 katına yükselttikten sonra 8 donma-çözülme çevriminde neredeyse donma-çözülmesiz durum ile aynı dayanıma getirdiğini tespit etmiştir. Aynı araştırmada % 20 uçucu kül katkılı karışımda ise, donma-çözülme çevrimi arttıkça dayanım azalmış olup, en hızlı azalış ilk 2 çevrimde gerçekleşmiştir. Donma-çözülme çevrimi 2 iken dayanım, aynı karışımın donma-çözülmesiz durumunun 0.77 katı iken, donma-çözülme çevriminin 8 olması ile 0.59 katına düşmüştür. Eskişar vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada CH sınıfı zeminde ise yapılan analiz ile UCS değeri, 1 çevrim durumunda donma-çözülmesiz halin 0.67 katına, 5 çevrimde ise 0.33 katına düşmüştür.

Yukarıda düşük ve yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait verilen deneysel sonuçlar ve literatür ile karşılaştırılmaları Çizelge 5.3'de özetlenmiştir. Çizelgede "KAT" ifadesi ilgili karışıma ait donma-çözülmeli serbest basınç dayanımının aynı karışımın donma-çözülmesiz serbest basınç dayanımı değerine oranını temsil etmektedir.

**Çizelge 5.3** Donma-çözülmeli serbest basınç dayanımı sonuçlarının özeti.

KARIŞIM TİPİ	Tezden Elde Edilen Sonuçlar			Yayınlardan Elde Edilen Sonuçlar			
	Karışım	Çevrim	KAT	Yazar	Katkı	Çevrim	KAT
KATKISIZ	S zemin	2	0.64	Güllü ve Khudir (2014)	Zemin	1	0.95
		4	0.52			2	0.71
		6	0.44			3	0.52
		8	0.41				
	B zemin	12	0.35	Eskişar vd. (2015)	Zemin	1	0.50
		2	0.68			5	0.34
		4	0.55				
		6	0.44				
UÇUCU KÜL	S30FA	8	0.44	Altun vd. (2009)	CaO:18.67 % 10 FA % 30 FA	7	0.88
		2	0.69				0.93
		4	0.58				
		6	0.52				
	B30FA	8	0.44	Dayıoğlu vd. (2017)	CaO:14.30 % 20 FA	2	0.75
		2	0.66			4	0.72
		4	0.57			8	0.59
		6	0.49				
KİREÇ	S5L	8	0.86	Dayıoğlu vd. (2017)	% 8 L	2	1.33
		2	1.31			4	1.39
		4	1.28			8	1.03
		6	1.09				
	B5L	12	0.48				
		2	1.28				
		4	1.35				
		6	1.15				
UÇUCU KÜL + KİREÇ	S30FA5L	8	0.79				
		2	1.37				
		4	1.27				
		6	1.03				
	B30FA5L	12	0.53				
		2	1.11				
		4	1.13				
		6	1.06				
	8	0.87					
	12	0.55					

## 5.4 DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait dolaylı çekme deneylerinden Çizelge 5.4'de literatür ile karşılaştırılması verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinden önce, yazıda belirtilen ifadelerin daha anlaşılabilir hale gelmesi açısından Çizelge 5.4'de detaylı açıklaması verilen bazı kodlamalar yapılmıştır.

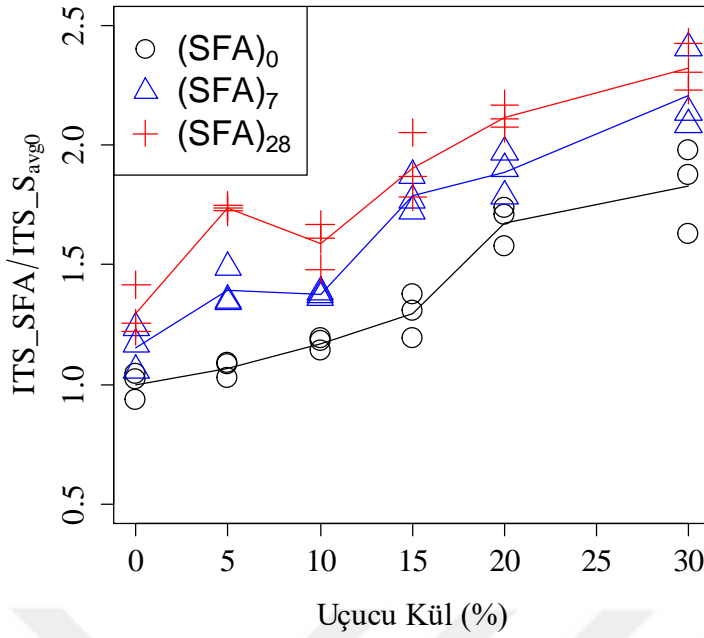
**Çizelge 5.4** ITS deney sonuçlarında kullanılan kodların açıklamaları.

ITS_S <sub>avg0</sub>	0 gün kür süreli S zeminin ortalama dolaylı çekme dayanımı (ITS)
ITS_B <sub>avg0</sub>	0 gün kür süreli B zeminin ortalama dolaylı çekme dayanımı (ITS)
ITS_SFA/ITS_S <sub>avg0</sub>	Uçucu kül katkılı ve katkısız S zemine ait tüm kür sürelerinde bulunan ITS değerinin, ITS_S <sub>avg0</sub> değerine oranı
ITS_SL/ITS_S <sub>avg0</sub>	Kireç katkılı ve katkısız S zemine ait tüm kür sürelerinde bulunan ITS değerinin, ITS_S <sub>avg0</sub> değerine oranı
ITS_B30FA_L/ITS_B <sub>avg0</sub>	% 30 Uçucu kül ile kireç katkılı ve katkısız B zemine ait tüm kür sürelerinde bulunan ITS değerinin, ITS_B <sub>avg0</sub> değerine oranı

Bundan sonraki alt bölümlerde bu kodlama mantığına göre değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir.

### 5.4.1 S Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması

S zemin ve karışımlarına ait dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları bu alt bölümde irdelenmiştir. Yapılan dolaylı çekme deneyi sonucunda uçucu külün katkısız S zeminin dolaylı çekme dayanımını (ITS) nasıl değiştirdiği Şekil 5.9'da görülmektedir. S zeminin dolaylı çekme dayanımı 31.24 kPa olup, 7 gün kür süresinde 1.15 ve 28 gün kür süresinde 1.30 katına çıkmıştır.

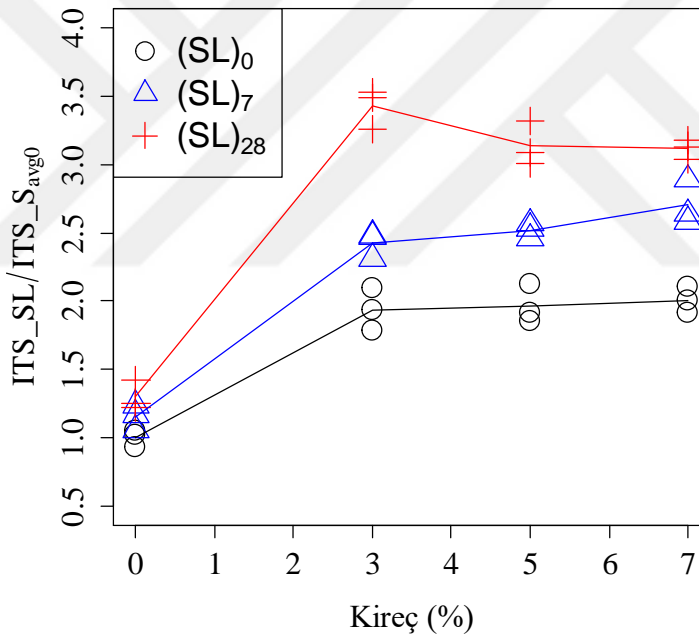


**Şekil 5.9** Uçucu külün S zeminin dolaylı çekme dayanımına etkisi.

Uçucu kül katkısı arttıkça 0 gün kür süresinde dolaylı çekme dayanımı zeminin 1.06 ile 1.83 katı arasında değişmiştir. Katkı oranı % 15 olana kadar artış hızı daha yavaş olup S15FA karışımındaki dayanım zeminin 1.29 katıdır. Uçucu kül miktarı kütlece % 20 ve % 30'a çıktığında dayanımda önemli bir artış olmuştur. İlgili katkı oranlarındaki dayanım zeminin sırasıyla 1.67 ve 1.83 katıdır. Kür süresinin 7 güne çıkması ile dolaylı çekme dayanımı değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu kür süresi için en düşük değer S10FA karışımında zeminin 1.37 katı olmuştur. Katkı oranının % 15'e ulaşması ile dolaylı çekme dayanımı zeminin 1.79 katına çıkmıştır. 7 gün kür süresi için en yüksek değer ise S30FA karışımında elde edilmiştir. Bu karışımın dolaylı çekme dayanımı zeminin 2.21 katı olmuştur. 28 gün kürlü numuneler, % 5 katkılı durumda katkısız duruma göre daha yüksek dayanıma sahipken, katkı oranının % 10'a çıkması ile bir miktar azalış olmuştur (% 5 katkılı karışımın dolaylı çekmesi katkısız zeminin 1.74 katı iken % 10 katkıda 1.59 kat) ancak % 10 katkı oranından sonra yeniden bir yükseliş gözlenmiştir. S20FA karışımının dolaylı çekme dayanımı 28 gün kürde zeminin 2.12 katına ulaşmıştır. En yüksek dayanım artışının % 30 uçucu kül katkısında olduğu anlaşılmaktadır. Buna göre S30FA kodlu karışım için 0 günlük kür süresinde dolaylı çekme dayanımı katkısız zeminin 1.83 katı iken 7 günlük kür süresinde 2.21 ve 28 günlük kür süresinde 2.32 katına çıkmıştır. Koliyas vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada zemine eklenen % 5 oranında uçucu kül, killi zeminin dolaylı çekme dayanımını yaklaşık 4 katına çıkarmıştır, artan uçucu kül oranı ile dayanım artışı devam etmiş ve % 20 uçucu kül katkılı karışımında kontrol zemininin 10 katına kadar yükselmiştir. Burada kullanılan uçucu küldeki bulunan CaO miktarının yüksek olması (%)

48.97) etkili olmuştur. Bu tez çalışmasında kullanılan CaO miktarı çok daha düşük (% 2.49) değerdedir. Aynı çalışmada aynı zemin sınıfına ait bir diğer karışım olan % 10 uçucu kül katkılı karışımda ise kür süresi 7 gün iken 10 kPa olan dayanım kür süresinin 28 güne çıkması ile 6 katına çıkarak 60 kPa olmuştur. Bu zeminde kullanılan uçucu külde de yine benzer şekilde yüksek CaO miktarı (% 44.77) dayanımın bu kadar yükselmesine katkı sağlamıştır.

Kireç katkısının katkısız S zeminin dolaylı çekme dayanımını nasıl değiştirdiği Şekil 5.10'da görülmektedir. Burada " $ITS_{SL}/ITS_{S_{avg0}}$ " olarak gösterilen ifade kireç katkılı ve katkısız S zemin ve karışımlarının 0, 7 ve 28 gün kürlü dolaylı çekme dayanım değerlerinin, S zeminin 0 gün kürlü dolaylı çekme dayanımına oranını temsil etmektedir. 28 gün kürlü numuneler, % 3 katkılı durumda katkısız duruma göre daha yüksek dayanıma sahipken 0 ve 7 gün kür sürelerinde en yüksek dayanım % 7 kireç katkısında gözlenmiştir.

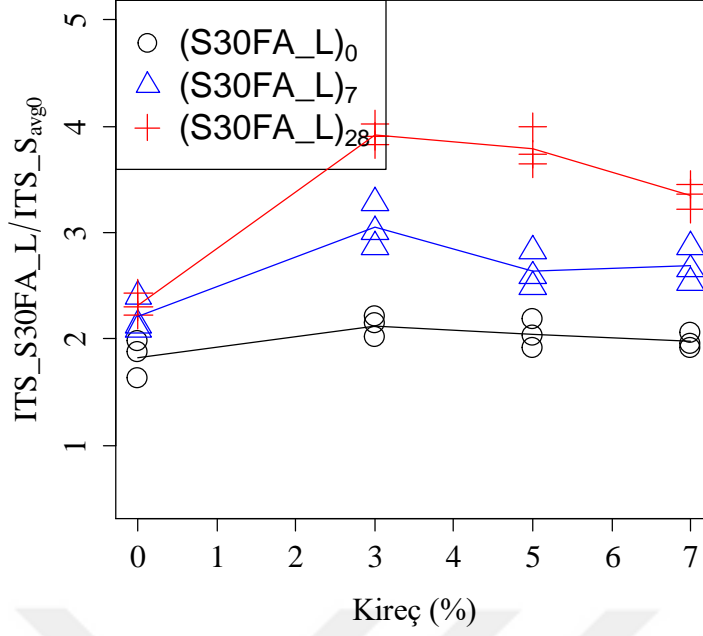


**Şekil 5.10** Kirecin S zeminin dolaylı çekme dayanımına etkisi

Tüm kür süreleri için en belirgin özelliklerden birisi de % 3'ten daha fazla eklenen kireç katkısının dayanımı çok değiştirmediyi gözlenmesidir. Buna göre % 3 kireç katkılı karışımın 0 günlük dolaylı çekme dayanımı katkısız zeminin 1.94 katı iken % 5 katkıda 1.97 ve % 7 katkıda 2.01 katı olmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile aynı oranlar % 3 katkı için 2.31, % 5 katkı için 2.46 ve % 7 katkı için 2.64 kate yükselmiştir. En yüksek dayanım ise % 3 kireç katkılı karışımın 28 günlük kür süresinde katkısız zemine göre 3.42 kat olup, % 5 katkıda 3.14 ve % 7 katkıda 3.12 kat olarak gerçekleşmiştir. McCarthy vd. (2014) tarafından yapılan

çalışmada zeminde yapılan dolaylı çekme deneyi sonuçlarına göre zemine eklenen % 3 kireç, zeminin dolaylı çekme dayanımını (ITS) 7 gün kür süresinde 1.80 katına çıkarmıştır. Kür süresinin 28 güne çıkması ile dayanım zeminin 3.00 katına yükselmiştir.

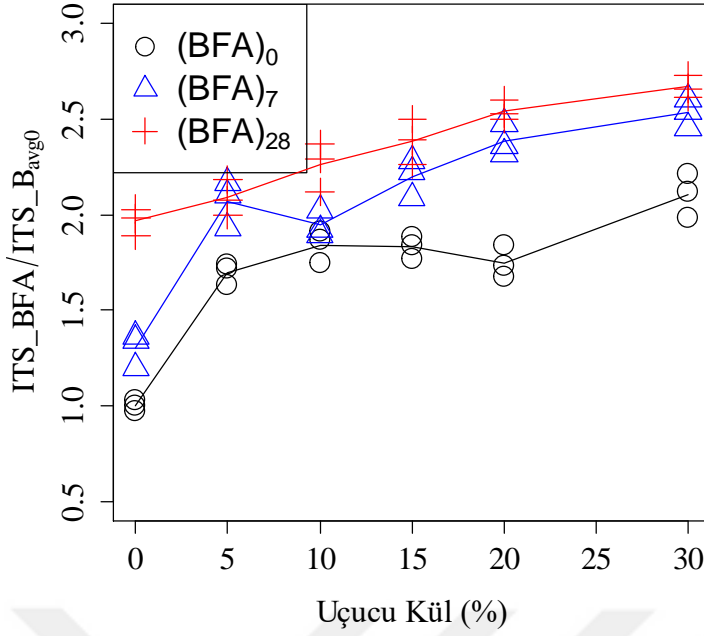
Şekil 5.11'de % 30 uçucu kül sabit olmak üzere eklenen farklı (% 3, % 5 ve % 7) kireç oranlarında düşük plastisiteli killi zeminin dolaylı çekme dayanımının nasıl değiştiği gösterilmektedir. Burada elde edilen dikkat çekici sonuçlardan birisi kireçsiz % 30 uçucu kül katkılı karışımlara ait dolaylı çekme dayanımı değerlerinin 0 gün kür süresinde de % 30 uçucu kül + kireç içeren diğer karışımlar ile neredeyse aynı olmasıdır. Kür süresinin 7 ve 28 gün olduğu durumda ise özellikle çimentolaşma reaksiyonlarının da etkisinin daha güçlü görülmesi ile birlikte kireç içeren katkıların dayanım değerleri, sadece % 30 uçucu kül içeren karışımdan ayrılarak belirgin bir şekilde yükselmiştir. Burada tüm kür sürelerinde en yüksek dolaylı çekme dayanımı S30FA3L kodlu karışımda oluşmuştur. Sıfır gün kür süresinde S30FA3L karışımının dolaylı çekme dayanımı katkısız zeminin 2.13 katı iken, daha fazla eklenen kireç dayanımı çok yükseltmemiş olup % 5 katkıda 2.05 katına ve % 7 katkıda 1.97 katına düşmüştür. Kür süresinin 7 güne çıkması ile S30FA3L karışımının dolaylı çekme dayanımı katkısız zeminin 3.06 katı, % 5 katkıda 2.64 katı ve % 7 katkıda 2.69 katı olmuştur. 28 gün kür süresinde ise aynı oranlar S30FA3L için 3.91 katına, S30FA5L için 3.79 katına ve S30FA7L için 3.35 katına yükselmiştir. Bu değerler, Şekil 5.9'daki S zeminin % 30 uçucu kül katkısındaki sonuçlar ile karşılaştırıldığında, 28 gün kür süresinde elde edilen 2.32 kat değerine göre oldukça yüksek olup (% 30 küle kireç eklenince minimum 3.35 katına çıkması) kirecin dayanımı artırıcı özelliğini göstermektedir. Ayrıca Şekil 5.10'da kireç ile ilgili olarak en yüksek dolaylı çekme dayanımı değeri katkısız zeminin 3.42 katı iken, % 30 uçucu kül eklenen kireç katkılı karışımlarda en yüksek dayanım katkısız zeminin 3.91 katıdır. Kirece eklenen uçucu külün dayanımı çok yükseltmese de olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır. McCarthy vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada kirecin üzerine ilave edilen % 6 uçucu kül dayanımı 7 gün kür süresinde zeminin 2.20 katına çıkartmış ve en yüksek dayanım % 3 kireç ve % 24 uçucu kül içeren karışımda olup, ITS değeri ilgili karışımda zeminin 3.00 katı olmuştur. Kür süresinin 28 güne çıkması ile kirece eklenen % 6 uçucu kül aynı kür süresinde dayanımın 3.80 katına çıkmasını sağlamıştır. En yüksek dayanım yine % 24 uçucu kül ve % 3 kireç içeren karışımda bulunmuş ve ilgili karışımın ITS değeri zeminin 4.60 katı olmuştur. İlgili literatür ile tez çalışmasından elde edilen sonuçların bu kapsamda birbirine yakın olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.11 % 30 Uçucu kül ve kirecin S zeminin dolaylı çekme dayanımına etkisi.

#### 5.4.2 B Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması

Yapılan dolaylı çekme deneyi sonucunda uçucu külün katkısız B zeminin dolaylı çekme dayanımını nasıl değiştirdiği Şekil 5.12'de görülmektedir. B zeminin dolaylı çekme dayanımı 24.16 kPa olup, 7 gün kür süresinde 1.30 ve 28 gün kür süresinde 1.97 katına çıkmıştır. Sıfır gün kürlü numunelerde % 5 katkı ile % 20 katkıya kadar (% 20 katkı dahil) dolaylı çekme dayanımında önemli bir değişim olmaz iken (1.70 ile 1.84 kat arası), % 30 katkıda belirgin bir şekilde yükselerek zeminin 2.11 katına çıkmıştır. 7 gün kürlü numuneler, % 5 katkılı durumda katkısız duruma göre daha yüksek dayanıma sahipken, katkı oranının % 10'a çıkması ile bir miktar azalış olmuştur, ancak % 10 katkı oranından sonra yeniden bir yükseliş gözlenmiştir.

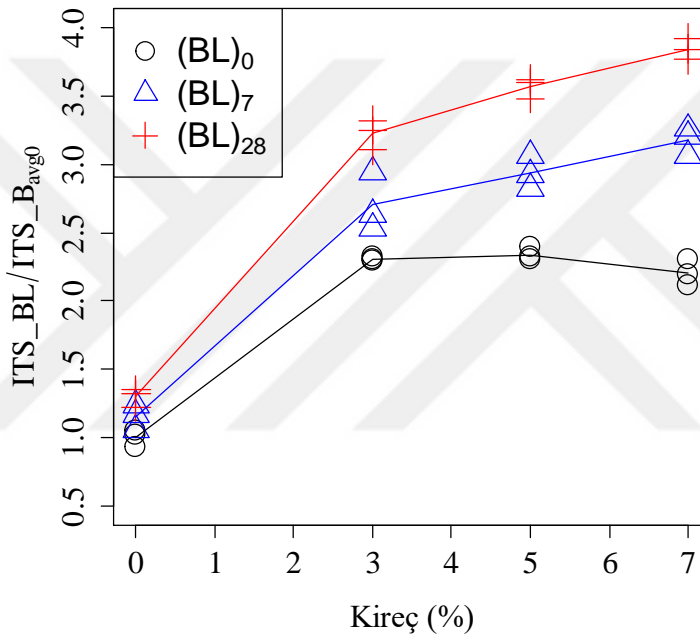


**Şekil 5.12** Uçucu külün B zeminin dolaylı çekme dayanımına etkisi.

Kür süresinin 7 güne çıkması ile % 5 uçucu kül katkısında dahi dayanım zeminin 2.07 katına kadar yükselmiştir. Katkının % 10 olduğu durumda bir miktar düşüş olup dayanım zeminin 1.94 katına gerilese dahi %15 katkı ve sonrasında tekrar bir artış olmuştur. B15FA karışımının dolaylı çekme dayanım değeri zeminin 2.20 katı iken, B20FA karışımında 2.38 katına yükselmiştir. Kür süresinin 28 güne çıktığı durumda ise katkı oranı arttıkça dolaylı çekme dayanımı değerlerinde yükselme gözlenmiştir. İlgili kür süresi için en düşük dayanım B5FA karışımında zeminin 2.09 katı iken, % 15 katkılı karışımında 2.38 katına yükselmiştir. En yüksek dayanım artışının tüm kür süreleri için % 30 uçucu kül katkısında olduğu anlaşılmaktadır. Buna göre B30FA kodlu karışım için 0 günlük kür süresinde dolaylı çekme dayanımı katkısız zeminin 2.11 katı iken 7 günlük kür süresinde 2.53 ve 28 günlük kür süresinde 2.67 katına çıkmıştır. Koliyas vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada zemine eklenen % 5 oranında uçucu kül, killi zeminin dolaylı çekme dayanımını yaklaşık 2.5 katına çıkarmıştır, artan uçucu kül oranı ile dayanım artışı devam etmiş ve % 20 uçucu kül katkılı karışımında kontrol zemininin 9 katına kadar yükselmiştir. Burada kullanılan uçucu külde bulunan CaO miktarının yüksek olması (% 48.97) etkili olmuştur. Bu tez çalışmasında kullanılan CaO miktarı daha düşük (% 2.49) değerdedir.

Kireç katkısının katkısız B zeminin dolaylı çekme dayanımını nasıl değiştirdiği Şekil 5.13'de görülmektedir. 0 gün kürlü numuneler için % 5 katkılı karışımın dolaylı çekme dayanımı en yüksek iken, 7 ve 28 gün kür sürelerinde en yüksek dayanım % 7 kireç katkısında gözlenmiştir.

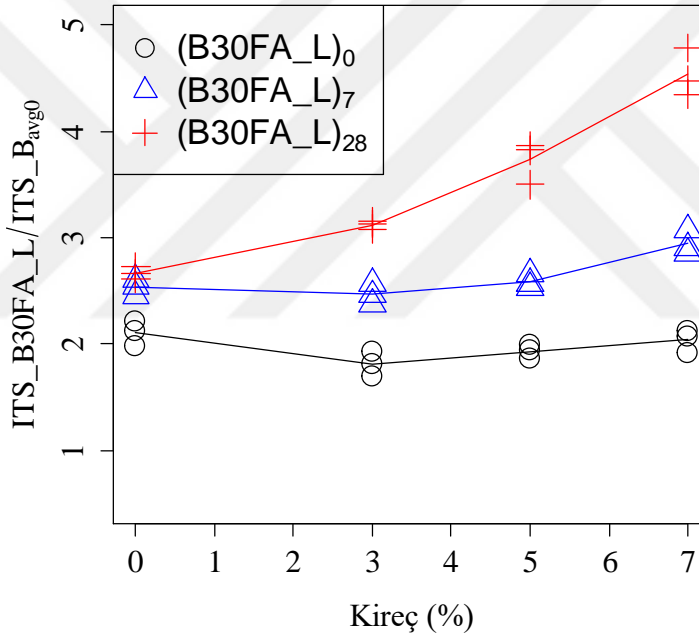
Tüm kür süreleri için en belirgin özelliklerden birisi % 3 oranında eklenen kirecin, killi zeminin dayanımını hızlı bir şekilde artırması olmuştur. Daha fazla eklenen kireç, dolaylı çekme dayanımını artırmaya devam etse de 7 ve 28 gün kür süresinde artış hızında yavaşlama, 0 gün kürde ise dayanımda sabitlenme gözlenmiştir. Bu durumlara göre % 3 kireç katkılı karışımın 0 günlük dolaylı çekme dayanımı katkısız zeminin 2.31 katı iken % 5 katkıda 2.34 ve % 7 katkıda 2.21 katı olmuştur. Kür süresinin 7 güne çıkması ile aynı oranlar % 3 katkı için 2.70, % 5 katkı için 2.94 ve % 7 katkı için 3.18 kata yükselmiştir. En yüksek dayanım ise % 7 kireç katkılı karışımın 28 günlük kür süresinde katkısız zemine göre 3.85 kat olup, % 3 katkıda 3.22 ve % 5 katkıda 3.57 kat olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.13 Kirecin B zeminin dolaylı çekme dayanımına etkisi.

Şekil 5.14'de % 30 uçucu kül sabit olmak üzere eklenen farklı (% 3, % 5 ve % 7) kireç oranlarında yüksek plastisiteli killi zeminin dolaylı çekme dayanımının nasıl değiştiği gösterilmektedir. Burada elde edilen dikkat çekici sonuçlardan birisi, kireçsiz % 30 uçucu kül katkılı karışımlara ait dolaylı çekme dayanımı değerlerinin 0 ve 7 gün kür süresinde de % 30 uçucu kül + kireç içeren diğer karışımlar ile neredeyse aynı olmasıdır. Kür süresinin 28 güne yükseldiği durumda ise özellikle çimentolaşma reaksiyonlarının da etkisinin daha güçlü görülmesi ile birlikte kireç içeren katkıların dayanım değerleri, sadece % 30 uçucu kül içeren karışımdan ayrılarak belirgin bir şekilde yükselmiştir. Burada tüm kür sürelerinde en yüksek dolaylı çekme dayanımı B30FA7L kodlu karışımda oluşmuştur. Sıfır gün kür süresinde B30FA3L karışımının dolaylı çekme dayanımı katkısız zeminin 1.81 katı iken, % 5 katkıda

1.93 katına ve % 7 katkıda 2.04 katına yükselmiştir. Kür süresinin 7 güne çıkması ile B30FA3L karışımının dolaylı çekme dayanımı katkısız zeminin 2.47 katı, % 5 katkıda 2.59 katı ve % 7 katkıda 2.94 katı olmuştur. 28 gün kür süresinde ise aynı oranlar B30FA3L için 3.12 katına, B30FA5L için 3.73 katına ve B30FA7L için 4.54 katına yükselmiştir. Bu değerler Şekil 5.12'deki B zeminin % 30 uçucu kül katkısındaki sonuçlar ile karşılaştırıldığında, 28 gün kür süresinde elde edilen 2.67 kat değerine göre daha yüksek olup (% 30 küle kireç eklenince minimum 3.12 maksimum 4.54 katına çıkması) kirecin dayanımı artırıcı özelliğini göstermektedir. Ayrıca Şekil 5.13'de kireçli karışımlarda en yüksek dolaylı çekme dayanımı değeri katkısız zeminin 3.85 katı iken, % 30 uçucu kül eklenen kireç katkılı karışımlarda en yüksek dayanım katkısız zeminin 4.54 katıdır. Kirece eklenen uçucu külün dayanımı çok yükseltmese de olumlu yönde etkidiği anlaşılmaktadır.



**Şekil 5.14** % 30 Uçucu kül ve kirecin B zeminin dolaylı çekme dayanımına etkisi.

Yukarıda düşük ve yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait verilen deneysel sonuçlar ve literatür ile karşılaştırılmaları Çizelge 5.5'de özetlenmiştir. Çizelgede verilen sonuçlarda "KAT" ifadesi ilgili serbest basınç dayanımı değerinin, o zeminin kürsüz durumdaki dolaylı çekme dayanımı değerine oranını temsil etmektedir.

**Çizelge 5.5** Dolaylı çekme dayanımı sonuçlarının özeti.

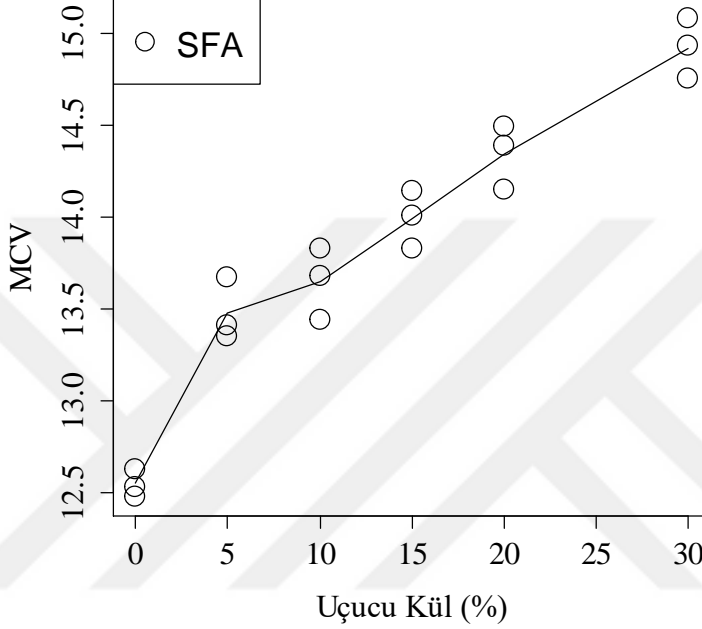
KARIŞIM TİPİ	Tezden Elde Edilen Sonuçlar Tezdeki uçucu kül CaO = % 2.49				Yayınlardan Elde Edilen Sonuçlar				
	Karışım	KAT			Yazar	CaO (%)	Katkı (%)	KAT	
		0 gün kür	7 gün kür	28 gün				7 gün kür	28 gün
UÇUCU KÜL KATKISI	S	X	1.15	1.30	Kolias vd. (2005)	48.97	5 10 20	...	4.00 6.25 10.00
	S5FA	1.06	1.40	1.74					
	S10FA	1.17	1.37	1.59					
	S15FA	1.29	1.79	1.90					
	S20FA	1.67	1.89	2.12					
	S30FA	1.83	2.21	2.32					
	B	X	1.30	1.97					
	B5FA	1.70	2.07	2.09					
	B10FA	1.84	1.94	2.26					
	B15FA	1.83	2.20	2.38					
	B20FA	1.75	2.38	2.54					
	B30FA	2.11	2.53	2.67					
KİREÇ	S3L	1.94	2.42	3.42	Mccarthy vd. (2014)	...	3	1.80	3.00
	S5L	1.97	2.52	3.14					
	S7L	2.01	2.70	3.12					
	B3L	2.31	2.70	3.22					
	B5L	2.34	2.94	3.57					
	B7L	2.21	3.18	3.85					
UÇUCU KÜL + KİREÇ	S30FA3L	2.13	3.06	3.91	Mccarthy vd. (2014)	...	6 FA + 3L 24 FA+3L	2.20 3.00	3.80 4.60
	S30FA5L	2.05	2.64	3.79					
	S30FA7L	1.97	2.69	3.35					
	B30FA3L	1.81	2.47	3.12					
	B30FA5L	1.93	2.59	3.73					
	B30FA7L	2.04	2.94	4.54					

## 5.5 NEMLİLİK ŞARTLARI BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait farklı nemlilik şartları deneyinden elde edilen deney sonuçları değerlendirilmiştir.

### 5.5.1 S Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması

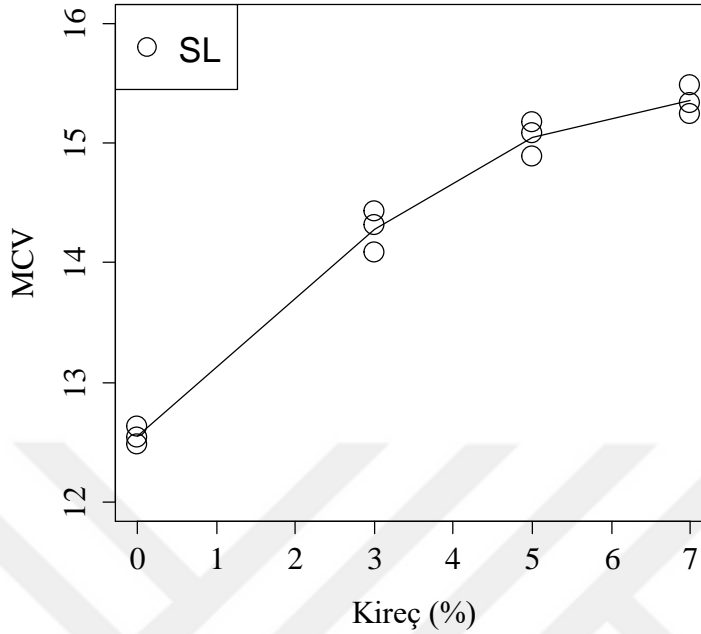
Bu alt bölümde S zemin için, kireç içermeyen uçucu kül katkılı, uçucu kül içermeyen kireç katkılı ve hem uçucu kül hem kireç katkılı zemin karışımlarına ait MCV deney sonuçları irdelenmiştir. Şekil 5.15'de düşük plastisiteli killi zemin üzerine eklenen uçucu külün, killi zeminin MCV değerini nasıl etkilediği görülmektedir.



Şekil 5.15 Uçucu külün S zeminin MCV değerine etkisi.

Uçucu kül katkı oranı arttıkça MCV değerinin yükseldiği gözlenmiştir. Katkılı karışımların MCV değerlerinin S zeminin 1.07 ile 1.19 katı arasında değiştiği gözlenmiştir. Katkısız S zeminin MCV değeri  $12.55 \pm 0.06$  olarak bulunmuştur. Zemin üzerine eklenen % 10 uçucu kül katkısı dayanımı 1.09 katına çıkarmış ve MCV değerinin  $13.65 \pm 0.16$  olmasını sağlamıştır. Katkı oranının % 20'ye çıkması ile nemlilik şartları değeri ortalama  $14.34 \pm 0.14$  olmuştur. En yüksek MCV değeri S30FA kodlu karışımda  $14.92 \pm 0.13$  olarak bulunmuş olup, bu değer katkısız zeminin yaklaşık 1.19 katıdır. Her numunede gerçekleştirilen 3 tekrar sonucunda elde edilen MCV değerleri birbirine oldukça yakındır. Buna göre her karışım için yapılan aynı numunelerde bulunan en yüksek değerler, en düşük değerlerin % 1.20'si ile % 2.90'ı arasında değişmiştir. Uçucu kül katkılı karışımlar ve S zeminler için elde edilen MCV değerlerinin yol dolgusu için genel kabul olarak belirtilen 8.50 alt limit değerinden yüksek olduğu görülmektedir.

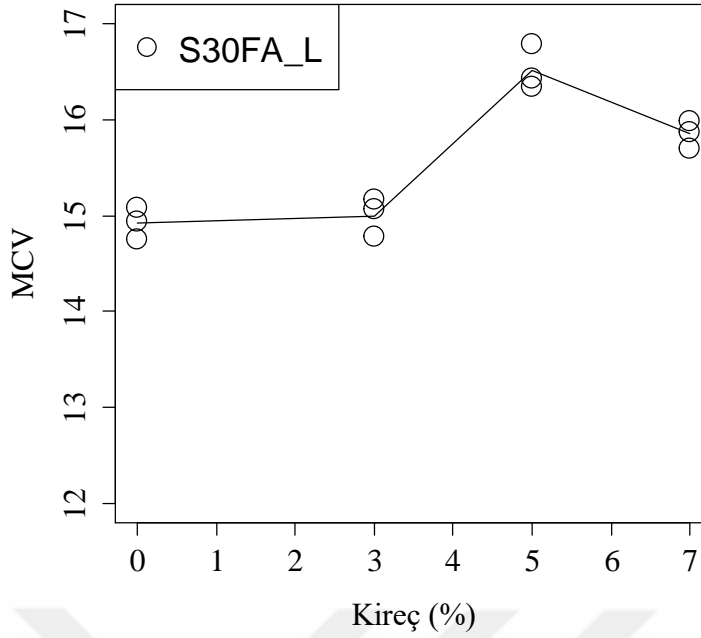
Şekil 5.16'da ise S zemin üzerinde kirecin nemlilik şartlarına etkisi görülmektedir. Kireç katkısı da uçucu kül katkısı gibi S zeminin MCV değerine olumlu etki etmiştir.



Şekil 5.16 Kirecin S zeminin MCV değerine etkisi.

Buna göre eklenen kireç katkısı ile MCV değerinin arttığı gözlenmiştir. Kireç katkısının % 3 olduğu durumda MCV değeri  $14.28 \pm 0.14$  olup zeminin 1.14 katı olmuştur. Daha sonraki kireç yüzdeleri için artış hızı yavaşlasa da MCV değerinde yükseliş devam etmiştir. En yüksek MCV değeri S7L kodlu karışımda  $15.36 \pm 0.10$  olarak bulunmuş olup, bu değer katkısız zeminin 1.22 katıdır. Her numunede gerçekleştirilen 3 tekrar sonucunda elde edilen MCV değerleri birbirine oldukça yakındır. Buna göre her karışım için yapılan aynı numunelerde bulunan en yüksek değerler, en düşük değerlerin % 1.20'si ile % 2.41'i arasında değişmiştir. Kireç katkılı karışımların MCV değerlerinin de yol alt dolgusu için belirtilen minimum 8.50 olma şartına uyduğu gözlenmiştir.

Şekil 5.17'de ise S zemin üzerinde hem uçucu kül hem de kirecin nemlilik şartlarına etkisi görülmektedir. Uçucu kül ve kireç katkısının S zemine birlikte etki ettirilmesi de benzer şekilde S zeminin MCV değerini yükseltmiştir.



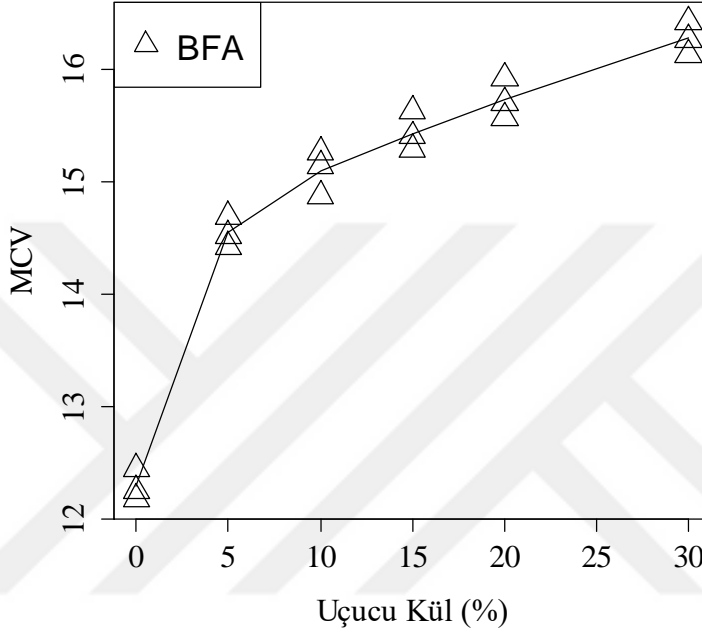
**Şekil 5.17** % 30 Uçucu kül ve kirecin S zeminin MCV değerine etkisi.

Buna göre eklenen kireç katkısı ile MCV değerinin % 5 katkıya kadar arttığı gözlenmiştir. S30FA3L karışımına ait MCV değeri  $15.00 \pm 0.16$  olarak tespit edilmiştir. Bu değer S zeminin yaklaşık 1.20 katıdır. Şekilden de görüldüğü gibi kireç içermeyen S30FA ile ekstra % 3 kireç içeren S30FA3L karışımlarının MCV değerleri birbirine oldukça yakındır. En yüksek MCV değeri S30FA5L kodlu karışımda  $16.52 \pm 0.12$  olarak bulunmuş olup bu değer katkısız zeminin 1.32 katıdır. S30FA7L karışımında her ne kadar bir miktar MCV değerinde düşme olsa da  $15.85 \pm 0.12$  olarak hesaplanan değer zeminin 1.26 katıdır. Her numunede gerçekleştirilen 3 tekrar sonucunda elde edilen MCV değerleri birbirine oldukça yakındır. Buna göre her karışım için yapılan aynı numunelerde bulunan en yüksek değerler, en düşük değerlerin % 1.20'si ile % 2.64'ü arasında değişmiştir. Ayrıca hem uçucu kül hem kireç katkılı karışımlarda da yol alt dolgusu için kabul edilen 8.50 minimum sınırına göre oldukça iyi bir MCV performansı gözlenmiştir.

MCV sonuçları Şekil 5.15, 5.16 ve 5.17'deki tüm karışımlar için birlikte değerlendirildiğinde tekrarlar arasındaki fark maksimum % 2.64 olarak tespit edilmiştir. Tüm karışımlar içerisinde en yüksek MCV değeri S30FA5L kodlu karışımda gözlenmiştir. En düşük değer S5FA kodlu karışımda 13.48 olarak bulunmuştur ve bu değer katkısız zeminin 1.07 katıdır. Dolayısı ile en düşük ve en yüksek MCV değerleri, katkısız zeminin 1.07 ve 1.32 katı arasındadır. Deney ile ilgili olarak S3L karışımı hariç kireç içeren diğer karışımlarda (S5L, S7L, S30FA3L, S30FA5L ve S30FA7L) MCV değerinin tespit edilmesi için 256 vuruşa ihtiyaç duyulmuştur.

### 5.5.2 B Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması

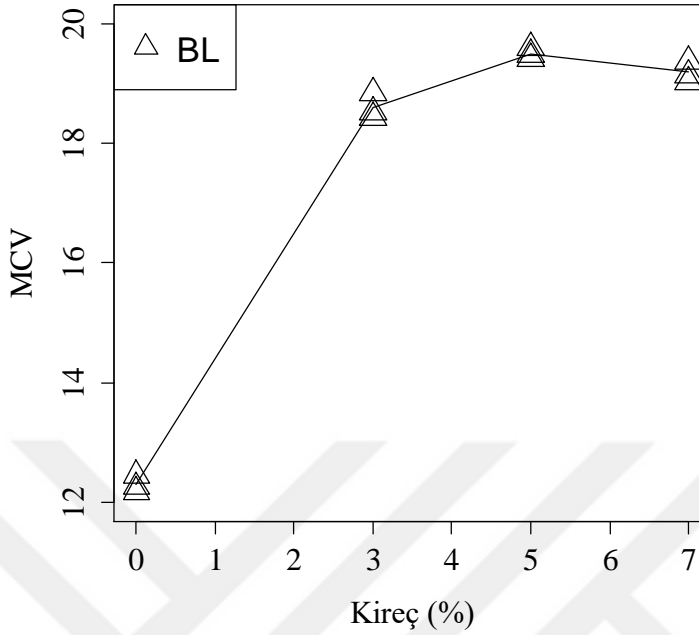
Bu alt bölümde B zemin için, kireç içermeyen uçucu kül katkılı, kireç içermeyen uçucu kül katkılı ve hem uçucu kül hem kireç katkılı zemin karışımlarına ait MCV deney sonuçları irdelenmiştir. Şekil 5.18'de yüksek plastisiteli killi zemin üzerine eklenen uçucu külün, killi zeminin MCV değerini nasıl etkilediği görülmektedir.



Şekil 5.18 Uçucu külün B zeminin MCV değerine etkisi.

Uçucu kül katkı oranı arttıkça MCV değerinin yükseldiği gözlenmiştir. Katkılı karışımların MCV değerlerinin B zeminin 1.18 ile 1.32 katı arasında değiştiği gözlenmiştir. Katkısız B zeminin MCV değeri  $12.29 \pm 0.11$  olarak bulunmuştur. Zemin üzerine eklenen % 10 uçucu kül katkısı dayanımı 1.09 katına çıkarmış ve MCV değerinin  $15.09 \pm 0.16$  olmasını sağlamıştır. Katkı oranının % 20'ye çıkması ile nemlilik şartları değeri ortalama  $15.73 \pm 0.15$  olmuştur. En yüksek MCV değeri B30FA kodlu karışımda  $16.27 \pm 0.12$  olarak bulunmuş olup, bu değer katkısız zeminin yaklaşık 1.32 katı olmuştur. Her numunede gerçekleştirilen 3 tekrar sonucunda elde edilen MCV değerleri birbirine oldukça yakındır. Buna göre her karışım için yapılan aynı numunelerde bulunan en yüksek değerler, en düşük değerlerin % 1.80'i ile % 2.62'si arasında değişmiştir. Uçucu kül katkılı karışımlar ve B zeminler için elde edilen MCV değerlerinin yol dolgusu için genel kabul olarak belirtilen 8.50 alt limit değerinden yüksek olduğu görülmektedir.

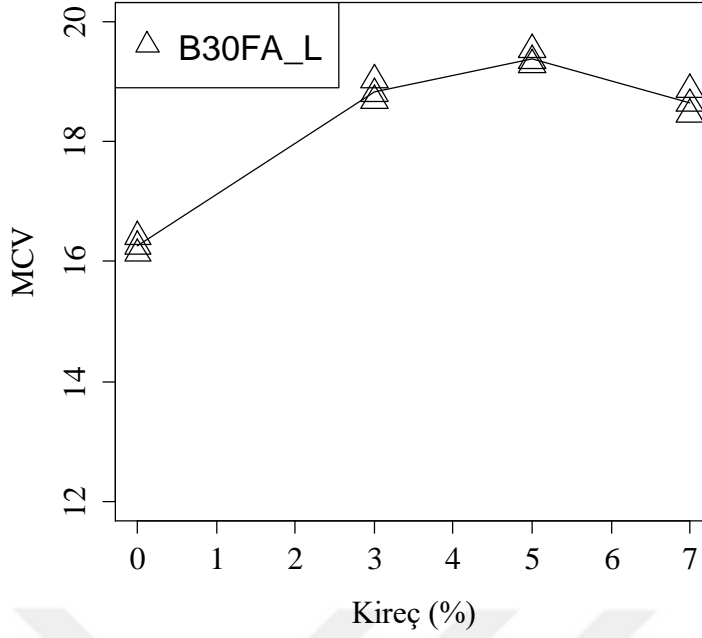
Şekil 5.19'da ise B zemin üzerinde kirecin nemlilik şartlarına etkisi görülmektedir. Kireç katkısı da uçucu kül katkısı gibi B zeminin MCV değerine olumlu etki etmiştir.



Şekil 5.19 Kirecin B zeminin MCV değerine etkisi.

Buna göre eklenen kireç katkısı ile MCV değerinin arttığı gözlenmiştir, ancak % 3 katkıdan sonra belirgin bir değişim olmadığı ve değerlerin neredeyse sabit gittiği anlaşılmaktadır. Kireç katkısının % 3 olduğu durumda MCV değeri  $18.60 \pm 0.18$  olup, zeminin 1.51 katıdır. Katkının % 5'e yükselmesi ile nemlilik şartları değerinin maksimuma ulaşarak  $19.51 \pm 0.07$  olduğu ve zeminin 1.59 katına yükseldiği gözlenmiştir. B7L karışımında ise ilgili dayanım B5L'ye göre neredeyse hiç değişmemiş olup,  $19.19 \pm 0.14$  olarak tespit edilmiştir. Her numunede gerçekleştirilen 3 tekrar sonucunda elde edilen MCV değerleri birbirine oldukça yakındır. Buna göre her karışım için yapılan aynı numunelerde bulunan en yüksek değerler, en düşük değerlerin % 1.79'u ile % 2.22'si arasında değişmiştir. Kireç katkılı karışımların MCV değerlerinin de yol alt dolgusu için belirtilen minimum 8.50 olma şartına uyduğu gözlenmiştir.

Şekil 5.20'de ise B zemin üzerinde hem uçucu kül hem de kirecin nemlilik şartlarına etkisi görülmektedir. Uçucu kül ve kireç katkısının B zemine birlikte etki ettirilmesi de benzer şekilde B zeminin MCV değerini yükseltmiştir.



**Şekil 5.20** % 30 Uçucu kül ve kirecin B zeminin MCV değerine etkisi.

Buna göre eklenen kireç katkısı ile MCV değerinin % 5 katkıya kadar arttığı gözlenmiştir. Şekilden de açıkça görüleceği gibi % 30 uçucu kül üzerine eklenen % 3 kireç katkısı zeminin dayanımını önemli oranda artırırken daha fazla eklenen kireç MCV değerinde ciddi bir değişime yol açmamıştır. B30FA3L karışımına ait MCV değeri  $18.84 \pm 0.15$  olarak tespit edilmiştir. Bu değer B zeminin yaklaşık 1.53 katıdır. B zeminde, S zeminden farklı olarak % 30 uçucu kül üzerine eklenen % 3 kireç MCV değerinin bir miktar yükselmesine yol açmıştır. En yüksek MCV değeri B30FA5L kodlu karışımda  $19.39 \pm 0.11$  olarak bulunmuş olup, bu değer katkısız zeminin 1.58 katıdır. B30FA7L karışımında her ne kadar bir miktar MCV değerinde düşme olsa da  $18.65 \pm 0.17$  olarak hesaplanan değer zeminin 1.52 katıdır. Her numunede gerçekleştirilen 3 tekrar sonucunda elde edilen MCV değerleri birbirine oldukça yakındır. Buna göre her karışım için yapılan aynı numunelerde bulunan en yüksek değerler, en düşük değerlerin % 1.30'u ile % 2.28'i arasında değişmiştir. Ayrıca hem uçucu kül hem kireç katkılı karışımlarda da yol alt dolgusu için kabul edilen 8.50 minimum sınırına göre oldukça iyi bir MCV performansı gözlenmiştir.

MCV sonuçları Şekil 5.18, 5.19 ve 5.20'deki tüm karışımlar için birlikte değerlendirildiğinde tekrarlar arasındaki fark maksimum % 2.63 olarak tespit edilmiştir. Tüm karışımlar içerisinde en yüksek MCV değeri B5L kodlu karışımda gözlenmiştir. En düşük değer B5FA kodlu karışımda 14.54 olarak bulunmuştur ve bu değer katkısız zeminin 1.18 katıdır. Dolayısı ile en düşük ve en yüksek MCV değerleri, katkısız zeminin 1.18 ve 1.59 katı arasındadır. Deney ile

ilgili olarak tüm karışımlarda MCV değerinin tespit edilmesi için 256 vuruşa ihtiyaç duyulmuştur. Bu durum irdelendiğinde daha fazla vuruş yapılması zorunluluğu ilgili karışıma ait MCV değerinin yüksek olduğuna işaret etmektedir. Dolayısı ile uçucu kül ve kireç katkılarının B zeminin MCV değerini, S zeminine göre daha yüksek oranda artırdığı tespit edilmiştir.

Yukarıda düşük ve yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait verilen deneysel sonuçlar Çizelge 5.6'da özetlenmiştir.

**Çizelge 5.6** Nemlilik şartları sonuçlarının özeti.

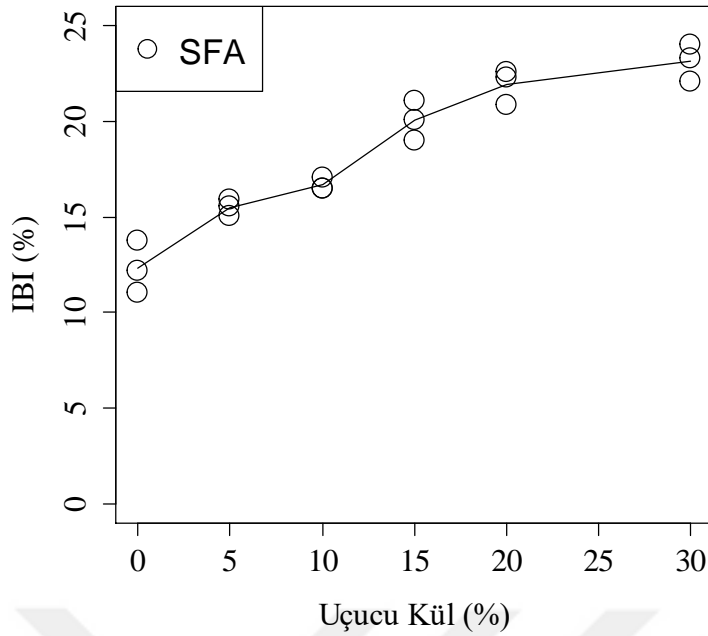
KARIŞIM	MCV	KARIŞIM	MCV
S	12.55	B	12.29
S5FA	13.48	B5FA	14.54
S10FA	13.65	B10FA	15.09
S15FA	13.99	B15FA	15.42
S20FA	14.34	B20FA	15.73
S30FA	14.92	B30FA	16.27
S3L	14.28	B3L	18.60
S5L	15.05	B5L	19.51
S7L	15.36	B7L	19.19
S30FA3L	15.00	B30FA3L	18.84
S30FA5L	16.52	B30FA5L	19.39

## 5.6 ANİ TAŞIMA İNDEKSİ BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli kil zeminler ve karışımlarına ait ani taşıma indeksi deneyinden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

### 5.6.1 S Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması

Bu alt bölümde kireç içermeyen uçucu kül katkılı, uçucu kül içermeyen kireç katkılı, hem kireç hem de uçucu kül katkılı karışımlara ait deney sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 5.21'de uçucu külün düşük plastisiteli killi zeminin ani taşıma indeksini nasıl etkilediği görülmektedir.

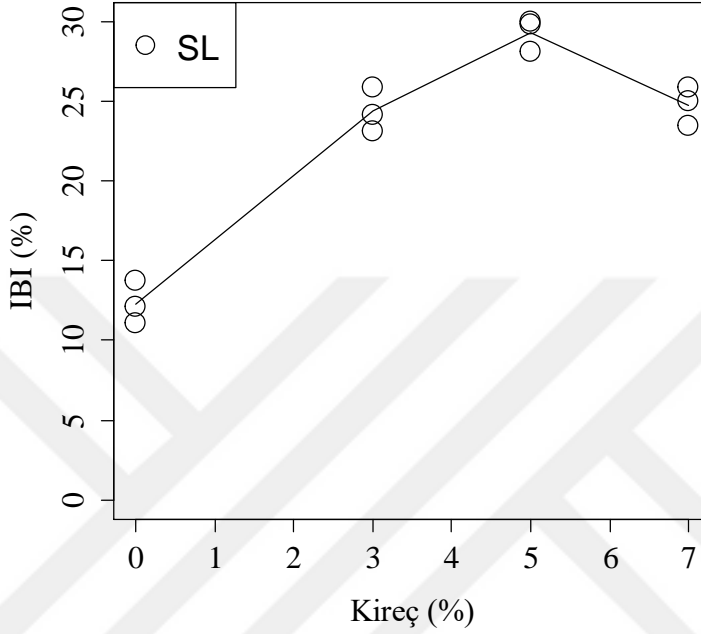


**Şekil 5.21** Uçucu külün S zeminin ani taşıma indeksine etkisi.

Zemine eklenen uçucu kül katkısı ile IBI değerlerinde artış gözlenmiştir. % 20 katkıdan sonra ani taşıma indeksindeki artış hızı yavaşlamıştır. S zemine yapılan ani taşıma indeksi deneyi sonrasında ilgili zemine ait IBI değeri %  $12.31 \pm 1.11$  olarak bulunmuştur. Zemine eklenen uçucu külün artması ile ani taşıma indeksi değerlerinde artış gözlenmiştir. Buna göre S5FA kodlu karışımda IBI değeri %  $15.47 \pm 0.35$  olup, katkısız S zeminin 1.26 katıdır. Katkı oranının % 15'e çıkması ile IBI değeri %  $20.04 \pm 0.83$  değerine yükselmiş olup, bu değer katkısız S zeminin 1.63 katıdır. En yüksek artış % 30 katkılı karışımda gerçekleşmiştir. Bu karışımın ani taşıma indeksi değeri %  $23.13 \pm 0.78$  olarak elde edilmiş olup, ilgili değer katkısız S zeminin 1.88 katıdır.

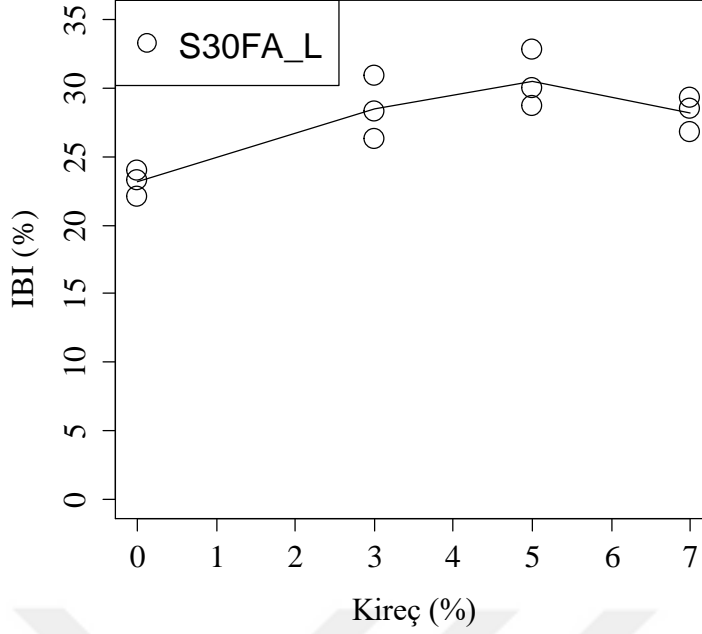
Şekil 5.22'de kirecin düşük plastisiteli killi zeminin ani taşıma indeksini nasıl etkilediği görülmektedir. Buna göre artan kireç oranları ile ani taşıma indeksi değerlerinde % 5 katkıya kadar artış, daha sonra ise azalış gözlenmiştir. S3L kodlu karışımın IBI değeri %  $24.39 \pm 1.14$  olarak hesaplanmıştır. Bu değer katkısız zeminin 1.98 katıdır. Katkı oranının % 5'e çıkması ile ani taşıma indeksi katkısız zeminin 2.38 katına çıkarak en yüksek değerine (%  $29.34 \pm 0.86$ ) ulaşmıştır. S7L kodlu karışımda ise IBI değeri % 5 kireç katkılı karışıma göre bir miktar düşerek %  $24.79 \pm 1.00$  değerine gerilemiş olup, ilgili değer katkısız zeminin 2.01 katıdır. Ani taşıma indeksi deneyinde kirece bağlı dayanım artış miktarı ile uçucu külün % 30 katkılı olan karışımındaki artış miktarının birbirine yakın olmasının, ani taşıma indeksi değerinde deneyin kür süresi beklenmeden yapılmasıdır. Bu durum da kil ile kireç arasındaki reaksiyonların

yeterince gerçekleşmesine olanak sağlamadığı için aradaki fark bu şekilde az olmuştur. Yine de % 5 kireç katkısının ani taşıma indeksi performansı % 30 uçucu küle göre daha güçlüdür. Mccarthy vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada eklenen kireç katkısı % 3 iken IBI değeri yaklaşık 16 bulunmuştur. İlgili literatürden bulunan sonuçlar tez çalışmasındakinden biraz düşük olsa da çok uzak olmamıştır.



Şekil 5.22 Kirecin S zeminin ani taşıma indeksine etkisi.

Şekil 5.23'de % 30 uçucu kül katkısı sabit olacak şekilde farklı oranlarda eklenen kirecin düşük plastisiteli killi zeminin ani taşıma indeksini nasıl etkilediği görülmektedir. Bu şekilde % 30 uçucu kül katkısı sabitken eklenen % 3 kireç katkısı ani taşıma indeksi (IBI) değerinin bir miktar yükselmesine yol açmıştır. Buna göre artan kireç oranları ile ani taşıma indeksi değerlerinde % 5 katkıya kadar artış, daha sonra ise azalış gözlenmiştir. En yüksek artış S30FA5L kodlu karışımda gerçekleşmiş olup, karışımın ani taşıma indeksi değeri  $30.49 \pm 1.72$ 'dir. Bu değer katkısız zeminin 2.48 katıdır. Ani taşıma indeksi değeri % 3 kireç katkılı S3L karışımında  $28.48 \pm 1.91$  iken % 7 kireç katkılı S7L karışımında  $28.19 \pm 1.08$  olarak elde edilmiştir. S3L kodlu karışımın IBI değeri katkısız zeminin 2.31 katı iken, % 7 katkılı karışımın IBI değeri S zeminin 2.29 katıdır. Mccarthy vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada % 3 kireç katkısı sabit iken üzerine eklenen % 6, % 12, % 18 ve % 24 uçucu kül katkılarında IBI değerleri 29 ile 31 arasında bulunmuştur. Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ile konu ile ilgili literatürün (Mccarthy vd. 2014) sonuçlarının oldukça yakın olduğu gözlenmiştir.

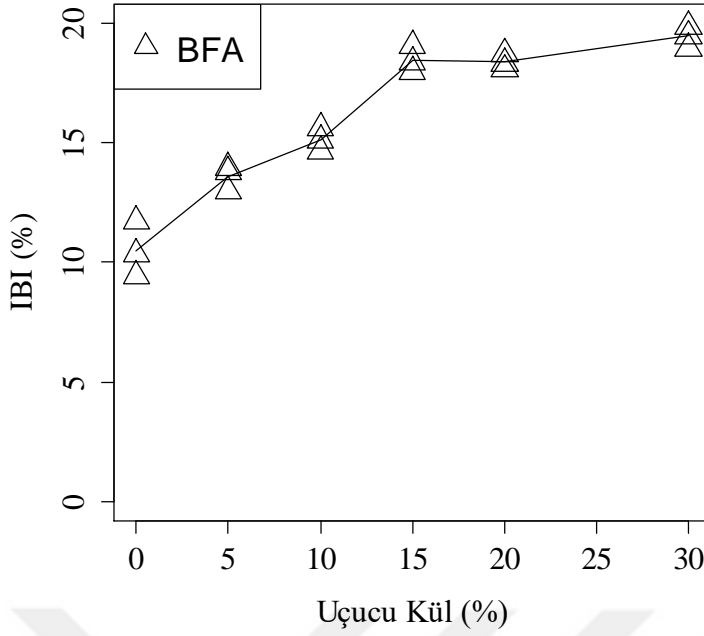


**Şekil 5.23** % 30 Uçucu kül ve kirecin S zeminin ani taşıma indeksine etkisi.

S zemin ve karışımlarına ait IBI sonuçları birlikte değerlendirildiğinde kireç içermeyen % 30 uçucu kül katkılı karışımın ani taşıma indeksi değeri katkısız zeminin 1.88 katı iken, % 30 uçucu kül üzerine eklenen % 5 kireç katkısı bu değerini 2.48 katına çıkmasını sağlamıştır. Dolayısıyla eklenen kireç dayanımı artırmaya olumlu yönde etki etmiştir. Sadece kireç içeren karışımın ani taşıma indeksi değeri ise katkısız zeminin 2.38 katıdır. Bu yönden % 5 kireç üzerine eklenen % 30 uçucu kül katkısı ani taşıma indeksinde önemli bir değişime yol açmamış, az bir miktarda artışa yol açmıştır. Bu kapsamda elde edilen değerlerin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu deneyde sadece kireç katkılı karışımlar ve hem kireç hem de uçucu kül katkılı karışımlarda IBI değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Bunun nedeni ise, kireç katkılı karışımların üzerine eklenen uçucu kül katkısındaki puzolanik reaksiyonların gerçekleşmesi için yeterli sürenin olmamasıdır.

### 5.6.2 B Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması

Şekil 5.24'de uçucu külün yüksek plastisiteli killi zeminin ani taşıma indeksini nasıl etkilediği görülmektedir. Bu alt bölümde kireç içermeyen uçucu kül katkılı, uçucu kül içermeyen kireç katkılı, hem kireç hem de uçucu kül katkılı karışımlara ait deney sonuçları değerlendirilmiştir.

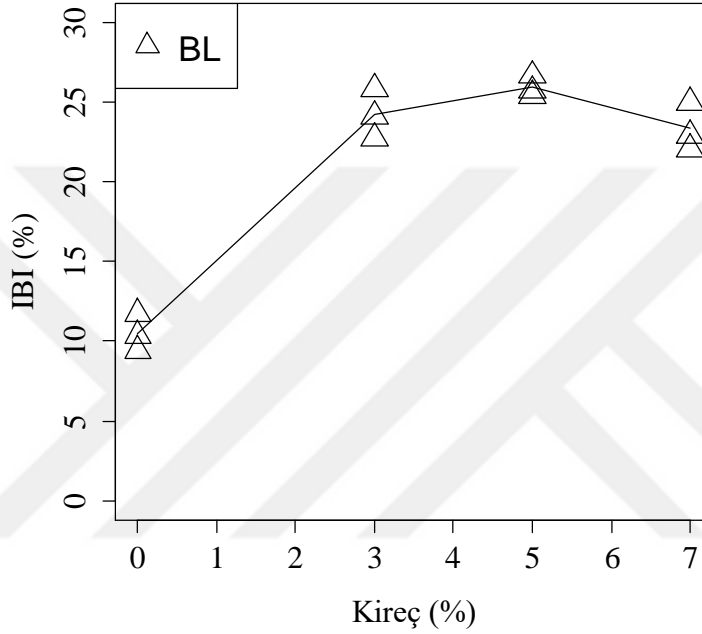


**Şekil 5.24** Uçucu külün B zeminin ani taşıma indeksine etkisi.

Zemine eklenen uçucu kül katkısı ile IBI değerlerinde artış gözlenmiştir. % 15 katkıdan sonra ani taşıma indeksindeki artış hızı yavaşlamıştır. B zemine yapılan ani taşıma indeksi deneyi sonrasında ilgili zemine ait IBI değeri %  $10.49 \pm 0.94$  olarak bulunmuştur. Zemine eklenen uçucu külün artması ile ani taşıma indeksi değerlerinde artış gözlenmiştir. Buna göre B5FA kodlu karışımda IBI değeri %  $13.58 \pm 0.43$  olup, katkısız B zeminin 1.29 katıdır. Katkı oranının % 15'e çıkması ile IBI değeri %  $18.48 \pm 0.45$  değerine yükselmiş olup, bu değer katkısız B zeminin 1.76 katıdır. En yüksek artış % 30 katkılı karışımda gerçekleşmiştir. Bu karışımın ani taşıma indeksi değeri %  $19.50 \pm 0.39$  olarak elde edilmiş olup, ilgili değer katkısız B zeminin 1.86 katıdır.

Şekil 5.25'de kirecin yüksek plastisiteli killi zeminin ani taşıma indeksini nasıl etkilediği görülmektedir. Katkısız zemine ait IBI değeri %  $10.49 \pm 0.94$  olarak tespit edilmiştir. Buna göre artan kireç oranları ile ani taşıma indeksi değerlerinde % 5 katkıya kadar artış, daha sonra ise azalış gözlenmiştir. En yüksek artış % 5 katkılı karışımda gerçekleşmiştir. İlgili karışıma (B5L) ait IBI değeri %  $26.00 \pm 0.54$  olup, katkısız B zeminin 2.48 katıdır. Ani taşıma indeksi değeri % 3 kireç katkısında %  $24.28 \pm 1.27$  olup, katkısız zeminin 2.31 katıdır. B7L kodlu karışımda ise IBI değeri %  $23.36 \pm 1.23$  olup, B zeminin 2.23 katı olmuştur. Ani taşıma indeksi deneyinde kirece bağlı dayanım artış miktarı ile uçucu külün % 30 katkılı olan karışımındaki artış miktarının birbirine yakın olmasının nedenleri arasında, ani taşıma indeksi değerinde deneyin kür süresi beklenmeden yapılması bulunmaktadır. Sürenin kısa olması, kil ile kireç arasındaki

reaksiyonların yeterince gerçekleşmesine olanak sağlamadığı için aradaki fark bu şekilde az olmuştur. Yine de % 5 kireç katkısının ani taşıma indeksi performansı % 30 uçucu küle göre daha güçlüdür. Celauro vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada ise yüksek plastisiteli killi zeminin IBI değeri yaklaşık 11 olup, eklenen % 3 kireç katkısında 1.36 katına çıkarak % 15'e yükselirken, katkı oranının % 6 olması ile IBI değeri 19'a yükselerek B zeminin 1.73 katına çıkmıştır. İlgili çalışmadan (Celauro vd. 2012) elde edilen değerler, bu tez çalışmasında elde edilenden biraz daha düşük olsa da yakındır.

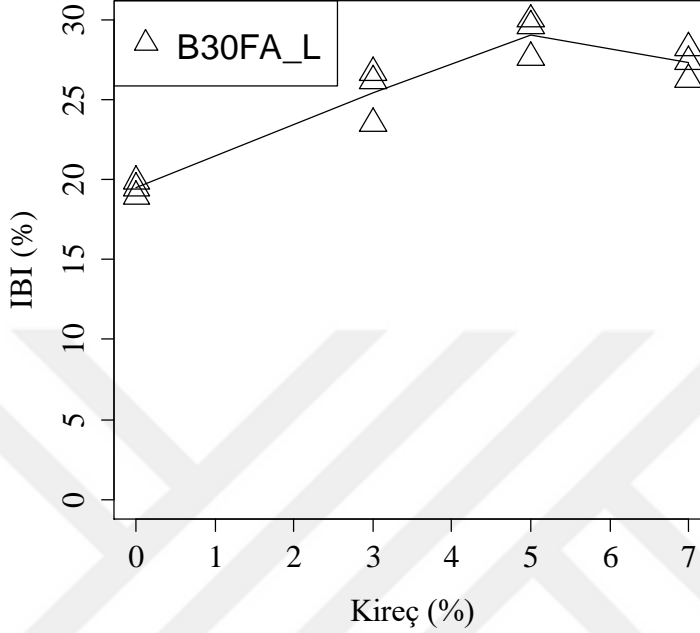


**Şekil 5.25** Kirecin B zeminin ani taşıma indeksine etkisi.

Şekil 5.26'da % 30 uçucu kül katkısı sabit olacak şekilde farklı oranlarda eklenen kirecin yüksek plastisiteli killi zeminin ani taşıma indeksini nasıl etkilediği görülmektedir. Bu şekilde, % 30 uçucu kül katkısı sabitken eklenen % 3 kireç katkısı ani taşıma indeksi (IBI) değerinin bir miktar yükselmesine yol açmıştır. Buna göre artan kireç oranları ile ani taşıma indeksi değerlerinde % 5 katkıya kadar artış, daha sonra ise azalış gözlenmiştir. En yüksek artış B30FA5L kodlu karışımda gerçekleşmiş olup karışımın ani taşıma indeksi değeri  $29.11 \pm 1.04$  olup, katkısız zeminin 2.78 katıdır. Ani taşıma indeksi B3L ve B7L kodlu karışımlarda ise sırasıyla  $25.48 \pm 1.38$  ve  $27.33 \pm 0.83$  olarak elde edilmiştir. Ani taşıma indeksi değeri % 3 kireç katkısında katkısız zeminin 2.43 katı iken % 7 katkıda ise 2.61 katı olmuştur.

Kireç içermeyen % 30 uçucu kül katkılı karışımın ani taşıma indeksi değeri katkısız zeminin 1.86 katı iken, % 30 uçucu kül üzerine eklenen % 5 kireç katkısı bu değerın 2.78 katına

çıkmasına yol açmıştır. Dolayısı ile eklenen kireç dayanımı artırmaya olumlu yönde etki etmiştir. Sadece kireç içeren karışımın ani taşıma indeksi değeri ise katkısız zeminin 2.48 katıdır. Bu yönden % 5 kireç üzerine eklenen % 30 uçucu kül katkısı ani taşıma indeksinde bir miktar artışa yol açarak dayanımı olumlu etkilemiştir.



Şekil 5.26 % 30 Uçucu kül ve kirecin B zeminin ani taşıma indeksine etkisi.

Yukarıda düşük ve yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait verilen deneysel sonuçlar ve literatür ile karşılaştırılmaları Çizelge 5.7'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.7 Ani taşıma indeksi sonuçlarının özeti.

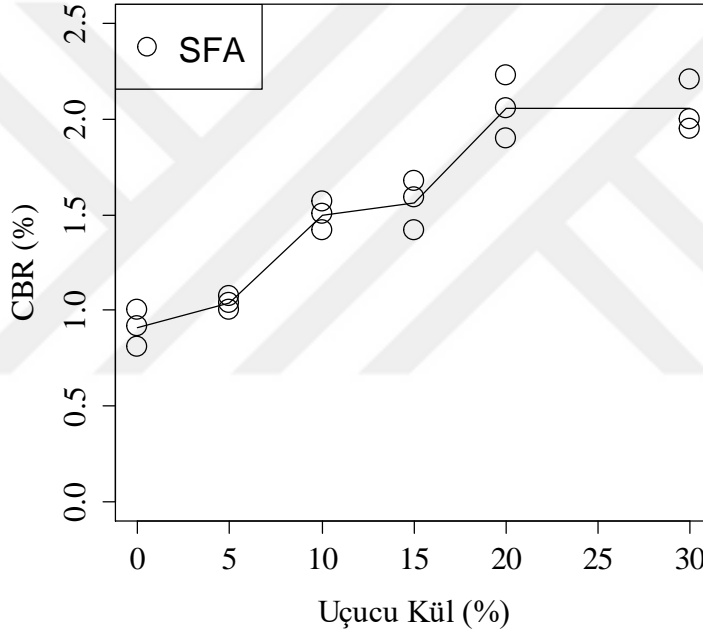
KARIŞIM	IBI (%)	KARIŞIM	IBI (%)	Yayıncıdan Elde Edilen Sonuçlar
S	12.31	B	10.49	
S5FA	15.47	B5FA	13.58	
S10FA	16.66	B10FA	15.13	
S15FA	20.04	B15FA	18.48	
S20FA	21.90	B20FA	18.39	
S30FA	23.13	B30FA	19.50	
S3L	24.39	B3L	24.28	Mccarthy vd. (2014) % 3 kireç IBI = % 16
S5L	29.34	B5L	26.00	
S7L	24.79	B7L	23.36	
S30FA3L	28.48	B30FA3L	25.48	Mccarthy vd. (2014) 6 FA + 3L IBI = % 29 24 FA + 3L IBI = % 31
S30FA5L	30.49	B30FA5L	29.11	
S30FA7L	28.19	B30FA7L	27.33	

## 5.7 KALİFORNİYA TAŞIMA ORANI BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait Kaliforniya taşıma oranı deneyinden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

### 5.7.1 S Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması

Şekil 5.27'de düşük plastisiteli killi zeminin CBR değerine uçucu kül katkısının etkisi görülmektedir. Buna göre artan uçucu kül oranı ile % 20 katkı oranına kadar CBR değerinde bir artış gözlenmiş ama daha sonra değer sabit kalmıştır.



Şekil 5.27 Uçucu külün S zeminin CBR değerine etkisi.

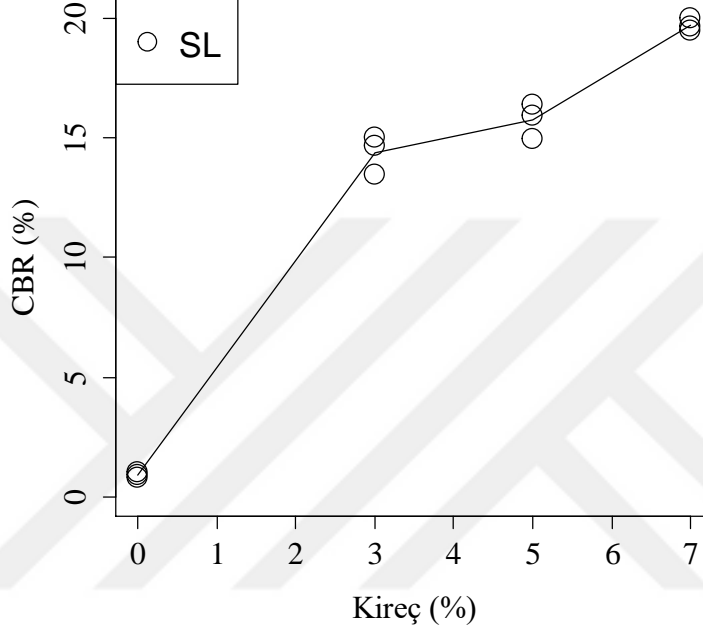
S zemine ait CBR değeri  $0.91 \pm 0.08$  olarak tespit edilmiştir. Eklenen uçucu kül katkısı ile CBR değerlerinde artış olmuştur. S5FA kodlu karışımın CBR değeri S zemine göre az bir miktar yükselerek  $1.04 \pm 0.03$  olmuştur. Katkı oranı % 10 ve % 15'i temsil eden S10FA ve S15FA kodlu karışımların CBR değerleri ise sırasıyla  $1.50 \pm 0.06$  ve  $1.56 \pm 0.11$  olarak tespit edilmiştir. Uçucu kül katkısının % 20 olması ile CBR değeri  $2.06 \pm 0.13$  olurken, katkının % 30'a yükselmesi CBR değerini fazla değiştirmemiştir. S30FA kodlu karışımın CBR değeri  $2.05 \pm 0.11$  olarak bulunmuştur. Burada S20FA ve S30FA kodlu karışımların CBR değerleri her ne kadar katkısız S zeminin 2.25 katı da olsa, standartlar tarafından belirtilen şartlara uymamaktadır. KGM (2013), tarafından yayınlanan Karayolları Teknik Şartnamesi

(KTŞ) ışığında dolgu olarak kullanılacak olan bir malzemenin CBR değerinin en az % 15'e eşit ve % 15'den büyük olması gerekmektedir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde uçucu kül katkısının S zeminin CBR dayanımına olumlu yönde katkısı olmamıştır. Edil vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada zemine eklenen % 6, % 10, % 14 ve % 18 uçucu kül katkı oranı için CBR deneyi yapılmıştır. Eklenen katkı ile zeminin CBR değerinde artış olmuştur. Buna göre katkısız zeminin CBR değeri 12 iken % 10 uçucu kül katkılı karışımda CBR değeri 2.08 katına çıkarak 25 değerine yükselmiştir. En yüksek değeri % 18 uçucu kül katkılı karışımda 30 olup katkısız zeminin 2.5 katı olmuştur. Şenol vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada ise CL sınıfı zemine eklenen % 12 oranında uçucu kül katkısı, kontrol zeminine ait CBR değerini (% 3) yaklaşık 11.33 katına çıkararak % 34'e yükseltmiştir. Eklenen uçucu kül katkısı ile CBR değerinde artış meydana gelmiş ve en yüksek CBR değeri % 20 katkılı karışımda kontrol zemininin 18.67 katına ulaşmıştır. Burada kullanılan uçucu külün C sınıfı olması ve % 23 oranında CaO içermesi, zeminin CBR değerinin bu kadar yükselmesinde önemli etki oluşturmuştur. Brooks vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada ise eklenen % 15 uçucu kül katkısı zeminin CBR değerini % 3.5'e, 25 katkıda ise % 4'e yükseltmiştir. Sharma vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada ise zemine eklenen uçucu kül katkısı ile CBR değerlerinde artış olmuştur. Buna göre katkısız zeminin CBR değeri % 2.06 iken eklenen % 10 uçucu kül katkısı CBR değerini % 3.12'ye, % 15 katkı % 3.76'ya, % 20 katkı % 4.02'ye ve % 25 katkı % 4.28'e yükseltmiştir. CBR değerleri katkısız zeminin sırasıyla 1.51, 1.83, 1.95 ve 2.08 katı olmuştur. Priyadarshree vd. (2018), yaptıkları çalışmada eklenen % 5 uçucu külün, killi zeminin yaş CBR değerini % 2.78'den % 4'e çıkardığını belirlemişlerdir. Daha fazla eklenen uçucu kül, CBR değerini artırmaya devam etmiş olup % 10 katkıda değer % 7'ye ve % 20 katkıda % 12'ye ulaşmıştır. Her ne kadar artış miktarı iyi olsa bile KTŞ'ye göre dolgu malzemesi olma yeterliliğine ulaşamamıştır. Modarres ve Nosoudy (2015) tarafından yapılan çalışmada eklenen % 3 uçucu kül, zeminin CBR değerini % 2'den % 12'ye yükseltmiştir. Katkı oranının % 6 ve % 9 olduğu durumlarda da CBR artmış ve sırasıyla % 18 ve % 20 değerlerine gelmiştir.

Literatür çalışmalarından elde edilen bulgular ışığında bazı çalışmaların bu tezde elde edilen sonuçlar ile uyumluluk gösterdiği, bazılarının ise farklı olduğu anlaşılmaktadır. Brooks vd. (2011), Sharma vd. (2012) ve Priyadarshree vd. (2018) tarafından yapılan çalışmalarda bulunan CBR değerinin aynı bu tez çalışmasında olduğu gibi KTŞ tarafından belirlenen minimum şarta uymadıkları anlaşılmaktadır. Edil vd. (2006), Şenol vd. (2006) ile Modarres ve Nosoudy (2015) tarafından yapılan çalışmalarda ise tez çalışmasının aksine kullanılan uçucu külün kimyasal

kompozisyonunun farklı olması (CaO miktarı) nedeniyle ilgili şartnamaya uygun sonuçlar elde edilmiştir.

Uçucu kül katkısı içermeyen kireç katkıli karışımlarda ise uçucu küllerin aksine eklenen kireç karışımın CBR değerinde önemli artışlara yol açmıştır. Şekil 5.28'de de açıkça görülebileceği kireç katkısı arttıkça karışımın CBR değerinde iyileşmeler gözlenmiştir.



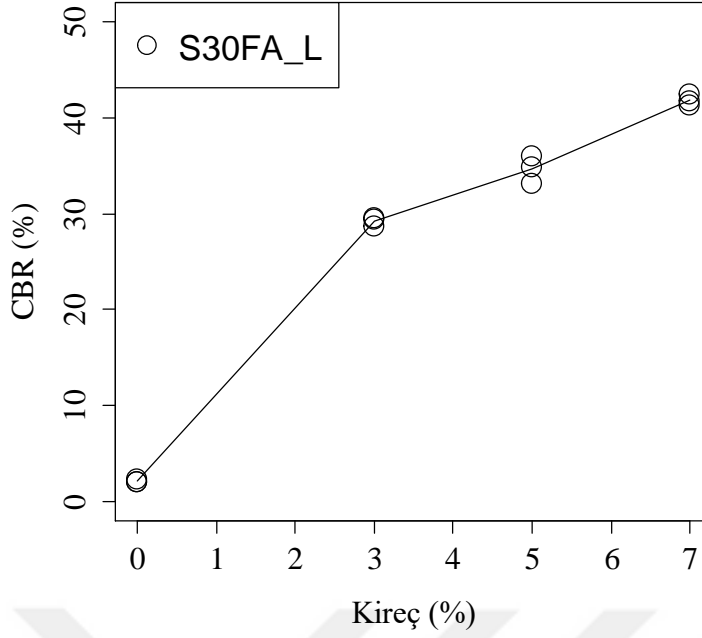
Şekil 5.28 Kirecin S zeminin CBR değerine etkisi.

Buna göre zemine eklenen % 3 kireç katkısı S zeminin CBR değerini %  $14.38 \pm 0.67$  değerine yükseltmiş olup, bu değer katkısız zeminin CBR değerinin 15.80 katıdır. Daha fazla eklenen kireç katkısı ile CBR değeri yükselmiş olup, S5L kodlu karışımda %  $15.76 \pm 0.60$  ve S7L kodlu karışımda %  $19.73 \pm 0.22$  değerlerine yükselmiştir. S5L ve S7L kodlu karışımın CBR değerleri katkısız zeminin sırasıyla 17.32 ve 21.68 katıdır. KGM (2013) tarafından yayınlanan KTŞ'ye göre S3L kodlu karışım, şartnamede kireç ile stabilize edilip dolgu malzemesi olarak kullanılabilmenin laboratuvar şartlarından olan "**CBR  $\geq$  % 15**" şartını sağlamamıştır. S5L ve S7L kodlu karışımların CBR değerlerinin standart tarafından belirtilen bu şartı sağlaması, ilgili karışımların dolguda kullanılabilmesine yönelik CBR performansı yönünden yeterli bir mukavemete sahip olduğunu göstermiştir. Osinubi ve Nwaiwu (2006) tarafından yapılan çalışmada zemine eklenen % 3 kireç, katkısız zeminin CBR değerini % 8'den 8.25 katına çıkararak % 66'ya yükseltmiştir. Artan kireç oranı ile CBR değeri artmaya devam etmiş olup, % 5 kireç katkısında % 70'e ve % 8 kireç katkısında % 75'e çıkararak katkısız zeminin CBR

değerini sırasıyla 8.75 ve 9.38 katına çıkarmıştır. Kavak ve Baykal (2012) tarafından yapılan çalışmada ise zemine ait yaş CBR değeri 28 gün kür durumunda % 2 iken, % 4 kireç katkılı karışımda % 58'e çıkmıştır Modarres ve Nosoudy (2015) tarafından yapılan çalışmada eklenen % 3 kireç, zeminin CBR değerini % 2'den % 15'e yükseltmiştir. Katkı oranının % 6 ve % 9 olduğu durumlarda da CBR artmış ve sırasıyla % 19 ve % 22 değerlerine gelmiştir.

Literatür birlikte yorumlandığında zemine eklenen % 3 kirecin zeminin CBR değerini % 15 ile % 66 arasında değiştirdiği görülmektedir. Bu kapsamda tezde ilgili oran için bulunan değer alt sınır olarak gözükürken Modarres ve Nosoudy (2015) tarafından elde edilen CBR sonucuna oldukça yakındır. Yüksek katkı oranlarında da Modarres ve Nosoudy (2015) çalışması ile uyumlu sonuçlar tespit edilmiştir. Osinubi ve Nwaiwu (2006) ile Kavak ve Baykal (2012) tarafından yapılan çalışmalarda ise kullanılan kirecin özellikleri açısından daha yüksek CBR değerleri bulunmuştur. Tüm çalışmalar için ortak olan durum ise kirecin zeminlerin CBR performansını artırması ve şartname (KTŞ) tarafından belirlenen şartın sağlanmasına katkı sunması olmuştur.

Şekil 5.29'da % 30 uçucu kül katkısı sabit ve farklı oranlarda eklenmiş olan kirecin düşük plastisiteli kilin CBR performansına etkisi incelenmiştir. Bu şekilde de açıkça görüldüğü gibi kireçsiz % 30 oranında uçucu kül ilaveli karışımın CBR performansı oldukça zayıftır. Hem uçucu kül hem de kireç ile gerçekleştirilen CBR deneyi sonrasında karışımlara ait CBR değeri katkısız zeminin 32.05 ile 45.95 katı arasına çıkmıştır. S30FA3L kodlu karışımın Kaliforniya taşıma oranı (CBR) değeri  $29.17 \pm 0.37$  olarak bulunmuştur. Artan katkı ile CBR değerinde artış devam etmiş olup, sırasıyla S30FA5L kodlu karışımda  $34.63 \pm 1.14$  ve S30FA7L kodlu karışımda  $41.82 \pm 0.49$  olarak bulunmuştur. Hem uçucu kül hem de kireç içeren tüm karışımlar (S30FA3L, S30FA5L ve S30FA7L) KTŞ tarafından belirlenen yol altyapısı dolgusu olma gerekliliğini ( $CBR \geq \% 15$ ) güvenle sağlamışlardır.



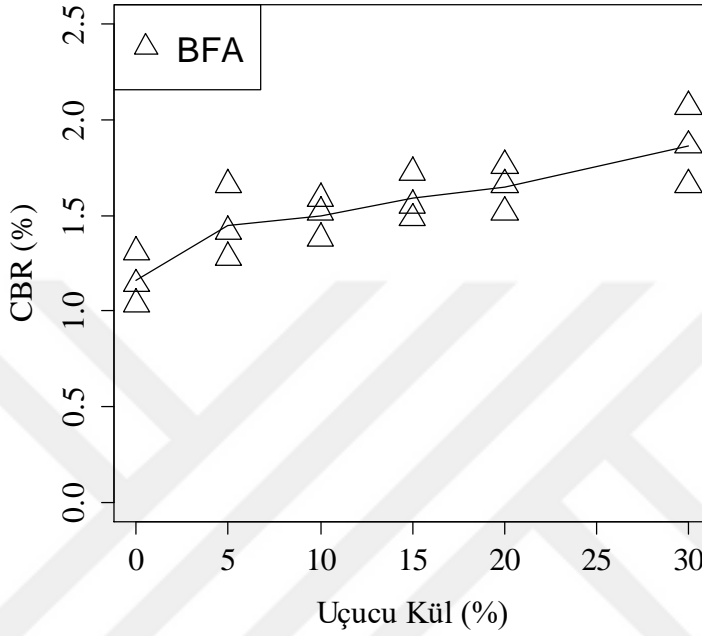
**Şekil 5.29** % 30 Uçucu kül ve kirecin S zeminin CBR değerine etkisi.

BS EN 13286-47 (2012) standardında, CBR değeri % 0 ile % 9 olduğunda değerlerin en yakın % 0.5'ine, % 10 ile % 29 arasında olduğunda en yakın % 1 hanesine ve % 29'dan daha büyük olan değerlerin en yakın % 5 hanesine yuvarlatılması gerekliliği belirtilmiştir. Bu durum dikkate alındığında sadece uçucu kül içeren karışımlardaki CBR değerleri sırasıyla S zemini ve S5FA kodlu karışımda % 1, S10FA ve S15FA karışımlarında % 1.5 olarak belirlenmiştir. S20FA ve S30FA karışımlarında ise CBR değerleri % 2 olmuştur. Sadece kireç içeren S3L, S5L ve S7L kodlu karışımların CBR değerleri sırasıyla % 15, % 16 ve % 20 değerindedir. S30FA3L, S30FA5L ve S30FA7L kodlu karışımların CBR değerleri de yine aynı standartta belirtilen yuvarlamaya göre sırasıyla % 35, % 35 ve % 45 olarak belirlenmiştir.

S zemin ve tüm karışımları toplu olarak değerlendirildiğinde, CBR mukavemeti zayıf olan S zemine eklenen uçucu kül katkısının zeminin CBR performansını yeterli düzeye çıkaramadığı görülmüştür. Bunun haricinde S3L kodlu karışım dışında, diğer tüm karışımlarda CBR değeri % 15 sınırını aşarak, KTŞ'ye göre yol altyapısında dolgu malzemesi olarak kullanılabilme şartını sağlamıştır. Hem uçucu kül hem kireç içeren karışımların CBR değerlerinin sadece kireç içeren karışımların CBR değerlerine göre daha yüksek olması dikkat çekici sonuçlardan birisi olup, uçucu külün kireç ile birlikte kullanıldığında verimli olduğuna işaret etmektedir.

### 5.7.2 B Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması

Bu bölümde B zemin ve karışımlarına ait CBR sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 5.30'da yüksek plastisiteli killi (B) zeminin CBR değerine uçucu kül katkısının etkisi görülmektedir. Buna göre artan uçucu kül oranı ile CBR değerinde artış gözlenmiştir.



Şekil 5.30 Uçucu külün B zeminin CBR değerine etkisi.

B zemine ait CBR değeri  $1.16 \pm 0.11$  olarak tespit edilmiştir. Eklenen uçucu kül katkısı ile CBR değerlerinde artış olmuştur. B5FA kodlu karışımın CBR değeri B zemine göre bir miktar yükselerek  $1.45 \pm 0.16$  olmuştur. B zemine eklenen % 5 uçucu külden sonraki katkı oranlarında artış hızı yavaşlamıştır.

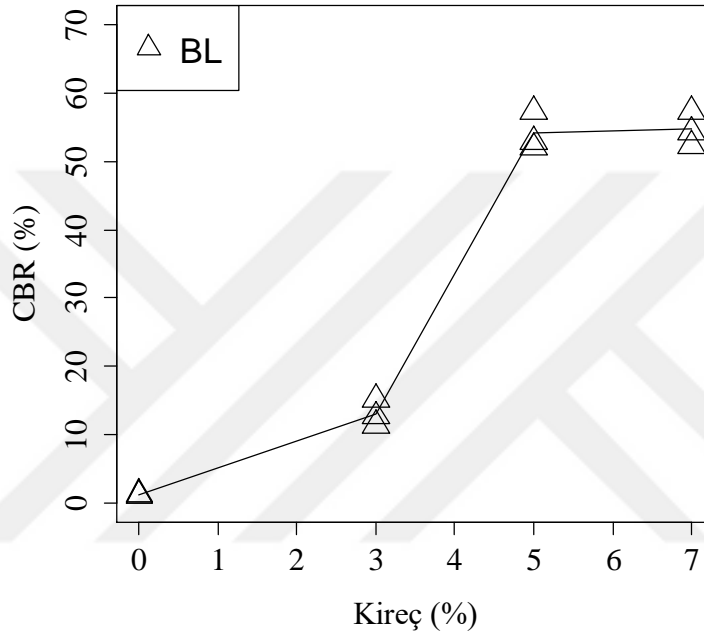
Katkı oranı % 10 ve % 15'i temsil eden B10FA ve B15FA kodlu karışımların CBR değerleri ise sırasıyla  $1.50 \pm 0.09$  ve  $1.59 \pm 0.10$  olarak tespit edilmiştir. Uçucu kül katkısının % 20 olması ile CBR değeri  $1.65 \pm 0.10$  olmuştur. En yüksek CBR değeri ise katkının % 30 uçucu kül içeren B30FA kodlu karışımda elde edilmiştir. İlgili karışımın CBR değeri  $1.86 \pm 0.17$  olarak bulunmuştur. Her ne kadar B30FA kodlu karışımın CBR değeri katkısız zeminin 1.60 katı da olsa, standartlar tarafından belirtilen şartlara uymamaktadır. KGM (2013), tarafından yayınlanan KTŞ'ye göre dolgu olarak kullanılacak olan bir malzemenin CBR değerinin minimum % 15 olması gerekmektedir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde uçucu kül katkısının B zeminin CBR dayanımına olumlu yönde katkısı olmamıştır.

Pandian vd. (2001) ise zemine eklenen % 10 uçucu külün, killi zeminin CBR değerini 2.27 katına çıkartarak % 4.15 değerine yükselttiğini tespit etmiştir. En yüksek CBR değeri % 20 katkılı karışımda elde edilmiş olup bu değer zeminin 2.65 katı olmuştur. Daha sonra % 30 katkılı karışımda CBR değeri % 3.95 olsa da yine de zeminin 2.16 katıdır. Sahu vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada % 8 katkı oranına kadar eklenen uçucu kül zeminin CBR değerinde önemli bir değişime yol açmamış iken, katkı oranının % 16'ya çıkması ile bulunan CBR değeri katkısız zeminin yaklaşık 5 katı olmuştur. Zhang ve Xing (2002) tarafından yapılan çalışmada zemine eklenen % 40 oranında F sınıfı uçucu kül CBR değerini % 3.6'ya çıkarmış olup, bu değer katkısız zemine ait CBR değerinin (% 2) 1.8 katıdır. Leelavathamma vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada ise zemine eklenen % 18 uçucu kül katkısı zeminin CBR değerini fazla değiştirmeyerek % 1.4 değerinden % 1.1'e düşürmüştür. Edil vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada CH zemine eklenen % 10 ve % 18 uçucu kül katkı oranı için CBR deneyi yapılmıştır. Eklenen katkı ile zeminin CBR değerinde az bir artış olmuştur. Buna göre katkısız zeminin CBR değeri 17 iken % 10 uçucu kül katkılı karışımda CBR değeri katkısız zeminin 1.12 katına çıkarak 19 değerine yükselmiştir. Katkı oranının % 18'e yükselmesi CBR değerinde önemli bir değişime yol açmamıştır. İlgili karışımda CBR değeri 20 olup, kontrol zemininin 1.18 katı olmuştur. Şenol vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada ise CH sınıfı zemine eklenen % 10 oranında uçucu kül katkısı, kontrol zeminine ait CBR değerini (% 17) yaklaşık 1.18 katına çıkararak % 20'ye yükseltmiştir. Eklenen uçucu kül katkısı ile CBR değerinde artış meydana gelmiş ve en yüksek CBR değeri % 18 katkılı karışımda kontrol zemininin 1.47 katına ulaşmıştır. Burada kullanılan uçucu külün % 9.8 oranında CaO içermesi, zeminin CBR değerini artırma miktarı açısından C sınıfı uçucu küle göre farklılık oluşturmuştur. Athanasopoulou (2014), zemine eklenen % 4 uçucu külün zeminin CBR değerini % 0.7'den % 3.6'ya yükselttiğini tespit etmiştir. Uçucu kül oranı arttıkça CBR değeri artmış olup % 8 katkıda % 11 iken, % 12 katkıda % 13.8'e ulaşmıştır. En yüksek değeri olan % 14.6'ya ise % 16 katkıda ulaşmıştır. Bu değer dahi KTŞ şartını sağlamamaktadır.

Literatürdeki çalışmalar toplu olarak değerlendirildiğinde çoğunda (Pandian vd. 2001; Sahu vd. 2001; Zhang ve Xing 2002; Leelavathamma vd. 2005; Athanasopoulou vd. 2014) eklenen uçucu kül katkısının zeminin CBR değerini KTŞ tarafından belirlenen düzeye getiremediği anlaşılmaktadır. Bu noktada bahsi geçen çalışmalar ile bu tez çalışmasından elde edilen bulgular arasında uyumluluk mevcuttur. Uyumluluğun sağlanmasında bahsi geçen çalışmalarda kullanılan uçucu küllerin kimyasal özellikleri ile tez çalışmasındaki uçucu külün özelliklerinin birbirine yakın olması etkili olmuştur. Bu durumun aksi sonuçların elde edildiği Şenol vd.

(2006) ile Edil vd. (2006) tarafından yapılan çalışmalarda ise kullanılan uçucu küllerin CaO miktarlarının yüksek olmasından dolayı KTŞ tarafından belirlenen minimum yaş CBR 15 şartının sağlandığı görülmektedir.

Uçucu kül katkısı içermeyen kireç katkılı karışımlarda ise uçucu küllerin aksine eklenen kireç karışımın CBR değerinde önemli artışlara yol açmıştır. Şekil 5.31'de açıkça görülebileceği üzere kireç katkısı arttıkça karışımın CBR değerinde iyileşmeler gözlenmiştir.



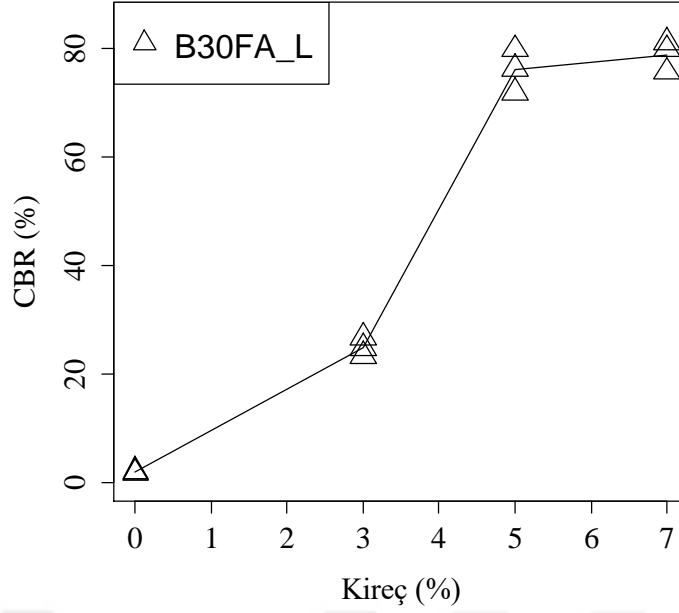
Şekil 5.31 Kirecin B zeminin CBR değerine etkisi.

Zemine eklenen % 3 kireç katkısı B zeminin CBR değerini  $13.06 \pm 1.57$  değerine yükseltmiş olup, bu değer katkısız zeminin CBR değerinin 11.26 katıdır. Daha fazla eklenen kireç katkısı ile CBR değeri önemli miktarda yükselmiş olup, B5L kodlu karışımda  $54.09 \pm 2.34$  ve B7L kodlu karışımda  $54.68 \pm 2.07$  değerlerini almıştır. B5L ve B7L kodlu karışımın CBR değerleri katkısız zeminin sırasıyla 46.63 ve 47.13 katıdır. KGM (2013) tarafından yayınlanan KTŞ'ye göre B3L kodlu karışım, şartnamede kireç ile stabilize edilip dolgu malzemesi olarak kullanılabilmenin laboratuvar şartlarından olan "**CBR  $\geq$  % 15**" şartını sağlamamıştır. B5L ve B7L kodlu karışımların CBR değerlerinin standart tarafından belirtilen bu şartı sağlaması, ilgili karışımların dolguda kullanılabilmesine yönelik CBR performansı yönünden yeterli bir mukavemete sahip olduğunu göstermiştir. Bell (1996), CBR değerleri 1 olan 2 adet farklı CH zemin üzerinde gerçekleştirdiği deney sonuçlarına göre % 4 kireç katkısının ilave edildiği karışımlardaki CBR değerinin kontrol zemininin sırasıyla 14 ile 22 katı arasında çıktığını

bulmuştur. Zhang ve Xing (2002) tarafından yapılan çalışmada zemine eklenen kireç ilgili zeminin CBR değerini oldukça yükseltmiştir. Buna göre % 4 oranında kireç CBR değerini % 48.1'e yükselterek katkısız zeminin 24 katına çıkarırken, % 5 kireç ise % 87.7'ye yükselterek yaklaşık 44 katına çıkarmıştır. Athanasopoulou (2014), zemine eklenen % 4 kirecin zeminin CBR değerini % 0.7'den % 27.6'ya yükselttiğini tespit etmiştir. Kireç oranı arttıkça CBR değeri artmış olup, % 8 katkıda en yüksek değeri olan % 62.5'e yükselmiş ve % 12 katkıda çok değişmeyerek % 60 olmuştur. En düşük değeri olan % 27.6'ya ulaştığı % 4 kireç katkısı dahi ilgili karışımın KTŞ koşuluna uymaktadır. Amadi ve Okeiyi (2017) ise yaptıkları çalışmada CH zemine eklenen % 2.5, % 5 ve % 7.5 oranında kirecin zeminin CBR değerini % 1'den sırasıyla % 42, % 60 ve % 80 değerine yükselttiğini bulmuşlardır.

Literatür çalışmaları birlikte yorumlandığında tüm yayınlarda (Bell 1996; Zhang ve Xing 2002; Athanasopoulou vd. 2014; Amadi ve Okeiyi 2017) bulunan CBR değerlerinin şartname (KTŞ) tarafından belirtilen asgari şartları sağladığı anlaşılmaktadır. Eklenen % 4 kirecin zeminin CBR değerini yaklaşık olarak % 14 ile % 48 arasına getirdiği gözlenmiştir. Katkı oranı % 5 olduğunda ise CBR önemli oranda artarak % 60 ile % 87.7 aralığına gelmiştir. Bu tez çalışmasında % 5 katkılı karışım için elde edilen  $54.09 \pm 2.34$  değerinin ilgili çalışmalara yakın olduğu gözlenmiştir. Tezden elde edilen sonuçlarda sadece % 3 kireç katkılı karışımın şartı sağlamadığı bulunmuştur. Diğer karışımlar için bulunan CBR sonuçlarının literatür ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 5.32'de % 30 uçucu kül katkısı sabit ve farklı oranlarda eklenmiş olan kirecin düşük plastisiteli kilin CBR performansına etkisi incelenmiştir. Bu şekilde de açıkça görüldüğü gibi kireçsiz % 30 oranında uçucu kül ilaveli karışımın CBR performansı oldukça zayıftır. Hem uçucu kül hem de kireç ile gerçekleştirilen CBR deneyi sonrasında karışımlara ait CBR değeri katkısız zeminin 21.47 ile 67.94 katı arasına çıkmıştır. B30FA3L kodlu karışımın Kaliforniya taşıma oranı (CBR) değeri  $24.91 \pm 1.42$  olarak bulunmuştur. Artan katkı ile CBR değerinde artış devam etmiş olup, sırasıyla B30FA5L kodlu karışımda  $75.94 \pm 3.25$  ve B30FA7L kodlu karışımda  $78.81 \pm 2.35$  olarak bulunmuştur. Hem uçucu kül hem de kireç içeren tüm karışımlar (B30FA3L, B30FA5L ve B30FA7L) KTŞ tarafından belirlenen yol altyapısı dolgusu olma yeterliliğine ( $CBR \geq \% 15$ ) sahiptir.



**Şekil 5.32** % 30 Uçucu kül ve kirecin B zeminin CBR değerine etkisi.

Zhang ve Xing (2002) tarafından yapılan çalışmada zemine eklenen kireç ilgili zeminin CBR değerini oldukça yükseltmiştir. Buna göre % 40 uçucu kül ve % 4 oranında eklenen kireç CBR değerini % 119.3'e yükselterek katkısız zeminin yaklaşık 60 katına yükseltmiştir. Bu kapsamda bulunan CBR değeri şartname tarafından bildirilen şartı sağlamaktadır. Tez çalışmasından elde edilen CBR değerleri için de % 30 uçucu kül + % 5 kireç içeren karışımda tespit edilen CBR değerinin konu ile ilgili literatür çalışmasına yakın olduğu değerlendirilmiştir.

BS EN 13286-47 (2012) standardına göre sadece uçucu kül içeren karışımlardaki CBR değerleri sırasıyla B zeminde % 1, B30FA kodlu karışımda % 2 ve diğer karışımlarda (B5FA, B10FA, B15FA ve B20FA) ise % 1.5 olarak belirlenmiştir. B3L, B5L ve B7L kodlu karışımların CBR değerleri sırasıyla % 13, % 55 ve % 55 değerindedir. B30FA3L, B30FA5L ve B30FA7L kodlu karışımların CBR değerleri de sırasıyla % 25, % 75 ve % 80'dir. B zemin ve tüm karışımları toplu olarak değerlendirildiğinde, CBR mukavemeti zayıf olan B zemine eklenen uçucu kül katkısının zeminin CBR performansını yeterli düzeye çıkaramadığı görülmüştür. Bunun haricinde B3L kodlu karışım dışında, diğer tüm karışımlarda CBR değeri % 15 sınırını aşarak, KTŞ'ye göre yol altyapısında dolgu malzemesi olarak kullanılabilme şartını sağlamıştır. Hem uçucu kül hem kireç içeren karışımların CBR değerlerinin sadece kireç içeren karışımların CBR değerlerine göre daha yüksek olması dikkat çekici sonuçlardan birisi olup, uçucu külün kireç ile birlikte kullanıldığında verimli olduğuna işaret etmektedir. Yukarıda düşük ve yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait verilen deneysel sonuçlar ve literatür ile karşılaştırılmaları Çizelge 5.8'de özetlenmiştir.

**Çizelge 5.8** Kaliforniya taşıma oranı sonuçlarının özeti.

KARIŞIM	CBR	KARIŞIM	CBR	Yayınlar	Katkı	CBR
S	0.91	B	1.16	Pandian vd. (2001)	0	1.83
					10	4.25
					20	4.85
					30	3.95
S5FA	1.04	B5FA	1.45	Sahu vd. (2001)	0 16	1.00 5.00
S10FA	1.50	B10FA	1.50	Zhang ve Xing (2002)	0 40	2.00 3.60
S15FA	1.56	B15FA	1.59	Leelavathamma vd. (2005)	0 18	1.40 1.10
S20FA	2.06	B20FA	1.65	Edil vd. (2006)	0 10 18	12 25 30
S30FA	2.05	B30FA	1.86	Şenol vd. (2006)	0	3
					12	34
					20	56
<p style="text-align: center;">NOT:</p> <p>Priyadarshree vd. (2018) ve üzerinde yer alan yayınlar zeminlere eklenen uçucu kül katkılarına göre elde edilen CBR değerlerini temsil etmektedir.</p> <p>Bell (1996) ve altında yer alan yayınlar ise zeminlere eklenen kireç katkılarına göre elde edilen CBR değerlerini vermektedir.</p>				Brooks vd. (2011)	0 15 25	2.50 3.50 4.00
				Sharma vd. (2012)	0 10 20	2.06 3.12 4.03
				Athanasopolou vd. (2014)	0 4 8 12	0.70 3.60 11 13.80
				Modarres vd. (2015)	3 6 9	12 18 20
				Priyadarshree vd. (2018)	0 10 20	2.78 7 12
S3L	14.38	B3L	13.06	Bell (1996)	0 6	1 14, 22
S5L	15.76	B5L	54.09	Osinubi vd. (2006)	3	66
					5	70
					8	75
S7L	19.73	B7L	54.68	Kavak ve Baykal (2012)	0	2
					4	58
S30FA3L	29.17	B30FA3L	24.91	Athanasopolou vd. (2014)	0	0.70
					4	27.6
					8	62.5
S30FA5L	34.63	B30FA5L	75.94	Modarres vd. (2015)	3	15
					6	19
					9	22
S30FA7L	41.82	B30FA7L	78.81	Amadi ve Okeiyi (2017)	0	1
					2.5	42
					5	60
					7.5	80

## 5.8 LİNEER ŞİŞME BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde hem düşük plastisiteli hem de yüksek plastisiteli kil karışımlarına (hem katkısız hem de katkılı) ait fiziksel tanımlama deney sonuçları irdelenmiştir.

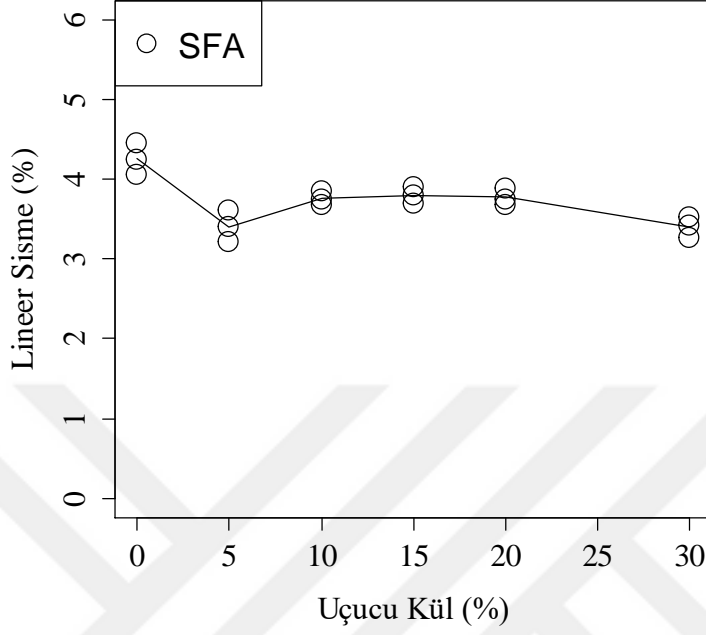
### 5.8.1 S Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması

Bu bölümde düşük plastisiteli killi zemin (S) ve karışımlarına ait lineer şişme deney sonuçları değerlendirilmiştir. Kireç içermeyen uçucu kül katkılı karışımlar, uçucu kül içermeyen kireç katkılı karışımlar ve hem kireç hem uçucu kül içeren karışımlara ait sonuçlar sırasıyla Şekil 5.33, 5.34 ve 5.35'de verilmiştir.

Şekil 5.33'de artan uçucu kül katkısı ile lineer şişme davranışının nasıl değiştiği görülmektedir. Buna göre S zemindeki şişme  $\% 4.25 \pm 0.16$  olmuştur. Artan uçucu kül katkısı ile şişme yüzdelerinde azalış gözlenmiştir. Şişme yüzdesi en düşük değerlerine S5FA ve S30FA kodlu karışımlarda ulaşmıştır. S5FA kodlu karışımın şişmesi  $\% 3.41 \pm 0.16$  olarak hesaplanmıştır. Uçucu kül katkısının  $\% 10$  olduğu durumda şişme S5FA kodlu karışıma göre biraz yükselmiş ve  $\% 3.76 \pm 0.07$  değerine gelmiştir. Şişme miktarı  $\% 10$  ve  $\% 20$  uçucu kül katkı oranları arasında ( $\% 10$  dahil ve  $\% 20$  dahil) sabit kalmıştır. Katkının  $\% 30$ 'a yükseldiği S30FA kodlu karışımın şişmesi ise  $\% 3.40 \pm 0.11$  olmuştur. S zemin ve kireç içermeyen uçucu kül katkılı tüm karışımların, KGM (2013) tarafından yayınlanan KTŞ'ye göre bir zeminin dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi için *şişme değerinin  $\% 3$ 'e eşit ve az olması şartına* uymadıkları için şişme performansı açısından yeterli mukavemete sahip olmadıkları kanaatine varılmıştır. Brooks vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada katkısız zeminin şişmesi  $\% 8$  iken eklenen  $\% 15$  ve  $\% 25$  uçucu kül katkısı şişme değerlerini sırasıyla en fazla  $\% 6$  ve  $\% 5$  değerine indirebilmiştir. Aynı çalışmada farklı bir CL zeminde de aynı katkı oranlarında, katkısız zeminin şişmesi  $\% 10$  iken  $\% 25$  katkılı karışımda değer yine  $\% 5.5$  civarında bulunmuştur. Modarres ve Nosoudy (2015) tarafından yapılan çalışmada zemine eklenen  $\% 3$  uçucu kil zeminin şişmesini  $\% 2.20$ 'den  $\% 1.36$ 'ya düşürmüştür. Uçucu kül oranı arttıkça şişme azalmış ve  $\% 6$  ve  $\% 9$  katkılarda sırasıyla  $\% 0.92$  ve  $\% 0.60$  değerlerine gerilemiştir.

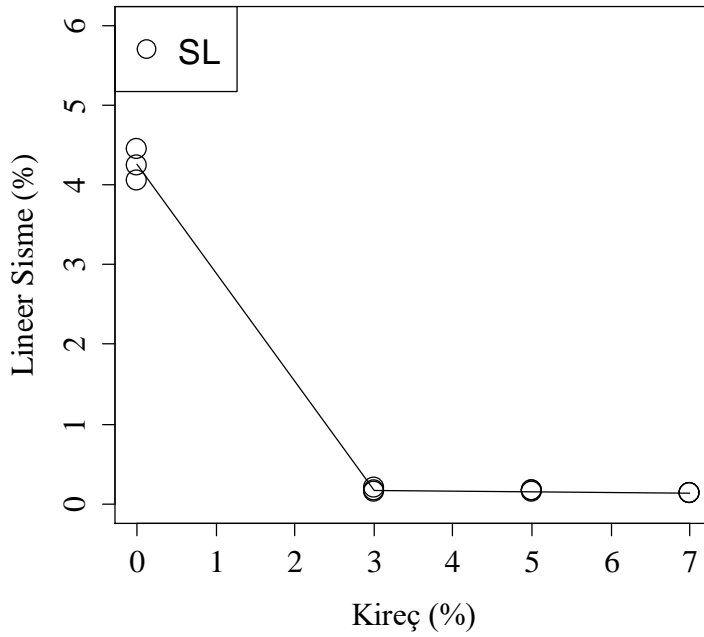
Tez çalışmasında bulunan değerlerin Brooks vd. (2011) tarafından elde edilen değerlere daha yakın olduğu gözlenmiştir. İlgili çalışmadaki uçucu kül katkısına ait kimyasal kompozisyonun tez çalışmasındaki ile benzer olması bu sonuca yol açmıştır. Modarres ve Nosoudy (2015)

çalışmasında ise kullanılan uçucu külün CaO içeriği bu tezde kullanılan (% 2.49) değere yakın (% 2.28) olmasına rağmen şişme davranışı incelenen zeminin şişme değeri bu tez çalışmasındakine göre daha düşük çıkmıştır.



Şekil 5.33 Uçucu külün S zeminin lineer şişmesine etkisi.

Şekil 5.34'de artan kireç katkısı ile lineer şişme davranışının nasıl değiştiği gözlenmiştir. Kireç katkısı ile şişme değerinde S zemine göre azalmalar meydana gelmiştir.

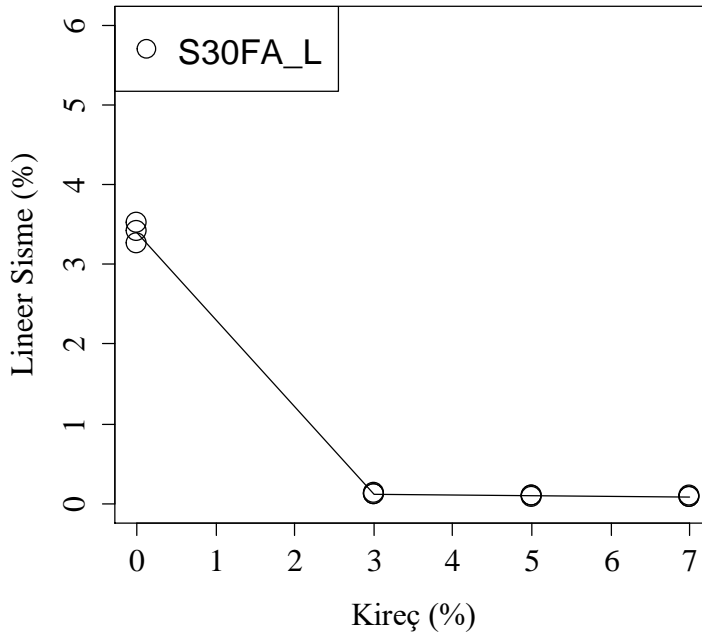


Şekil 5.34 Kirecin S zeminin lineer şişmesine etkisi.

S3L kodlu karışımda şişme değeri %  $0.17 \pm 0.02$  olarak hesaplanmıştır. Artan kireç miktarı şişme yüzdesini fazla etkilememiş olup, en düşük şişme değerine S5L kodlu karışımda ulaşılmıştır. İlgili karışıma ait lineer şişme değeri %  $0.16 \pm 0.005$  olarak bulunmuştur. S7L kodlu karışımda ise şişme değerinin %  $0.13 \pm 0.003$  olduğu tespit edilmiştir.

KGM (2013) şartnamesine göre S3L, S5L ve S7L karışımlarına ait şişme yüzdeleri ilgili karışımların dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca bu karışımların aynı şartnamede kireç stabilizasyonu bölümünde belirtilmiş olan *dolgu için kireç stabilizasyonundan sonraki karışımın şişme değerinin % 2'den az olması gerekliliği* şartına uyduğu kanaatine varılmıştır. Modarres ve Nosoudy (2015) tarafından yapılan çalışmada zemine eklenen % 3 kireç zeminin şişmesini % 2.20'den % 0.27'ye düşürmüştür. Kireç oranı arttıkça şişme azalmış ve % 6 ve % 9 katkılarda sırasıyla % 0.13 ve % 0.05 değerlerine gerilemiştir. Bu kapsamda Modarres ve Nosoudy (2015) tarafından bulunan şişme değerleri bu tez çalışması ile benzerlik göstermektedir.

Şekil 5.35'de hem uçucu kül hem de kireç katkısının S zeminin lineer şişme davranışını nasıl etkilediği görülmektedir. Katkı oranı arttıkça şişme değerinde S zemine göre önemli azalmalar meydana gelmiştir.



Şekil 5.35 % 30 Uçucu kül ve kirecin S zeminin lineer şişmesine etkisi.

Şekil 5.35'te de açıkça görüldüğü gibi S zemine kireçsiz olarak % 30 oranında uçucu kül ilavesinin karışımın lineer şişmesine etkisi oldukça zayıftır. Uçucu kül üzerine % 3 oranında eklenen kireç dahi şişmeyi önemli oranda düşürmektedir. S30FA3L kodlu karışımda şişme değeri  $\% 0.12 \pm 0.008$  olarak hesaplanmıştır. Artan kireç miktarı şişme yüzdesini fazla etkilememiş olup, en düşük şişme değerine S30FA7L kodlu karışımda ulaşmıştır. İlgili karışıma ait lineer şişme değeri  $\% 0.08 \pm 0.004$  olarak bulunmuştur. S30FA5L kodlu karışımda ise şişme değerinin  $\% 0.09 \pm 0.005$  olduğu tespit edilmiştir.

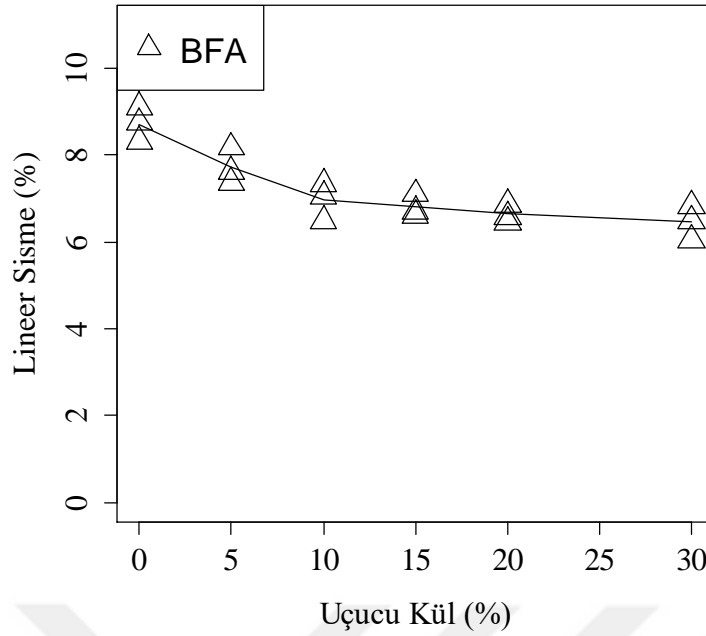
KTŞ'ye göre S30FA3L, S30FA5L ve S30FA7L karışımlarına ait şişme yüzdeleri ilgili karışımların dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesine imkan sağlamaktadır. Ayrıca bu karışımların aynı şartnamede kireç stabilizasyonu bölümünde belirtilmiş olan ***dolgu için kireç stabilizasyonundan sonraki karışımın şişme değerinin % 2'den az olması gerekliliği*** şartına uyduğu kanaatine varılmıştır.

S zemin ve tüm karışımları birlikte değerlendirildiğinde en iyi şişme performansı S30FA5L ve S30FA7L kodlu karışımlarda bulunmuştur. İlgili karışımlara ait şişme değerleri  $\% 0.09$  ve  $\% 0.08$ 'dir. Ayrıca S30FA kodlu karışımla karşılaştırıldıklarında, eklenen kirecin zemine ait şişmeyi  $\% 3.40$ 'tan bu değerlere düşürmesi de kirecin etkisini göstermiştir. S3L, S5L ve S7L kodlu karışımlarda en düşük şişme S7L kodlu karışımda  $\% 0.13$  ve en yüksek şişme ise S3L kodlu karışımda  $\% 0.17$  olarak bulunmuştur. Ayrıca aynı değerler uçucu kül içermeyen S30FA3L, S30FA5L ve S30FA7L kodlu karışımlar ile birlikte değerlendirildiğinde ise kireç üzerine eklenen uçucu kül katkısının zeminin şişmesine bir etkisi olmadığı değerlendirilmesini yapılmıştır.

### **5.8.2 B Zemin ve Karışımlarına Ait Bulguların Karşılaştırılması**

Bu bölümde yüksek plastisiteli killi zemin (B) ve karışımlarına ait lineer şişme deney sonuçları değerlendirilmiştir. Kireç içermeyen uçucu kül katkılı karışımlar, uçucu kül içermeyen katkılı karışımlar ve hem kireç hem uçucu kül içeren karışımlara ait sonuçlar sırasıyla Şekil 5.36, 5.37 ve 5.38'de verilmiştir.

Şekil 5.36'da artan uçucu kül katkısı ile lineer şişme davranışının nasıl değiştiği gösterilmektedir. Buna göre B zemindeki şişme  $\% 8.71 \pm 0.32$  olmuştur. Artan uçucu kül katkısı ile şişme yüzdelerinde azalış gözlenmiştir.

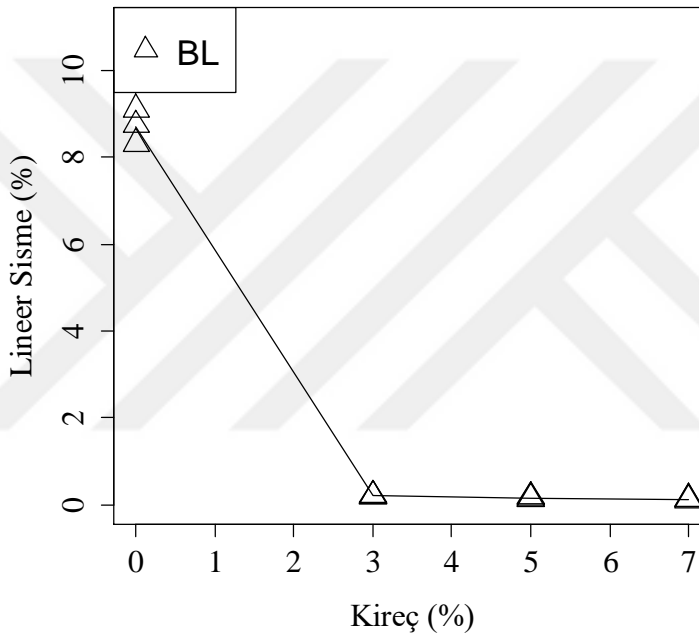


**Şekil 5.36** Uçucu külün B zeminin lineer şişmesine etkisi.

Katkı oranının % 10'a çıkmasından sonra azalış yerini sabitlenmeye bırakmıştır. B10FA kodlu karışımda şişme miktarı  $6.95 \pm 0.35$  olmuştur. En düşük şişme yüzdesi, katkı oranının % 30 olduğu B30FA kodlu karışımda olup, en düşük  $6.45 \pm 0.33$  değerine kadar gerilemiştir. B zemin ve kireç içermeyen uçucu kül katkılı tüm karışımların, KGM (2013) tarafından yayınlanan KTS'ye göre bir zeminin dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi için **şişme değerinin % 3'e eşit ve az olması şartına uymadıkları** için şişme performansı açısından yeterli mukavemete sahip olmadıkları kanaatine varılmıştır. Kumar ve Sharma (2004) tarafından yapılan çalışmada katkısız zeminin şişmesi % 10.8 iken, uçucu kül katkısı ile şişme değerlerinde azalış olmuş ve en düşük şişme değeri % 20 uçucu kül katkılı karışımda % 5.5 olarak gerçekleşmiştir. Phanikumar (2009) uçucu külü % 10 olarak eklediğinde zeminin şişmesi % 27'den % 14'e gerilemişken, % 20 katkıda ise azalış hızı yavaşlasa da şişme % 9 olmuştur. Bin-Shafique vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada da şişme uçucu kül katkısı ile azalmış ve değer katkısız zeminde % 17.2 iken % 4.1'e kadar düşmüştür. Seco vd. (2011), yaptıkları çalışmada eklenen % 5 uçucu külün şişmeyi % 4.7'den % 2.2'ye düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Cheshomi vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada eklenen % 3 uçucu kül zeminin şişmesini % 4.5'ten % 0.6'ya düşürmüştür. Uçucu kül oranının % 5'e çıkması ile şişme biraz yükselse de zemine göre daha düşük olup % 1.7 olmuştur. % 7 kül ise şişmeyi değiştirmeyerek % 1.6'ya getirmiştir.

Literatürden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde artan uçucu kül katkısı ile şişmenin azalması açısından literatürün çoğunun (Phanikumar 2009; Seco vd. 2012; Cheshomi vd. 2017) bu tez çalışması ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Bin-Shafique vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada da şişme azalmış olup tez çalışmasından farklı olarak daha hızlı bir şişme azalımı gözlenmiştir.

Şekil 5.37'de artan kireç katkısı ile lineer şişme davranışının nasıl değiştiği gözlenmiştir. Buna göre B zemindeki şişme  $\% 8.71 \pm 0.32$  olmuştur. Artan kireç katkısı ile şişme yüzdelerinde önemli azalışlar gözlenmiştir.



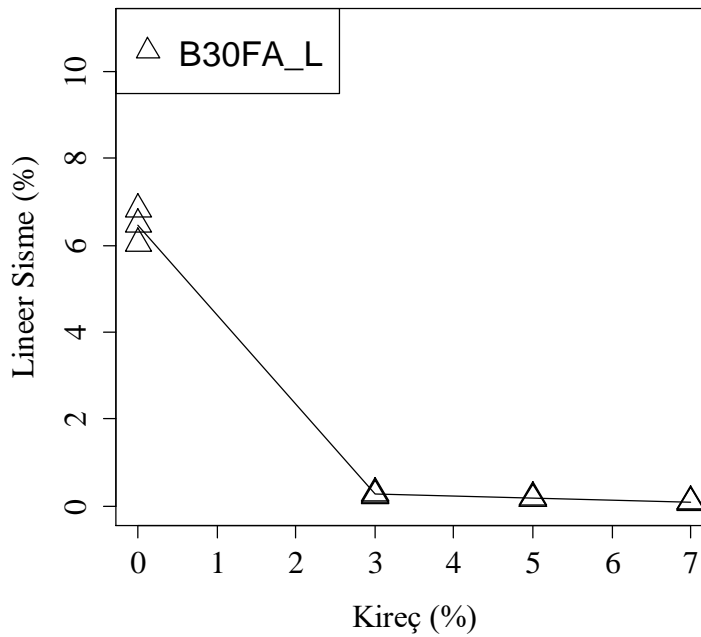
Şekil 5.37 Kirecin B zeminin lineer şişmesine etkisi.

Buna göre uçucu kül içermeyen kireçli karışımlar incelendiğinde % 3 oranında eklenen dahi zeminin şişmesini önemli oranda azaltarak  $\% 0.21 \pm 0.005$ 'e düşürmüştür. Daha fazla eklenen kireç katkısı şişmeyi fazla etkilemeyip bir miktar daha düşürmüş olup, B5L karışımında  $\% 0.16 \pm 0.02$  ve B7L karışımında  $\% 0.13 \pm 0.02$  değerlerine getirmiştir. Buna göre sadece kireç içeren tüm karışımların (B3L, B5L ve B7L) yaş şişme değerleri KGM (2013) tarafından hazırlanan KTŞ'ye göre kireç sonrası dolgu için laboratuvar şişme performansı şartına uyum sağlamıştır. Phanikumar (2009) çalışmasında, zemine eklenen % 2 kireç, şişmeyi % 27'den % 14'e getirmiştir. Kireç oranının % 4 olması ile şişmedeki azalış hızlanarak % 3'e gerilemiştir. Seco vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada eklenen % 2 oranında kireç zeminin şişmesini önemli miktarda değiştirmeyerek % 4.7'den % 3.5'e getirmiştir. Kireç oranının % 4'e çıkması ile şişme daha da

azalarak % 1.25 olarak bulunmuştur. Celauro vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada 7 gün kür süresine tabi tutulan bir zemin-kireç karışımına ait şişme davranışı incelendiğinde, eklenen tüm kireç karışımlarında (% 1.5, % 2, % 3 ve % 6) şişme değerleri % 0.1 değerinin altında kalmıştır. Burada kullanılan zeminlerin ve karışımların kimyasal kompozisyonlarının farklı olması bu sonucun ortaya çıkmasının nedenlerinden olabilecektir. Amadi ve Okeiyi (2017) ise yaptıkları çalışmada CH zemine eklenen % 2.5, % 5 ve % 7.5 oranında kirecin zeminin şişme değerini % 8.8'den sırasıyla % 7.0, % 4.85 ve % 2.25'e düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Literatürdeki sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde zeminlere eklenen kirecin çoğu çalışmada şişme değerlerini önemli oranda düşürdüğü gözlenirse de bazı çalışmalarda (Phanikumar vd. 2009; Cheshomi vd. 2017) beklenen şişme performansının ortaya çıkmadığı görülmektedir. Seco vd. (2011) ile Celauro vd. (2012) tarafından elde edilen sonucun bu tez çalışması ile daha uyumlu olduğu gözlenmiştir. Celauro vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada ise diğer çalışmalardan farklı olarak şişme değerlerinin % 0.1'in altında olması ise KTS şartına uygun olduğu görülmektedir. Amadi ve Okeiyi (2017) ile Cheshomi vd. (2017) çalışmasında ise kireç zeminin şişmesini düşürse de şartname tarafından belirlenen şartı sağlayamamıştır.

Hem kireç hem de uçucu kül içeren karışımlarda ise Şekil 5.38'de de görüleceği gibi B30FA3L kodlu karışımda şişme çok önemli miktarda düşmüş olup, sonraki katkılarda da yavaş bir hızla düşüşünü sürdürmüştür.



Şekil 5.38 % 30 Uçucu kül ve kirecin B zeminin lineer şişmesine etkisi.

Şekil 5.38'de de açıkça görüldüğü gibi B zemine kireçsiz olarak % 30 oranında uçucu kül ilavesinin karışımın lineer şişmesine etkisi oldukça zayıftır. Uçucu kül üzerine % 3 oranında eklenen kireç dahi şişmeyi önemli oranda düşürmektedir. B30FA3L kodlu karışımda şişme değeri  $0.26 \pm 0.03$  olarak hesaplanmıştır. Kireç miktarının % 5'e çıkması ile şişme önemli miktarda düşmüştür. İlgili karışıma (B30FA5L) ait şişme  $0.17 \pm 0.02$  olarak hesaplanmıştır. En düşük şişme değeri B30FA7L kodlu karışımda olmuştur. İlgili karışıma ait lineer şişme değeri  $0.09 \pm 0.01$  olarak bulunmuştur.

Burada tüm karışımlar incelendiğinde hepsinin KTS'ye göre dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi mümkün gözükmemektedir. Aynı şartnamede kireç ile stabilize edilmiş karışımların dolgu, üstyapı tabanı ya da alt temel olarak kullanılabilmesi için laboratuvar şişme performanslarının belirlendiği bölüm mevcuttur. Kireç stabilizasyonu uygulanan bir karışımın şişme değerinin % 2'den az olması gerekliliği kireç ile iyileştirme bölümünde Çizelge şeklinde verilmiştir. Buna göre B30FA3L, B30FA5L ve B30FA7L karışımları, KGM (2013) şartnamesi tarafından belirlenmiş olan ***dolgu için kireç stabilizasyonundan sonraki karışımın şişme değerinin % 2'den az olması gerekliliği*** şartına uydukları için şişmesi açısından yeterli bir performansa sahiptirler. Cheshomi vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada % 5 sabit kirece % 3, % 5 ve % 7 oranlarında uçucu kül eklenmiştir. Buna göre eklenen % 3 uçucu kül, zeminin şişmesinde önemli bir değişime yol açmamış olup % 4.5'ten % 4.8'e getirmiştir. Kirecin ve uçucu külün % 5'er olduğu durumda şişme % 3.8'e düşmüştür. Uçucu külün % 7'ye çıkması ise şişmeyi % 3.5 seviyesine getirmiştir. Tez çalışmasında bulunan şişme değerleri KTS tarafından belirlenen şartı sağlarken Cheshomi vd. (2017) çalışmasından elde edilen bulgular bu yönde farklılık göstermiş olup, ilgili çalışmada bulunan değerler şartname şartını sağlamamıştır. Burada bahsi geçen literatürde kullanılan uçucu kül + kireç katkı oranları ile tez çalışmasındaki oranların farklı olmasının bu sonucun ortaya çıkmasına sebep olabileceği düşünülmektedir.

Yukarıda düşük ve yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait verilen deneysel sonuçlar ve literatür ile karşılaştırılmaları Çizelge 5.9'da özetlenmiştir.

**Çizelge 5.9** Lineer şişme sonuçlarının özeti.

KARIŞIM	Şişme (%)	KARIŞIM	Şişme (%)	Yayınlar	Katkı	Şişme (%)
S	4.25	B	8.71	Kumar ve Sharma (2004)	0 20	10.80 5.50
S5FA	3.41	B5FA	7.72	Phanikumar vd. (2009)	0 10 20	27 14 9
S10FA	3.76	B10FA	6.95	Bin-Shafique vd. (2010)	0 5 10 20	17.20 9.80 5.50 4.10
S15FA	3.80	B15FA	6.80	Brooks vd. (2011)	0 15 25	8 6 5
S20FA	3.77	B20FA	6.63	Seco vd. (2011)	0 5	4.70 2.20
S30FA	3.40	B30FA	6.45	Modarres vd. (2015)	0 3 6 9	2.20 1.36 0.92 0.60
				Cheshomi vd. (2017)	0 3 5 7	4.50 0.60 1.70 1.60
S3L	0.17	B3L	0.21	Phanikumar vd. (2009)	0 2 4	27 14 3
S5L	0.16	B5L	0.16	Seco vd. (2011)	0 2 4	4.70 3.50 1.25
S7L	0.13	B7L	0.13	Celauro vd. (2012)	1.5 2 6	< 0.1 < 0.1 < 0.1
NOT: Cheshomi vd. (2017) ile üzerinde yer alan yayınlar zeminlere eklenen uçucu kül katkılarına göre elde edilen lineer şişme yüzdelerini temsil etmektedir.				Amadi ve Okeiyi (2017)	0 2.5 5 7.5	8.8 8.5 4.85 2.25
S30FA3L	0.12	B30FA3L	0.26	NOT: Phanikumar vd. (2009) ile aşağısında yer alan yayınlar zeminlere eklenen kireç katkılarına göre elde edilen lineer şişme yüzdelerini temsil etmektedir.		
S30FA5L	0.09	B30FA5L	0.17			
S30FA7L	0.08	B30FA7L	0.09			

## 5.9 MİKROANALİZ BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tez çalışması kapsamında seçili karışımlar (S, S30FA, S30FA5L, S5L, B, B30FA, B30FA5L ve B5L, sadece uçucu kül ve sadece kireç) üzerinde mikroanalizler gerçekleştirilmiştir. Bunlar

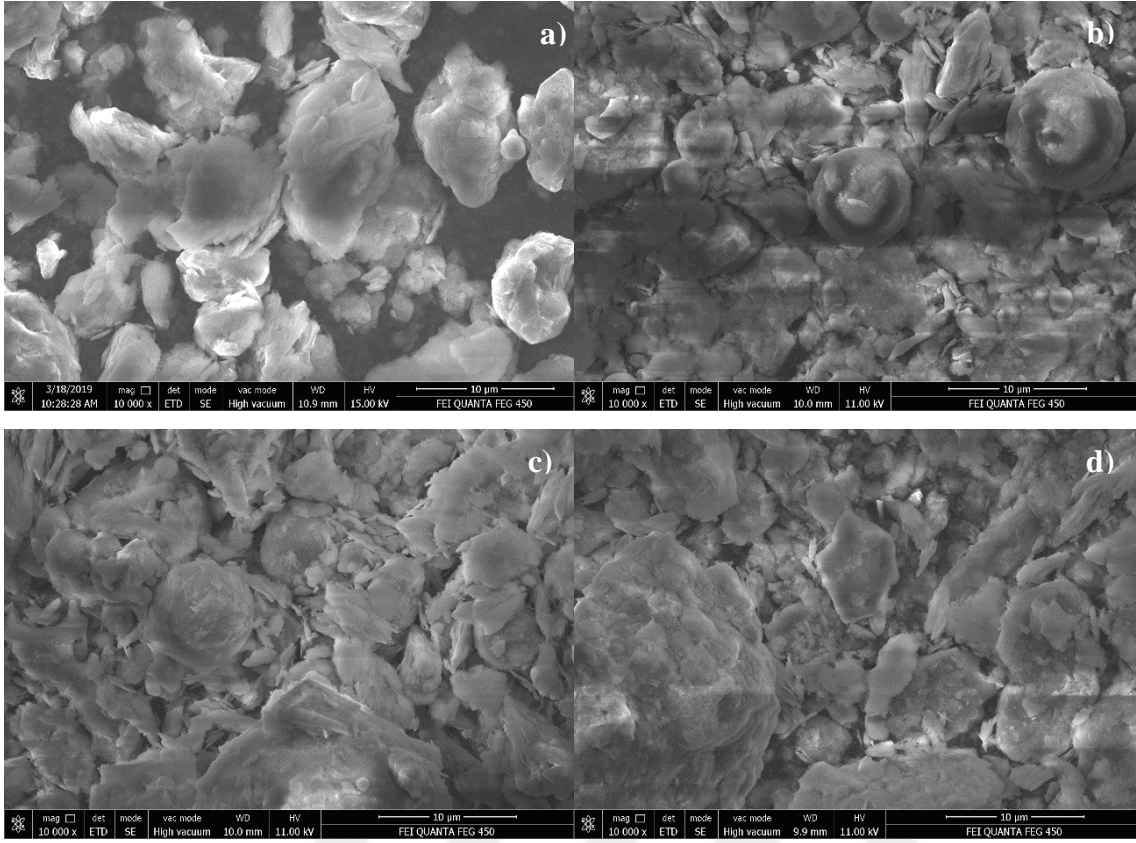
sırasıyla SEM, XRD, XRF ve TGA analizleridir. Katkısız zemin numuneleri (S ve B) ile sadece uçucu kül ve sadece kireç içeren karışımların mikroanalizlerinde numuneler karışım anında analize tabi tutulurken, diğer karışımlar 28 gün kür süresinden sonra analize tabi tutulmuşlardır. Alt başlıklarda sırasıyla bu analizlerden bahsedilecektir.

### 5.9.1 SEM Bulgularının Karşılaştırılması

Deneysel çalışması tamamlanan numunelerin morfolojik yapısının anlaşılması, partikül şekillerinin belirlenmesi ve buna bağlı olarak kimyasal analizinin yapılması amacıyla Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi yapılmıştır.

Bu bölümde düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına (S, S30FA, S30FA5L, S5L, B, B30FA, B30FA5L ve B5L, FA, Lime) yönelik yapılmış olan SEM analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Burada, katkısız zemin numuneleri, uçucu küller ve kireç küre tabi tutulmadan analiz edilirken diğer karışımlar ise 28 gün kür süresi uygulandıktan sonra analiz edilmiştir.

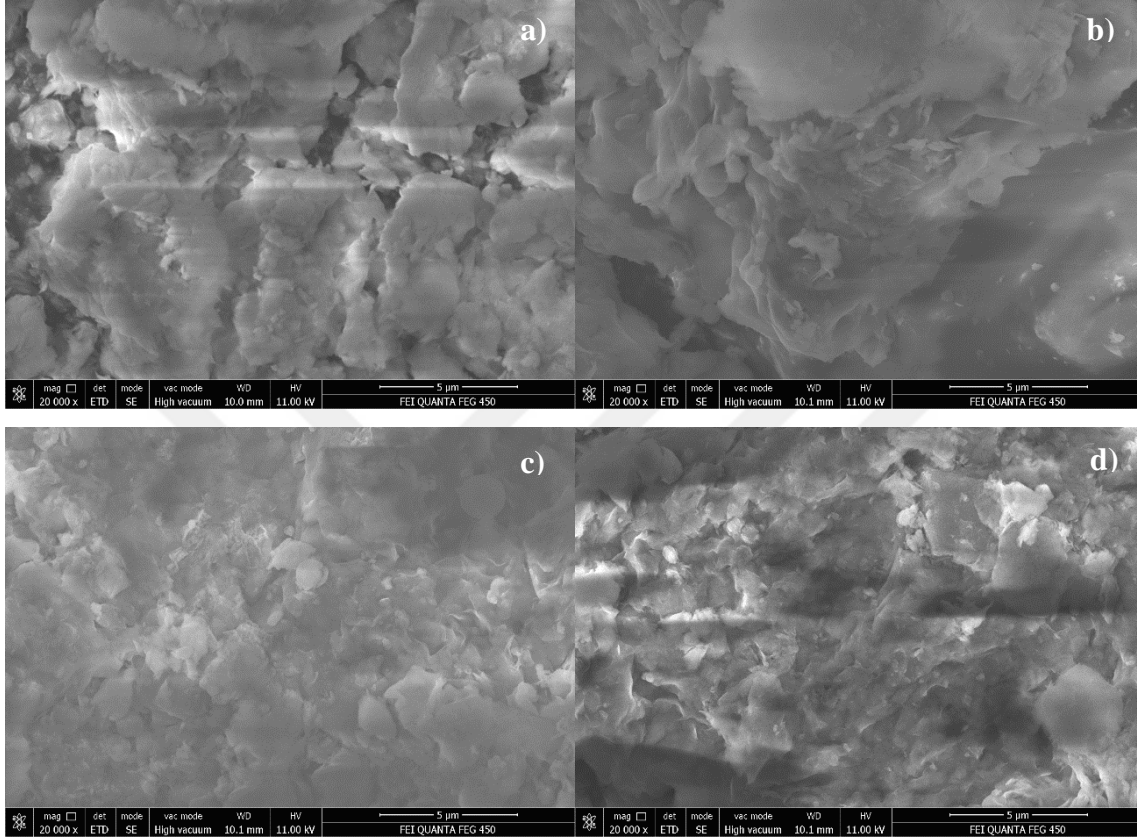
Şekil 5.39a'da düşük plastisiteli killi zemine ait SEM görüntüsü mevcuttur. Partiküllerin birbirinden ayırık halde bulunmakta, ayırık partiküller görüntüde boşluk olmasına yol açmaktadır. Partikül şekilleri amorf ve tanesal formdadır. Şekil 5.39b'de S30FA kodlu numunede uçucu kül ve kil arasında gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda, bazı kil partikülleri uçucu küldeki silt partikülleri ile yer değiştirmiştir. Partiküller uçucu kül ve zemin arasında meydana gelen puzolanik reaksiyon sonucunda birbiri ile kenetlenmiştir. Karışımda mevcut olan CaO miktarı az olduğu (% 0.706) için çimentolaşma reaksiyonlarının gerçekleşmemesi sonucunda C-S-H jelleri belirmemiştir. Şekil 5.39c ve 5.39d'de ise sırasıyla S30FA5L ve S5L kodlu numuneler için kirecin de reaksiyona girmesi ile birlikte çimentolaşma reaksiyonu da gerçekleştiği için C-S-H jelleri belirmeye başlamıştır. Küresel şekildeki uçucu küller ile birlikte kirecin güçlü bir bağ yapması ile folüküle bir kristal yapı oluşmuştur. Ayrıca kür süresinin artması ve çimentolaşma reaksiyonlarının da etkisi ile birlikte kalsiyum-silika hidratlarının oluşması sonucu kil, uçucu kül ve kireç arasındaki bağların güçlendiği anlaşılmaktadır.



**Şekil 5.39** SEM görüntüleri a) S zemin b) S30FA c) S30FA5L d) S5L.

Şekil 5.40a'da yüksek plastisiteli killi zemin numunesinde partiküller birbirinden ayrıık olarak durmaktadır. Yüksek plastisiteli killi zeminin partikülleri, düşük plastisiteli killi partiküllerden boyut olarak daha küçük olmalarına rağmen levha ve katmanlı formdadırlar. Zemine % 30 uçucu külün eklendiği Şekil 5.40b'de, uçucu küldeki silt partikülleri ile zemindeki kil partiküllerinin yer değiştirmesi sonucu partiküller daha büyük olarak görünmektedir. Şekil 5.40c'de ise B30FA5L kodlu karışımda CaO yüzdesinin artması, puzolanik reaksiyon ile birlikte çimentolaşma reaksiyonlarının da belirmesi ile partiküllerin birbirine kenetlendiği görölmektedir. Ayrıca Şekil 5.40a ile karşılaştırıldığında hem Şekil 5.40c'de hem de Şekil 5.40d'de zemindeki büyük yapraksı (montmorillonit) partiküllerin yerini daha küçük partiküller almıştır. Bu durum birbirine bağlı bir çok küçük partikölün stabilize edilmiş numunede daha kompakt bir yapı oluşturduğuna işaret etmektedir (Al-Mukhtar vd. 2012). Ayrıca, gerçekteşen çimentolaşma reaksiyonları sonucunda montmorillonit yapısında zayıflama ve kırılma (breakage) meydana gelmektedir (Sharma vd. 2012). Hem B30FA5L hem de B5L karışımında etrenjit mineralinin görölmeme sebebi ise analize tabi tutulan numunelerin etövde kurutulmamasıdır. Ayrıca Şekil 5.40c ve 5.40d'de de mevcut olan ve folüküle (topaklanmış) olmuş kristal yapı, dayanımı artırıcı özelliğe sahiptir (Dash ve Hussain, 2012). Literatür

çalışmalarında da görüldüğü gibi C-S-H jelleri bazen ağ şeklinde (retiküle) bazen topaklanmış (folüküle), bazen de hem retiküle hem de folüküle olabilmektedir (Dash ve Hussain 2012; Tran vd. 2014; Yoobanpot vd. 2017; Jafer vd. 2018). Bu tez çalışmasında ise C-S-H jelinin kristal yapısının folüküle formda olduğu görülmektedir.



Şekil 5.40 SEM görüntüleri a) B zemin b) B30FA c) B30FA5L d) B5L.

### 5.9.2 XRD Bulgularının Karşılaştırılması

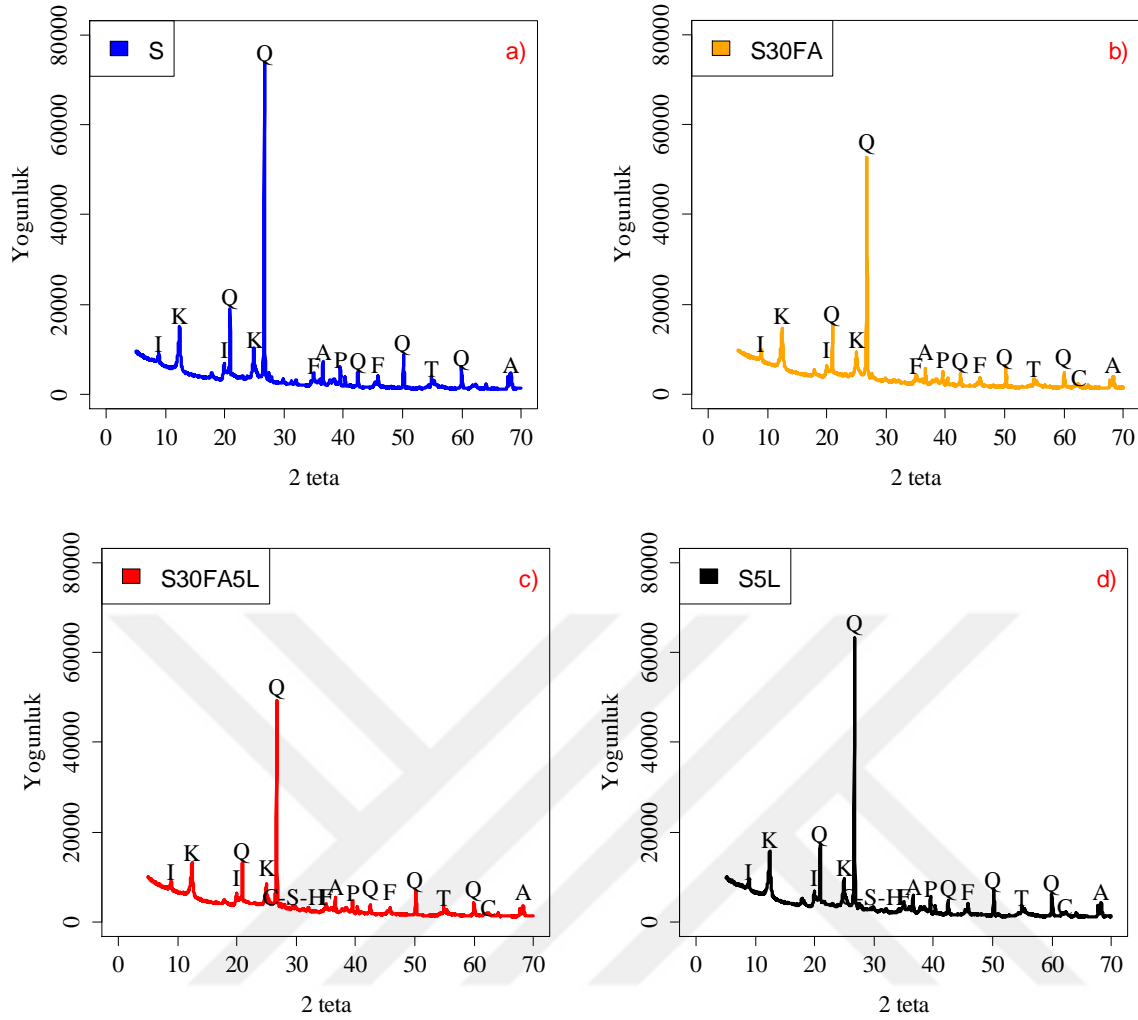
Tez çalışması kapsamında seçili numuneler (S, S30FA, S30FA5L, S5L, B, B30FA, B30FA5L ve B5L, FA ve Lime) Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda XRD analizine tabi tutulmuştur. Analizi yapılan numunelere ait datalar ( $2\theta$  ve yoğunluk) QualX2 programına işlenmiştir. Program çalıştırdıktan sonra numunelere ait belirlenen minerallerin pik değerleri tespit edilmiştir. Daha sonra bu şekilde elde edilen bilgiler sayesinde numunelere ait XRD analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Bu bölümdeki şekillerde belirtilen minerallere ait kimyasal formülleri ve kullanılan kısaltmaları içeren detaylar ise Çizelge 5.10'da sunulmuştur

**Çizelge 5.10** XRD analizinde kullanılan minerallerin kimyasal formülleri ve kısaltmaları.

Kullanılan Kısaltma	Mineral	Kimyasal Formül
A	Alüminyum oksit	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
C	Kalsiyum oksit	CaO
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat	(CaO) <sub>3</sub> .(SiO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> .(H <sub>2</sub> O) <sub>3</sub>
F	Demir oksit	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
I	İllit	KAl <sub>2</sub> .(Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> .(OH) <sub>2</sub>
K	Kaolinit	Al <sub>2</sub> .(Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ). (OH) <sub>4</sub>
M	Magnezyum oksit	MgO
M	Montmorillonit	(NaCa) <sub>0.33</sub> .(AlMg) <sub>2</sub> .(Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ). (OH) <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O
Q	Kuvars (Quartz)	SiO <sub>2</sub>
P	Potasyum dioksit	K <sub>2</sub> O
T	Titanyum dioksit	TiO <sub>2</sub>

S zemin ve karışımlarına ait XRD analiz sonuçları Şekil 5.41'de gösterilmektedir. Burada "S" ile gösterilen katkısız düşük plastisiteli killi zemine ait kürsüz, diğerleri ise 28 gün kürlü numune sonuçlarıdır.

Şekil 5.41 incelendiğinde, analiz edilen tüm numuneler için, killi zeminler ve karışımlarında sıklıkla karşılaşılan majör bileşenlerden birisi olan SiO<sub>2</sub> minerali ortaya çıkmıştır. Çizelge 5.5'de belirtilen XRF sonuçlarında da hem zemin hem de zemin karışımlarında ilgili mineralin kompozisyonunun % 55.16 ile % 58.43 arasında değiştiği göz önüne alındığında iki analiz birbiri ile tutarlılık göstermiştir.



**Şekil 5.41** XRD analiz sonuçları a) S zemin b) S30FA c) S30FA5L d) S5L.

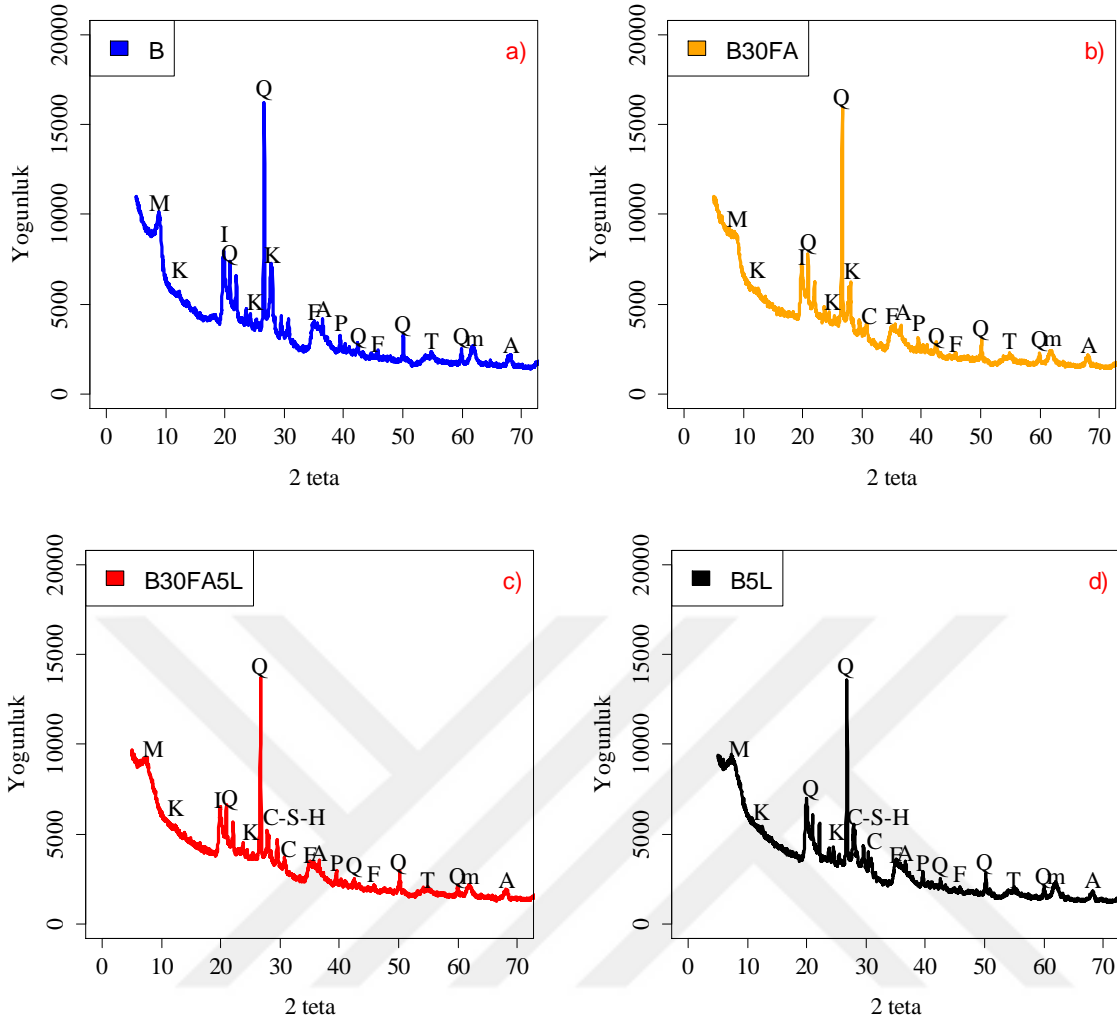
Tüm karışımlarda aynı minerallere ait pik yoğunluğu, zemine eklenen katkıları ile genellikle azalmıştır. En belirgin azalma  $\text{SiO}_2$  mineralinde olmuş olup, S30FA karışımının ilgili bileşene ait yoğunluk (intensity) değeri S zemindekine göre % 28.50 azalma göstermiştir. Aynı azalma S30FA5L karışımında % 33.34 ve S5L karışımında ise % 14.38 olarak gerçekleşmiştir. Bu azalma, hem kür süresinin artması hem de numuneye eklenen katkıdan doğrudan etkilenmektedir.

Kaolin mineralinde ise farklı bir durum meydana gelmiştir. Burada S30FA ve S30FA5L numunelerine ait pik yoğunlukları azalmasına rağmen S5L karışımının pik yoğunluğunda biraz (% 4.73) artış olmuştur. Glenn ve Handy (1963), kaolin kiline eklenen kireç katkısının kaolinin pik değerini azalttığını, fakat 2 yıl sonra bazı reaksiyona girmemiş  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  mineralinin kireç içinde kaldığını da belirtmişlerdir. Bu tez çalışmasında kür süresi olarak çok daha kısa bir süre (28 gün) uygulandığı dikkate alındığında kaolin pik yoğunluğundaki artışın sebebi henüz

reaksiyona girememiş bazı  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  minerali olabilir. Düşük plastisiteli killi zemin ve karışımlarında kireç ile stabilize edilmiş numunelerin çoğu pik değerinde pik yoğunluklarında azalma meydana gelmiştir. Bunun sebebi ise gerçekleşen puzolanik reaksiyonun stabilize edilmiş malzemedeki kil minerallerini azaltması ve buna bağlı olarak daha düşük pik yoğunluklarının oluşmasına yol açmasıdır. Benzer sonuçlar literatürdeki çalışmalarda (Ghosh ve Subbarao 2001; Sezer vd. 2006; Modarres ve Nosoudy 2015) da gözlenmiştir.

Şekil 5.41b, 5.41c ve 5.41d'de S30FA kodlu karışımda CaO piklerinin  $2\theta = 62.4^\circ$  değerinde belirlediği görülmektedir. Benzer pik Şekil 5.41a'da oluşmamıştır. Çizelge 2.2 ile birlikte düşünüldüğünde bu durum normal olarak karşılanmaktadır. Bu durumun sebebi ise, CaO miktarının S30FA, S30FA5L ve S5L karışımlarında sırasıyla % 0.706, % 3.236 ve % 6.118 olarak mevcut iken katkısız zemin numunesinde hiç bulunmamasıdır. Şekil 5.41c ve 5.41d incelendiğinde S30FA5L ve S5L kodlu numunelere ait düşük yoğunlukta bir pik olsa da kil ile kirecin reaksiyona girmesi sonucunda kalsiyum silika hidratları (C-S-H) görülmeye başlanmıştır. S30FA5L ve S5L karışımlarının dayanım deneyi (CBR, şişme, serbest basınç, dolaylı çekme, ani taşıma indeksi) sonuçları da bu durumu teyit etmektedir.

B zemin ve karışımlarına ait XRD analiz sonuçları Şekil 5.42a, 5.42b, 5.42c ve 5.42d'de gösterilmektedir. Burada "B" ile gösterilen katkısız yüksek plastisiteli killi zemine ait 0 gün kürlü XRD analiz sonuçları iken diğerleri ise 28 gün kürlü numune sonuçlarıdır.



**Şekil 5.42** XRD analiz sonuçları a) B zemin b) B30FA c) B30FA5L d) B5L.

Şekil 5.42a incelendiğinde B zeminde montmorillonite ait pik gözlenmiştir. Montmorillonit mineralinin pik değeri havada kurutmada basal mesafe 12-15 Å arasında iken, numune etilen glikol ya da gliserol ile işleme tabi tutularak XRD analizine tabi tutulduğunda basal mesafe 17-18 Å değerlerine gelmektedir. Montmorillonit mineralinin pik değerinin 10 Å civarında çıkmasının nedeni ise numunenin XRD analizine tabi tutulmadan önce etüvde kurutulması ile ara katmandaki suyun kaybolmasıdır (Mitchell ve Soga 2005). Bu çalışmada da numune kurutulduktan sonra XRD analizi yapıldığı için  $2\theta = 8.82^\circ$  değerinde montmorillonit pik değeri bulunmuştur. Literatürdeki çalışmalar ve kaynaklar (Mitchell ve Soga 2005; Sharma vd. 2012) incelendiğinde de benzer pik değerlerin geldiği gözlenmiştir.

Ayrıca Şekil 5.42b, 5.42c ve 5.42d'de montmorillonit pik yoğunluğunun B zemine kıyasla B30FA, B30FA5L ve B5L kodlu karışımlarda azaldığı görülmektedir. Azalma miktarları ise B30FA, B30FA5L ve B5L karışımlarında sırasıyla % 12.88, % 26.91 ve % 24.85 olarak

gerçekleşmiştir. Bu durum montmorillonit mineralinin yapısının bozulmaya başladığına işaret etmektedir (Sharma vd. 2012). Şekil 5.42b'de B30FA kodlu karışımda montmorillonitin pik genişliğinde (broadness) de azalma meydana gelmiştir. Bu duruma sebep olarak uçucu küldeki silt partikülleri ile zemindeki kil partiküllerinin yer değiştirmesi de etkili olmuş olabilir (Jha ve Sivapullaiah 2018). Saride ve Dutta (2016) tarafından yapılan çalışmada 28 gün kür süreli % 20 uçucu kül içeren karışımın XRD analizinde C-S-H pikleri gözlenmiştir. Bu pikin gözlenmesinin sebebi ise kullanılan uçucu kül her ne kadar ASTM C618 (2019) standardına göre F sınıfı uçucu kül olsa bile içerdiği CaO oranının yüksek olması (% 16.45) ilgili pikin belirgin bir şekilde görünmesini sağlamıştır. Şekil 5.42b'de B30FA kodlu karışımda bu pikin görülmemesi sebeplerinden birisi de içerdiği düşük CaO içeriğidir. Şekil 5.42c ve 5.42d'de ise C-S-H pikleri karışımların kireç içeriğinden dolayı ortaya çıkmıştır.

Dikkat çekici sonuçlardan birisi de etrenjit pikinin gözlenmemiş olmasıdır. Yapılan XRD analizinde  $105 \pm 5$  °C'de etüvde kurutularak hazırlanan numuneler kullanıldığı için etrenjit piklerinin oluşmadığı düşünülmektedir. Etrenjit kristallerinin sadece atmosfer basıncı altındaki bir ortamda ve karışım içinde suyun mevcut olduğu ve sıcaklığın maksimum 90 °C'de olduğu durumda stabil olduğu not edilmiştir (Taylor 1997). Etrenjit dışındaki minerallerin pik yoğunluklarının büyük olması ve XRD analizinin hızlı yapılmasından dolayı düşük konsantrasyonlu bir etrenjiti tespit etmek oldukça zordur (Wang vd. 2004).

Kireç ile stabilize edilmiş numunelerin çoğu pik yoğunluklarında azalma meydana gelmiştir. Bunun sebebi ise gerçekleşen puzolanik reaksiyonun stabilize edilmiş malzemedeki kil minerallerini azaltması ve buna bağlı olarak daha düşük pik yoğunluklarının oluşmasına yol açmasıdır. Benzer sonuçlar literatürdeki çalışmalarda (Ghosh ve Subbarao 2001; Sezer vd. 2006; Modarres ve Nosoudy 2015) da gözlenmiştir.

### **5.9.3 XRF Bulgularının Karşılaştırılması**

Tez çalışması kapsamında seçili karışımlar üzerinde XRF analizleri yapılmıştır. Çizelge 5.11'de düşük plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait XRF sonuçları sunulmuştur.

**Çizelge 5.11** Düşük plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait XRF sonuçları.

Bileşenler	KARIŞIMLARDA BULUNAN BİLEŞENLERİN YÜZDESİ			
	S	S5L	S30FA	S30FA5L
SiO <sub>2</sub>	58.430	55.158	57.844	56.932
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.420	30.933	31.784	27.919
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.721	3.800	4.758	5.075
CaO	0.000	6.1180	0.706	3.236
SO <sub>3</sub>	0.0369	0.0976	0.287	0.339
MgO	0.919	1.063	1.146	1.192
K <sub>2</sub> O	3.227	2.724	2.902	2.676
TiO <sub>2</sub>	2.070	0.000	0.000	2.062

Sonuçlar incelendiğinde katkısız zemin ve tüm karışımların ortak özelliğinin her birinde majör bileşen olarak SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulunmasıdır. Üç majör bileşenin toplamı, katkısız zeminde % 93.57, S5L karışımında % 89.89, S30FA karışımında % 94.39 ve S30FA5L karışımında % 89.93 olarak bulunmuştur. Zemine eklenen katkıları neticesinde kalsiyum oksit (CaO) miktarında artışlar meydana gelmiştir. Katkısız zemin numunesi CaO içermezken, S5L kodlu karışımında % 6.118, S30FA kodlu karışımında % 0.706 ve S30FA5L kodlu karışımında % 3.236 oranında CaO olduğu tespit edilmiştir. Dikkat çekici sonuçlardan birisi katkısız zeminde % 2.070 oranında bulunan TiO<sub>2</sub> bileşeninin S5L ve S30FA kodlu karışımlarda tamamen sıfıra inerken S30FA5L kodlu karışımında yeniden % 2.062 oranında bulunmasıdır.

Çizelge 5.12'de yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait XRF sonuçları sunulmuştur.

**Çizelge 5.12** Yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait XRF sonuçları.

Bileşenler	KARIŞIMLARDA BULUNAN BİLEŞENLERİN YÜZDESİ			
	B	B5L	B30FA	B30FA5L
SiO <sub>2</sub>	65.748	57.826	60.289	57.603
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.418	15.515	18.134	17.179
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.783	8.080	8.438	8.638
CaO	0.000	9.205	4.469	7.594
SO <sub>3</sub>	0.609	0.732	0.852	0.911
MgO	3.161	3.012	2.748	2.678
K <sub>2</sub> O	1.487	1.302	1.766	1.733
TiO <sub>2</sub>	0.000	1.162	0.000	1.138
Na <sub>2</sub> O	3.591	2.860	2.771	2.360

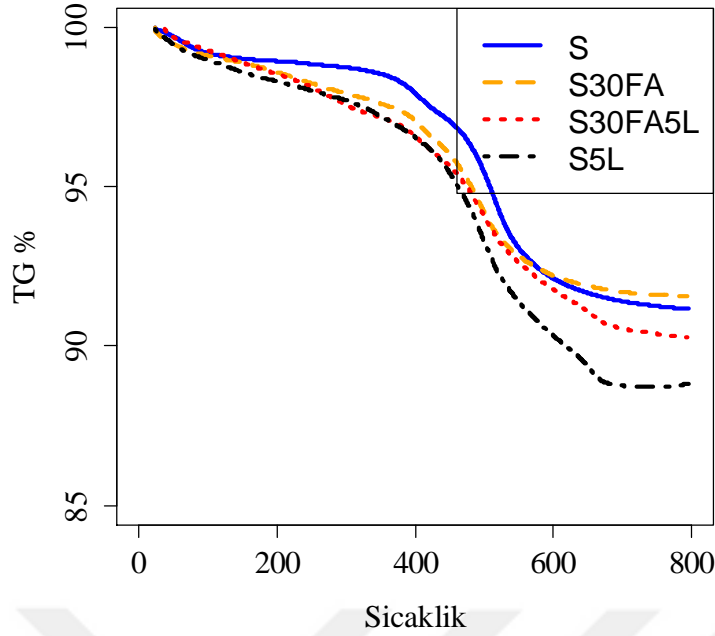
Sonuçlar incelendiğinde katkısız zemin ve tüm karışımların ortak özelliğinin her birinde majör bileşen olarak SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulunmasıdır. Üç majör bileşenin toplamı, katkısız zeminde % 90.95, B5L karışımında % 81.42, B30FA karışımında % 86.86 ve B30FA5L karışımında % 83.42 olarak bulunmuştur. Zemine eklenen katkıları neticesinde kalsiyum oksit (CaO) miktarında artışlar meydana gelmiştir. Katkısız zemin numunesi CaO içermezken, B5L kodlu karışımında % 9.205, B30FA kodlu karışımında % 4.469 ve B30FA5L kodlu karışımında % 7.594 oranında CaO olduğu tespit edilmiştir. Dikkat çekici sonuçlardan birisi katkısız zemin ve B30FA kodlu karışımında bulunmayan TiO<sub>2</sub> bileşeninin B5L karışımında % 1.162 ve B30FA5L kodlu karışımında % 1.138 oranında bulunmasıdır.

#### 5.9.4 TGA Bulgularının Karşılaştırılması

DeneySEL süreci tamamlanan seçili karışımlar (S, S30FA, S30FA5L, S5L, B, B30FA, B30FA5L, B5L, uçucu kül ve kireç) üzerinde artan sıcaklığa bağlı kütle kaybını incelemek ve bu sayede numunelerin termogravimetrik davranışını tespit etmek amacıyla Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda Termogravimetrik Analiz (TGA) yapılmıştır. Burada, katkısız zemin numuneleri, kireç ve uçucu kül küre tabii tutulmadan, karışımlar ise 28 gün kür süresi uygulandıktan sonra analiz edilmiştir. Konu ile ilgili literatür incelendiğinde yapılan TGA analizlerinde analizin bitirildiği en son sıcaklık değerinin 650 ile 1000 arasında olduğu görülmektedir (Al-Mukhtar vd. 2012; Sharma vd. 2012; Cheng ve Heidari 2017; Lorentz vd. 2018; Chaudhuri vd. 2020).

Kil fraksiyonlarında 100 dereceye kadar olan kütle kaybı suyun buharlaşmasından dolayıdır. Kütle kaybı 375-500 derece arasında artmaktadır (White vd. 2005). 450 derece ve 600 derece arasında montmorillonitin dehidroksilasyonundan (bir bileşiğin yapısındaki –OH hidroksil iyonlarının ısıtmaya bağlı olarak kaybolması) meydana gelen ani ağırlık azalışı katkısız zeminde stabilize edilmiş kile göre daha azdır. Uçucu kül ve kireç katkılı zeminde oluşan keskin pik düşüşleri, serbest kalan CO<sub>2</sub> ve CaO'e ayrılan reaksiyona girmemiş sönmüş (hidrate) kalsiyum karbonatı ve bu yüzden artan ağırlık kaybını açıklamaktadır (Sharma vd. 2012).

Düşük plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait TGA analiz sonuçlarının verildiği Şekil 5.43 incelendiğinde sıcaklık 800°C'ye ulaştığında kütle kayıpları % 8.46 ile % 11.18 arasında değişmektedir.



**Şekil 5.43** S zemin ve karışımlarına ait TGA analiz sonuçları.

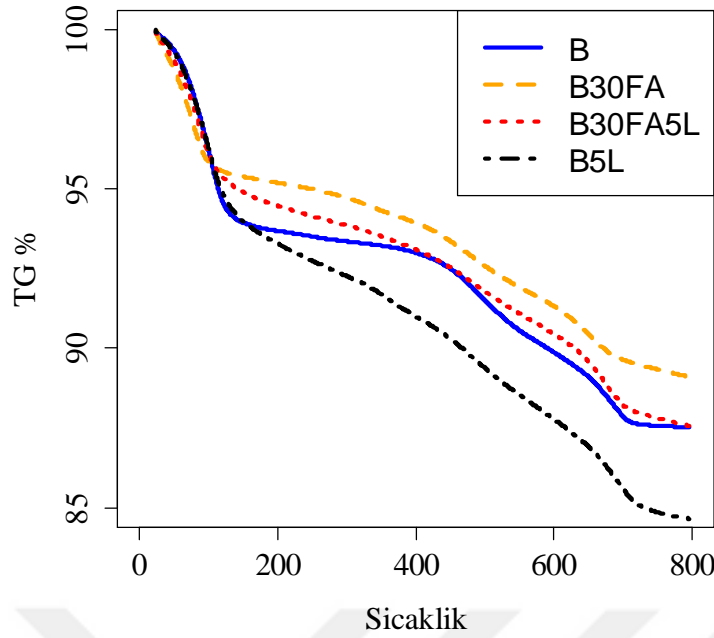
S zeminde kütle kaybı % 8.84 düzeyinde iken S30FA kodlu karışımda kütle kaybı azalarak % 8.46 seviyesinde olmuştur. S30FA5L kodlu karışımda kütle kaybı artarak % 9.76 olurken, en yüksek kütle kaybı S5L kodlu karışımda % 15.36 seviyesinde gerçekleşmiştir. S zeminde sıcaklığın 105-440 °C olduğu bölgede önemli bir kütle değişimi yok iken, S30FA, S30FA5L ve S5L karışımlarında ilgili sıcaklık aralığında kütle azalımı devam etmiştir. Bu bölgede kalsiyum silika hidratlarına (C-S-H) bağlı olarak kütle kaybı olduğu bilinmektedir (Mackenzie 1970). Kireçli karışımlarda (S30FA5L ve S5L) sıcaklığın 440-580°C olduğu bölümde ise mineral yapısındaki portlanditin kristal yapısında bozuşma (decomposition) oluşmaktadır. Bu bozuşmaya bağlı olarak kütle kaybı yaşanmıştır. CL zemine ait eğim 600°C'den, S30FA numunesinin eğimi de 550°C'den sonra azalmış ve eğri yataylaşmaya başlamıştır. Fakat S30FA5L ve S5L karışımlarında içerdikleri CaCO<sub>3</sub> mineralin kristal yapısındaki bozuşma yaklaşık olarak 580-700°C arasındaki bölgede gerçekleştiği için ilgili karışımlara ait eğimin azalıp yataylaşmaya başlaması yaklaşık 700 dereceden sonra gerçekleşmiştir. Literatürdeki çalışmalarda da CaCO<sub>3</sub> mineralinin bozduğu sıcaklık aralığının 580-800°C arasındaki bölgede olduğu not edilmiştir (Wang vd. 2004; Horpibulsuk vd. 2012).

Yüksek plastisiteli killi zemin ve karışımlarına ait TGA analiz sonuçları Şekil 5.44'de sunulmuştur. Sıcaklık 800°C'ye ulaştığında kütle kayıpları % 10.94 ile % 15.36 arasında değişmektedir. B zeminde kütle kaybı % 12.49 düzeyinde iken B30FA kodlu karışımda kütle

kaybı azalarak % 10.94 seviyesinde olmuştur. B30FA5L kodlu karışımda kütle kaybı B zemin ile aynı olurken B5L karışımında kütle kaybı artarak % 15.36 seviyesine ulaşmıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan B zeminde ilk ağırlık kaybı 200 derecenin altında iken % 6.3 ve ikinci ağırlık kaybı da 700 derecenin altında % 6.2 olmuştur. 800 dereceye kadar toplam kayıp % 12.5 olmuştur. İlgili kayıp miktarları ve grafiğin değişimi literatürdeki yayınlara benzemektedir (Ourari vd. 2018; Priyadharshini vd. 2019). Ourari vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada montmorillonitte ilk ağırlık kaybı 200°C'nin altında % 6 civarında gerçekleşmiştir. Bu kayıp adsorbe suyun serbest kalmasını temsil etmektedir. İkinci ağırlık kaybı ise 700°C'nin altında % 4.5 olmuştur. Bu durum ise silika yapısındaki oktahedral levhanın dehidroksilasyonundan kaynaklanmaktadır. 800 dereceye kadar toplam kayıp % 10.5 olmuştur. Maubec vd. (2017) çalışmasında, zemine eklenen % 4 kireç katkısı ile gerçekleştirdiği TGA analizinde kütle kaybı, 98 gün kür süresi ve 800°C sıcaklıkta % 11 olarak bulunmuştur. Priyadharshini vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada montmorillonit numunesine yapılan TGA analizinde kütle kaybı aynı sıcaklıkta yaklaşık % 16 olarak tespit edilmiştir. Kaybın bu kadar az olması da montmorillonitin yüksek ısıya karşı dayanıklılık gösterdiğine işaret etmektedir. Katkısız zeminde 450-600 derece arasında oluşan ağırlık kaybı alümina ve silikanın oktahedral ve tetrahedral yapısındaki ayarlamalar sonucunda montmorillonitin kristal yapısında meydana gelen bozulmadan dolayıdır (Peethamparan vd. 2009).

Literatür birlikte değerlendirildiğinde montmorillonitin TGA analizinde sıcaklık 800°C olduğunda kütle kaybının % 10- % 16 arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında B zemin için bulunan değer (% 12.5) de ilgili aralığa girmektedir.



**Şekil 5.44** B zemin ve karışımlarına ait TGA analiz sonuçları.

B5L kodlu karışıma ait TGA grafiği incelendiğinde sıcaklık 150°C'ye ulaştıktan sonra 150-700 derece arasındaki bölgede hızlı bir kütle azalımı gözlenmektedir. Bu bölgede gerek montmorillonitin kristal yapısındaki bozuşmalar-parçalanmalar, gerekse C-S-H, portlandit ve kalsit mineralindeki bozuşmalar neticesinde kütle kaybı hızlanmıştır. CH zemine ait hidratlı faz (C-S-H) bulunmadığı için sıcaklığın 105-440 derece olduğu bölgede grafik yaklaşık olarak yatay seyretmiş ve önemli bir kütle kaybı gözlenmemiştir. Zemine eklenen % 30 uçucu kül katkısının ilgili bölgedeki yataylığı biraz değiştirdiği ve kütle kaybının katkısız zemine göre arttığı görülmektedir. Bu duruma, XRF sonucunda da görüldüğü gibi uçucu külün içerisinde bulunan kalsiyum oksitin yol açtığı değerlendirilmiştir. B30FA5L numunesinde ilgili bölge için grafiğin eğiminde artış olmuş, B5L numunesinde ise eğimdeki artış dikkat çekici bir düzeye ulaşmıştır. Eğimdeki artışlar da XRF analizi sonucunda her numunenin içerdiği CaO yüzdesi ile tutarlılık göstermiştir.



## BÖLÜM 6

### DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

#### 6.1 DEĞERLENDİRME

Düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli killi zemine eklenen uçucu kül ve kireç karışımlarının ilgili zeminlerin mühendislik özelliklerini nasıl değiştirdiği hem deneylerden elde edilen sonuçlar ile hem de mikro analizler ile yorumlanmıştır. Yapılan tüm değerlendirmelerde zeminlerin kürsüz durumu referans alınmıştır. Dayanım deneylerinde ise, deneyin tipine bağlı olarak kür süresinde değişme olmakla birlikte BS EN 14227-14 (2006) ve BS EN 14227-11 (2006) standartlarında belirtilen detaylara dikkat edilmiştir. Tüm bu faktörler göz önüne alınarak aşağıda madde madde belirtilen özet sonuçlara ulaşılmıştır.

- Uçucu kül katkılı karışımlar arasında düşük plastisiteli killi zemine ait serbest basınç dayanımı en yüksek değeri 28 gün kür süresinde S30FA karışımında elde edilmiştir. Yüksek plastisiteli kilde ise en yüksek serbest basınç dayanımlar B10FA ve B30FA karışımlarında çıkmıştır. B10FA ve B30FA kodlu karışımında serbest basınç dayanımları birbirine yakın çıkmıştır. Uçucu kül içermeyen kireçli karışımlarda ise en yüksek dayanım 28 gün kür süreli S7L ve B7L karışımında elde edilmiştir. Hem kireç hem de uçucu kül içeren karışımlarda ise aynı kür süresinde en yüksek değerler S30FA5L ve B30FA7L karışımlarında tespit edilmiştir. Tüm karışımlar arasında en yüksek dayanımlar hem S hem de B zemin için uçucu kül-kireç katkılı karışımlarda elde edilmiştir. Buna göre serbest basınç dayanımı açısından **S30FA5L** ve **B30FA7L** karışımları optimum karışımlardır.
- Kür süresi ile hem S zemine hem de B zemine ait tüm karışımların serbest basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. Uçucu kül katkılı karışımlarda dayanım ilk 7 günlük kür süresinde daha hızlı artar iken, 7. günden sonra artış hızı yavaşlamıştır.
- Donma-çözülme sonrası serbest basınç dayanımı açısından S zemin grubunda **S30FA5L** ve B zemin grubunda **B5L** karışımları en yüksek dayanımı vermiştir. S5L,

S30FA5L, B30FA5L ve B5L karışımlarının artan donma-çözülme çevrimleri ile dayanımları önce artıp (ilk 4 çevrime kadar) sonra azalan bir eğilim göstermiş iken S zemini, B zemini, S30FA ve B30FA karışımlarının dayanımları ise artan çevrim ile sürekli azalmıştır.

- Kireç içermeyen uçucu kül katkılı karışımlar arasında S ve B zeminlerin dolaylı çekme dayanımları en yüksek değerlerine 28 gün kür süresinde S30FA ve B30FA kodlu karışımlarında ulaşmışlardır. Uçucu kül içermeyen kireçli karışımlarda ise en yüksek dayanım 28 gün kür süreli S3L ve B3L karışımında elde edilmiştir. Hem kireç hem de uçucu kül içeren karışımlarda aynı kür süresinde en yüksek değerler S30FA3L ve B30FA7L karışımlarında tespit edilmiştir. Tüm karışımlar arasında en yüksek dayanımlar hem S hem de B zemin için uçucu kül-kireç katkılı karışımlarda elde edilmiştir. Buna göre dolaylı çekme deneyi açısından **S30FA3L** ve **B30FA7L** karışımları optimum karışımlardır.
- S ve B zeminlerinin CBR performansı, standartlar tarafından yeterli görünen seviyede değildir. Eklenen F tipi uçucu kül katkısı, tüm karışım oranları için geçerli olmak üzere her iki zeminin CBR değerini bir miktar yükseltse de Karayolları Teknik Şartnamesi açısından dolgu malzemesi olarak kullanılma koşulunu sağlamaktan oldukça uzaktır. Kireç + zemin karışımlarında ise S5L, S7L, B5L ve B7L karışımları ilgili şartnamede CBR açısından yol dolgusu olma yeterliliğine sahiptirler ( $CBR \geq \% 15$ ). S3L ve B3L karışımları ise  $\% 15$  sınır değerini geçememişlerdir. Uçucu kül-kireç içeren karışımların hepsi her iki zemin grubu için CBR açısından ön görülen minimum değeri fazlasıyla geçmişlerdir. Düşük plastisiteli killi zemin grubunda S30FA5L ve S30FA7L karışımlarının CBR değerleri birbirine yakındır. Yüksek plastisiteli killi zemin grubunda ise B30FA5L ve B30FA7L karışımlarına ait CBR değerleri oldukça yakındır. Bu durumda gerek ekonomik gerekse şartname (KTŞ) tarafından belirtilen şartı sağlaması açısından **S30FA5L** ve **B30FA5L** CBR açısından optimum karışımlar olarak belirlenmiştir.
- S ve B zeminlerinin lineer şişmesi açısından ele alınması durumunda eklenen uçucu kül katkısı ile şişme değerlerinde azalma olsa da Karayolları Teknik Şartnamesi açısından ifade edilen minimum şişme değerlerine her iki zemin grubunda da ulaşamamıştır ( $> \% 2$ ). Kireç ilavesi ile tüm karışımlar (S3L, S5L, S7L, B3L, B5L ve B7L) ilgili şartnamede belirtilen kireç stabilizasyonu sonrası karışımın şişme değerinin  $\% 2$ 'den az olması gerekliliğine uymuştur. Uçucu kül- kireç içeren karışımlar yorumlandığında ise hem S zemin hem de B zemin grubu açısından tüm karışımlarda şişmenin çok ciddi

miktarda azaldığı gözlenmiştir. Düşük plastisiteli killi zemin grubunda S30FA5L ve S30FA7L ile yüksek plastisiteli killi zemin grubundaki B30FA5L ile B30FA7L karışımlarının şişme değerleri birbirine çok yakındır. Tüm karışımlar değerlendirildiğinde ekonomik yönden ve lineer şişme performansı açısından değerlendirildiğinde **S30FA5L** ve **B30FA5L** optimum karışımlar olarak belirlenmiştir.

- Bu çalışmada kullanılan zeminlere eklenen sadece uçucu kül, sadece kireç ve hem kireç-hem uçucu kül katkılı karışımlar ilgili zeminlerin IBI ve MCV değerlerini artırmıştır. Hem S hem de B zeminde kireç içermeyen uçucu kül katkılı karışımlar arasında S30FA ve B30FA karışımları IBI ve MCV açısından en yüksek dayanıma sahiptirler. Kireç katkılı karışımlarda ise IBI deneyinde S5L ve B5L, MCV deneyinde S7L ve B5L karışımları en yüksek değerdedir. Hem uçucu kül hem kireç içeren karışımlarda ise S30FA5L ve B30FA5L karışımlarında IBI ve MCV maksimum seviyesine ulaşmıştır. Tüm karışımlar toplu olarak değerlendirildiğinde **S30FA5L** ve **B30FA5L** karışımları hem IBI hem de MCV deneyi açısından optimum karışımlar olarak ortaya çıkmıştır.
- SEM, XRD, XRF ve TGA analizleri toplu olarak değerlendirildiğinde sadece kireç ve hem kireç hem uçucu kül katkılı karışımların (S5L, B5L, S30FA5L ve B30FA5L zeminlerin dayanım özelliklerini artırdıkları mikro yapıda da gözlenmiştir.) SEM analizinde, partiküller arası kenetlenme artarak C-S-H jelleri oluşmaya başlamıştır. XRD analizi sonucunda C-S-H pikleri belirginleşmiştir. TGA analizlerinde ise zeminlerin zayıf bölgelerindeki kırılmalar ile kütle azalışları daha hızlı olmuştur. XRF analizinde de çimentolaşma etkisinin göstergesi olan CaO miktarları dayanım artışının belirtilerindedir. Mikro analizlere ait sonuçlar yorumlandığında elde edilen sonuçların dayanım deneyleri için yapılan değerlendirmeler ile tutarlılık gösterdiği kanaatine varılmıştır. SEM, XRD, XRF ve TGA analizleri toplu olarak değerlendirildiğinde sadece kireç ve hem kireç hem uçucu kül katkılı karışımların (S5L, B5L, S30FA5L ve B30FA5L zeminlerin dayanım özelliklerini artırdıkları mikro yapıda da gözlenmiştir.) SEM analizinde, partiküller arası kenetlenme artarak C-S-H jelleri oluşmaya başlamıştır. XRD analizi sonucunda C-S-H pikleri belirginleşmiştir. TGA analizlerinde ise zeminlerin zayıf bölgelerindeki kırılmalar ile kütle azalışları daha hızlı olmuştur. XRF analizinde de çimentolaşma etkisinin göstergesi olan CaO miktarları dayanım artışının belirtilerindedir. Mikro analizlere ait sonuçlar yorumlandığında elde edilen sonuçların dayanım deneyleri için yapılan değerlendirmeler ile tutarlılık göstermiştir.

Yukarıda her deney için ayrı ayrı bahsedilen sonuçlar Çizelge 6.1'de özet olarak sunulmuştur. Buna göre her iki zemin grubu için de % 30 uçucu kül ve % 5 kireç içeren S30FA5L ve B30FA5L'nin optimum karışımlar olduğu değerlendirilmesine varılmıştır.

**Çizelge 6.1** Dayanım deneyleri sonucu elde edilen optimum karışımlar.

Deney Adı	Optimum Karışım	
	S Zemin	B Zemin
Serbest Basınç	S30FA5L	B30FA7L
Donma-Çözülme Sonrası Serbest Basınç	S30FA5L	B5L
Dolaylı Çekme	S30FA3L	B30FA7L
Kaliforniya Taşıma Oranı	S30FA5L	B30FA5L
Lineer Şişme	S30FA5L	B30FA5L
Nemlilik Şartları	S30FA5L	B30FA5L
Ani Taşıma İndeksi	S30FA5L	B30FA5L

## 6.2 ÖNERİLER

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar doğrultusunda gelecek çalışmalara yönelik hususlar aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- Daha yüksek uçucu kül katkı oranları (% 40, % 50, % 60 vb.) denenerek bu tez çalışmasındaki deneyler tekrarlanıp, mevcut sonuçlar ile karşılaştırılmalıdır.
- Farklı sınıfta uçucu küller (C sınıfı ve F sınıfı) ile zemin sayısı daha çok artırılarak çalışma derinleştirilmelidir.
- Mikro yapıya kür süresinin etkisinin de incelenmesi amacıyla farklı kür sürelerinde mikro analizler gerçekleştirilmelidir.
- Aynı zeminlere, farklı katkıları kullanılarak aynı deneyler yapılmak sureti ile bulunan sonuçlar, uçucu kül ve kireç katkılı karışımlar ile birlikte değerlendirilmelidir.
- Çevresel etki faktörleri de incelenerek araştırmaya dahil edilmelidir.

## KAYNAKLAR

- ACAA** (2013) Coal Combustion Product (CCP) Production & Use Survey Report, American Coal Ash Association.
- Aksoy H S, Yılmaz M, Akarsu E E** (2006) Killi Bir Zeminin C Sınıfı Uçucu Kül Kullanılarak Stabilizasyonu, ZMTM 11. Ulusal Kongresi, 7-8 Eylül 2006, Trabzon, Türkiye, 173-177.
- Aldood A, Bouasker M ve Al-Mukhtar M** (2014) Impact of Freeze–Thaw Cycles on Mechanical Behaviour of Lime Stabilized Gypseous Soils. *Cold Regions Science and Technology*, 99: 38-45.
- Al-Mukhtar M, Khattab S and Alcover J F** (2012) Microstructure and Geotechnical Properties of Lime-Treated Expansive Clay Soil. *Engineering Geology*, 139-140: 17-27.
- Alkaya D** (2002) Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin Stabilitesine Etkisi. *Doktora Tezi*, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 204 s.
- Altun S, Sezer A and Erol A** (2009) The Effects of Additives and Curing Conditions on The Mechanical Behavior of a Silty Soil. *Cold Regions Science and Technology*, 56: 135-140.
- Amadi A A and Okeiyi A** (2017) Use of Quick and Hydrated Lime in Stabilization of Lateritic Soil: Comparative Analysis of Laboratory Data. *International Journal of Geo-Engineering*, 8 (3): 1-13.
- Arora S and Aydilek A H** (2005) Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17 (6): 640-649.
- ASCE** (1978) *Soil Improvement: History, Capabilities and Outlook*. Report by the Committee on Placement and Improvement of Soils, Geotechnical Engineering Division. ASCE, 182 p
- ASTM C618-19** (2019) Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM D560/D560M-16** (2016) Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM D698-12e2** (2012) Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)), *Annual Book of ASTM Standards*.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- ASTM D1883-16** (2016) Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM D4609-08** (2008) Standard Guide for Evaluating Effectiveness of Admixtures for Soil Stabilization, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM D6276-19** (2019) Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization, *Annual Book of ASTM Standards*.
- Atanur A** (1971) *Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Vasıfları ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması*, Bayındırlık Bakanlığı, KGM Yayınları, Ankara, 219 s.
- Ataşalar O, Canatan O, Monkul M M ve Aksoy, Y Y** (2015) İzmir Körfezi Tarama Zemininin Kireç ve Uçucu Kül ile Stabilizasyonu, 6. Geoteknik Sempozyumu, 26-27 Kasım 2015, Adana, Türkiye, 679-687.
- Athanasopoulou A** (2014) Addition of Lime and Fly Ash to Improve Highway Subgrade Soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26 (4): 773-775.
- Behera B and Mishra M K** (2012) California Bearing Ratio and Brazilian Tensile Strength of Mine Overburden–Fly Ash–Lime Mixtures for Mine Haul Road Construction. *Geotech Geol Eng*, 30: 449-459.
- Bell F G** (1996) Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils. *Engineering Geology*, 42: 223-237.
- Bergado D T, Anderson L R, Miura N and Balasubramaniam A S**(1996) *Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments*, ASCE Press, New York, 427 p.
- Bin-Shafique S, Rahman K, Yaykiran M and Azfar I** (2010) The Long-Term Performance of Two Fly Ash Stabilized Fine-Grained Soil Subbases. *Resources, Conservation and Recycling*, 54: 666-672.
- Brooks R, Udoeyo F F and Takkalapelvi K V** (2011) Geotechnical Properties of Problem Soils Stabilized with Fly Ash and Limestone Dust in Philadelphia. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (5): 711-716.
- BS EN 459-1** (2010) Building Lime Part 1: Definitions, Specifications and Conformity Criteria, *BSI Standard Publications* British Standard.
- BS EN 13286-41** (2003) Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 41: Test Method for the Determination of the Compressive Strength of Hydraulically Bound Mixtures, *BSI Standard Publications* British Standard.
- BS EN 13286-42** (2003) Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 42: Test Method for the Determination of the Indirect Tensile Strength of Hydraulically Bound Mixtures, *BSI Standard Publications* British Standard.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- BS EN 13286-46** (2003) Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 46: Test Method for the Determination of the Moisture Condition Value, *BSI Standard Publications* British Standard.
- BS EN 13286-47** (2012) Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 47: Method for the Determination of California Bearing Ratio, Immediate Bearing Index and Linear Swelling, *BSI Standard Publications*, British Standard.
- BS EN 13286-50** (2004) Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 50: Method for the Manufacture of the Test Specimens of Hydraulically Bound Mixtures Using Proctor Equipment or Vibrating Table Compaction, *BSI Standard Publications*, British Standard.
- BS EN 14227-1** (2004) Hydraulically bound mixtures—Specifications—Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 1: Cement Bound Mixtures, *BSI Standard Publications*, British Standard.
- BS EN 14227-2** (2004) Hydraulically bound mixtures—Specifications—Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 2: Slag Bound Mixtures, *BSI Standard Publications*, British Standard.
- BS EN 14227-3** (2004) Hydraulically bound mixtures—Specifications—Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 3: Fly Ash Bound Mixtures, *BSI Standard Publications*, British Standard.
- BS EN 14227-4** (2004) Hydraulically bound mixtures—Specifications—Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 4: Fly Ash for Hydraulically Bound Mixtures, *BSI Standard Publications*, British Standard.
- BS EN 14227-5** (2013) Hydraulically bound mixtures—Specifications—Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 5: Hydraulic Road Binder Bound Granular Mixtures, *BSI Standard Publications*, British Standard.
- BS EN 14227-10** (2006) Hydraulically bound mixtures—Specifications—Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 10: Soil Treated by Cement, *BSI Standard Publications*, British Standard.
- BS EN 14227-11** (2006) Hydraulically bound mixtures—Specifications—Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 11: Soil Treated by Lime, *BSI Standard Publications*, British Standard.
- BS EN 14227-12** (2006) Hydraulically bound mixtures—Specifications—Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 12: Soil Treated by Fly Slag, *BSI Standard Publications*, British Standard.
- BS EN 14227-13** (2006) Hydraulically bound mixtures—Specifications—Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 13: Hydraulic Road Binder, *BSI Standard Publications*, British Standard.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- BS EN 14227-14** (2006) Hydraulically bound mixtures—Specifications—Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 14: Soil Treated by Fly Ash, *BSI Standard Publications*, British Standard.
- BS EN 14227-15** (2014) Hydraulically bound mixtures—Specifications—Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 15: Hydraulically Stabilized Soils, *BSI Standard Publications*, British Standard.
- Cardoso F H S, Fernandes H, Pileggi R G, Cincotto M A and John V M** (2009) Carbide lime and industrial hydrated lime characterization. *Powder Technology*, 195 (2): 143-149.
- Celauro B, Bevilacqua A, Bosco D L and Celauro C** (2012) Design Procedures for Soil-Lime Stabilization for Road and Railway Embankments Part 2- Experimental Validation. *Procedia Engineering*, 53: 568-579.
- Chaudhuri S D, Mandal A, Dey A and Chakrabarty D** (2020) Tuning the Swelling and Rheological Attributes of Bentonite Clay Modified Starch Grafted Polyacrylic Acid Based Hydrogel. *Applied Clay Science*, 185: 105405.
- Cheng K and Heidari Z** (2017) Combined Interpretation of NMR And TGA Measurements to Quantify the Impact of Relative Humidity on Hydration of Clay Minerals. *Applied Clay Science*, 143: 362-371.
- Cheshomi A, Eshaghi A and Hassanpour J** (2017) Effect of Lime and Fly Ash on Swelling Percentage and Atterberg Limits of Sulfate-Bearing Clay. *Applied Clay Science*, 135: 190-198.
- Cömert A T ve Fırat S** (2008) F Tipi Uçucu Kül ve Çimento ile Stabilize Edil Zeminlerde Kür Süresinin Taşıma Gücü Üzerine Etkileri, ZMTM 12. Ulusal Kongresi, 16-17 Ekim 2008, Konya, Türkiye, 849-858.
- Cui Z D, He P P and Yang W H** (2014) Mechanical Properties of a Silty Clay Subjected to Freezing–Thawing. *Cold Regions Science and Technology*, 98: 26-34.
- Çetin B, Aydılek A H, and Güney Y** (2010) Stabilization of Recycled Base Materials with High Carbon Fly Ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 54: 878-892.
- Çokça E** (2001) Use of Class C Fly Ashes for the Stabilization of an Expansive Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (7): 568-573.
- Das B M and Sobhan K** (2014) *Principles of Geotechnical Engineering*, 8th edition, Cengage Learning, Stamford, 374 p.
- Das S K and Yudbir** (2005) Geotechnical Characterization of Some Indian Fly Ashes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17 (5): 544-552.
- Dash S K and Hussain M** (2012) Lime Stabilization of Soils: Reappraisal. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24 (6): 707-714.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Davitt S** (1984) The Use of the Moisture Condition Test in Assessing Soils for Roadworks, Dublin, 46 p.
- Dayıoğlu M, etin B and Nam S** (2017) Stabilization of Expansive Belle Fourche Shale Clay With Different Chemical. *Applied Clay Science*, 146: 56-69.
- Değirmenci N, Okucu A and Turabi A** (2007) Application of Phosphogypsum in Soil Stabilization. *Building and Environment*, 42: 3393-3408.
- Deepak M S, Rohini S, Harini B S and Ananthi G B G** (2021). Influence of the Fly Ash on the Engineering Characteristics of Stabilized Clay Soil. *Materials Today: Proceedings*, 37, 2014-2018.
- Dermatas D and Meng X** (2003). Utilization of Fly Ash for Stabilization/Solidification of Heavy Metal Contaminated Soils. *Engineering Geology*, 70 (3-4), 377-394.
- Diallo M L and Unsever Y S** (2019). Stabilization of Clay Soils Using Fly Ash. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 2 (3), 81-87.
- Edil T B, Acosta H A and Benson C H** (2006) Geotechnical Characterization of Some Indian Fly Ashes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (2): 283-294.
- EİE** (1979) *Türkiye Uucu Küllerinin zellikleri ve Kullanım zellikleri*, E.İ.E. Genel Yayın Direktörlüğü, Ankara.
- Eskişar T, Altun S and Kalıpcılar İ** (2015) Assessment of Strength Development and Freeze–Thaw Performance of Cement Treated Clays at Different Water Contents. *Cold Regions Science and Technology*, 111: 50-59.
- Ferguson G** (1993) Use of Self-Cementing Fly Ashes as a Soil Stabilization Agent, *ASCE Geotechnical Special Publication*, 36.
- Ferguson G and Levorson S M** (1999) *Soil and Pavement Base Stabilization with Self-Cementing Coal Fly Ash*, American Coal Ash Association, Virginia
- FHWA** (2003) *Geotechnical Aspects of Pavements*, Technical Report, Report No: FHWA-NHI-05-037, Washington.
- FHWA** (2006) *Fly Ash Facts for Highway Engineers*, Technical Report, Report No: FHWA-IF-03-019, Washington.
- Ghosh A and Subbarao C** (2001) Microstructural Development in Fly Ash Modified with Lime and Gypsum. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13 (1): 65-70.
- Ghosh A and Subbarao C** (2006) Tensile Strength Bearing Ratio and Slake Durability of Class F Fly Ash Stabilized with Lime and Gypsum. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (1): 18-27.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Ghosh A and Subbarao C** (2007) Strength Characteristics of Class F Fly Ash Modified with Lime and Gypsum. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (7): 757-766.
- Göktepe A B, Sezer A, Sezer G İ and Ramyar K** (2008) Classification of Time-Dependent Unconfined Strength of Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 22: 675-683.
- Güllü H and Khudir A** (2014) Effect of Freeze–Thaw Cycles on Unconfined Compressive Strength of Fine-Grained Soil Treated With Jute Fiber, Steel Fiber and Lime. *Cold Regions Science and Technology*, 106-107: 55-65.
- Halstead W J** (1986) *Use of Fly Ash in Concrete*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, 66 p.
- Hausmann M R** (1990) *Engineering Principles of Ground Modification*, International edition, ISBN: 0-07-027279-4, McGraw-Hill Publishing Company, Singapore, 632 p.
- Hicks R G** (2002) *Alaska Soil Stabilization Design Guide*, 1st edition, Oregon State University, Oregon, 49 p.
- Horpibulsuk S, Phetchuay C and Chinkulkijniwat A** (2012) Soil Stabilization by Calcium Carbide Residue and Fly Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24 (2): 184-193.
- Indraratna B** (1996) Utilization of Lime, Slag and Fly Ash for Improvement of a Colluvial Soil in New South Wales, Australia. *Geotechnical and Geological Engineering.*, 14: 169-191.
- Ingles O B and Metcalf J B** (1972) *Soil Stabilization Principles and Practices*, 1st edition, Butterworths, Sydney, 374 p.
- Jafer H, Atherton W, Sadique M, Ruddock F and Loffill E** (2018) Stabilisation of Soft Soil Using Binary Blending of High Calcium Fly Ash and Palm Oil Fuel Ash. *Applied Clay Science*, 152: 323-332.
- Jha A K and Sivapullaiah P V** (2017) Physical and Strength Development in Lime Treated Gypseous Soil with Fly Ash — Micro Analyses. *Applied Clay Science*, 145: 17-27.
- Jha A K and Sivapullaiah P V** (2018) Potential of Fly Ash to Suppress the Susceptible Behavior of Lime-Treated Gypseous Soil. *Soils and Foundations*, 58 (3): 654-665.
- Jongpradist P, Jumlongrach N, Youwai S and Chucheepsakul S** (2010) Influence of Fly Ash on Unconfined Compressive Strength of Cement-Admixed Clay at High Water Content. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22 (1): 49-58.
- Kamon M, Katsumi T and Sano Y** (2000) MSW Fly Ash Stabilized with Coal Ash For Geotechnical Application. *Journal of Hazardous Materials*, 76: 265-283.
- Kang X, Kang G C, Chang T K and Louis G** (2015) Chemically Stabilized Soft Clays for Road Base Construction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (7).

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kate J** (2005) Strength and Volume Change Behavior of Expansive Soils Treated with Fly Ash. *Innovations in Grouting and Soil Improvement*. pp. 1–15.
- Kavak A and Baykal G** (2012) Long-Term Behavior of Lime-Stabilized Kaolinite Clay. *Environ Earth Sci*. 66 1943-1955.
- Kezdi A** (1979) *Stabilized Earth Roads*, 1st edition, Elsevier Scientific Publishing Company, Budapest, 321 p.
- KGM** (2013) Karayolu Teknik Şartnamesi (Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üst Yapı ve Çeşitli İşler), *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara 421 s.
- Kolias S, Kasselouri-Rigopoulou V and Karahalios A** (2005) Stabilisation of Clayey Soils With High Calcium Fly Ash and Cement. *Cement & Concrete Composites*, 27: 301-313.
- Kumar B R P and Sharma R S** (2004) Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Expansive Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (7): 764-767
- Leelavathamma B, Mini K M and Pandian N S** (2005) California Bearing Ratio Behavior of Soil/Fly Ash Mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, 33 (6): 406-410.
- Lindh P and Winter M G** (2003) Sample Preparation Effects on the Compaction Properties of Swedish Fine-Grained Tills. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 36: 321-330.
- Little D N and Nair S** (2009) *Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials*. Final Report for NCHRP Project 20-07, Transportation Research Board, Texas, 57 p.
- Lorentz B, Shanahan N, Stetsko Y P and Zayed A** (2018) Characterization of Florida Kaolin Clays Using Multiple-Technique Approach. *Applied Clay Science*, 161: 326-333.
- Mackenzie R C** (1970) *Differential Thermal Analysis Volume 1*, 1st edition, Academic Press, London, 775 p.
- Mackiewicz S M and Ferguson E G** (2005) Stabilization of Soil with Self-Cementing Coal Ashes. *World of Coal Ash (WOCA)*, 1-7.
- Mahedi M, Çetin B and White D J** (2020) Cement, Lime and Fly Ashes in Stabilizing Expansive Soils: Performance Evaluation and Comparison. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32 (7): 04020177.
- Maslow A H** (1943). A Theory of Human Motivation. *Psychological Review*, 50 (4): 370–396.
- Matheson G D and Winter M G** (1997) *Transport Research Laboratory TRL 273 Use and Application of the MCA with Particular Reference to Glacial Tills*.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Maubec N, Deneele D and Ouvrard G** (2017) Influence of the Clay Type on the Strength Evolution of Lime Treated Material. *Applied Clay Science*, 137: 107-114.
- McCarthy M J, Csetenyi L J, Sachdeva A and Dhir R K** (2014) Engineering and Durability Properties of Fly Ash Treated Lime-Stabilised Sulphate-Bearing Soils. *Engineering Geology*, 174: 139-148.
- Misra A, Biswas D and Upadhyaya S** (2005) Physico-Mechanical Behavior of Self-Cementing Class C Fly Ash–Clay Mixtures. *Fuel*, 84: 1410-1422.
- Mitchell J K and Soga K** (2005) *Fundamentals of Soil Behavior*, 3rd edition, John Wiley & Sons, New Jersey, 537 p.
- Modarres A and Nosoudy Y M** (2015) Clay Stabilization Using Coal Waste and Lime- Technical and Environmental Impact. *Applied Clay Science*, 116-117: 281-288.
- Mraz V, Valentin J, Suda J and Kopecky L** (2015) Experimental Assessment of Fly-Ash Stabilized and Recycled Mixes. *Journal of Testing and Evaluation*, 43 (2): 264-278.
- Nalbantoğlu Z and Gucbilmez E** (2002) Utilization of an Industrial Waste in Calcareous Expansive Clay Stabilization. *Geotechnical Testing Journal*, 25 (1): 78-84.
- Nalbantoğlu Z** (2004) Effectiveness of Class C Fly Ash as an Expansive Soil Stabilizer. *Construction and Building Materials*, 18: 377-381.
- Nicholson P G** (2015) *Soil Improvement and Ground Modification Methods*, 1st edition, ISBN: 978-0-12-408076-8, Butterworth Heinemann, Oxford, 455 p.
- Qi J, Ma W and Song C** (2008) Influence of Freeze–Thaw on Engineering Properties of a Silty Soil. *Cold Regions Science and Technology*, 53: 397-404.
- Osinubi K J and Nwaivu C M O** (2006) Compaction Delay Effects on Properties of Lime-Treated Soil. *Journal of Materials and Civil Engineering*, 18 (2): 250-258.
- Ourari A, Tennah F, Rosas R R, Aggoun D and Morallon E** (2018) Bentonite Modified Carbon Paste Electrode as a Selective Electrochemical Sensor for the Detection of Cadmium and Lead in Aqueous Solution. *Int J. Electrochem Sci*, 13: 1683-1699.
- Pandian N S, Krishna K C and Sridharan A** (2001) California Bearing Ratio Behavior of Soil/Fly Ash Mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, 29 (2): 220-226.
- Parsons A W** (1978) Moisture Condition Test for Assessing the Engineering Behaviour of Earthwork Material. *Transport Road and Research Laboratory*, 169-175.
- Parsons, A W and Boden, J B** (1979) The Moisture Condition Test and its Potential Applications in Earthworks, *Transport and Road Research Laboratory*, (TRRL) Report.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Parsons R L and Kneebone E** (2005) Effect of Fly Ash on The Unconfined Compressive Strength of Black Cotton Soil. *Ground Improvement*, 9 (1): 33-38.
- Peethamparan S, Olek J and Diamond S** (2009) Mechanism of Stabilization of Na-Montmorillonite Clay with Cement Kiln Dust. *Cem. Concr. Res.*, 33 (7): 580–589.
- Petry T M and Little D N** (2002) Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures—History, Practice and Future. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14 (6): 47-60.
- Kumar B R P and Sharma R S** (2004) Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Expansive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering: An International Journal*, 130 (7) : 764-767.
- Phanikumar B R** (2009) Effect of Lime and Fly Ash on Swell, Consolidation and Shear Strength Characteristics of Expansive Clays: A Comparative Study. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 4 (2) : 175-181.
- Priyadarshee A, Kumar A, Gupta D and Pushkarna P** (2018) Compaction and Strength Behavior of Tire Crumbles–Fly Ash Mixed with Clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30 (4): 1-9.
- Priyadharshini P, Ramamurthy and Robinson R G** (2019) Influence of Temperature and Duration of Thermal Treatment on Properties of Excavated Soil as Fine Aggregate in Cement Mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31 (8).
- Raj P P** (2005) *Ground Improvement Techniques*, 1st edition, Laxmi Publications, New Delhi, 266 p.
- Sahu B K** (2001) Improvement in California Bearing Ratio of Various Soils in Botswana by Fly Ash. International Ash Utilization Symposium, University of Kentucky.
- Santos F, Lin L, Yadong L and Amini F** (2011). Geotechnical Properties of Fly Ash and soil mixtures for use in highway embankments. *World of Coal Ash Conference*, Denver, USA 9/12 May 2011.
- Saride S and Dutta T T** (2016) Effect of Fly-Ash Stabilization on Stiffness Modulus Degradation of Expansive Clays. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (12): 1-12.
- Sear L K A** (2001) *Properties and Use of Coal Fly Ash*, Thomas Thelford, London, 261 p.
- Seco A, Ramirez F, Miqueleiz L and Garcia B** (2011) Stabilization of Expansive Soils for Use in Construction. *Applied Clay Science*, 51: 348-352.
- Sezer A, Inan G, Yilmaz H R and Ramyar K** (2006) Utilization of a Very High Lime Fly Ash for Improvement of Izmir Clay. *Building and Environment*. 41:106-155.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Sharma N K, Swain S K and Sahoo U C** (2012) Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro Level Investigation. *Geotech Geol Eng*, 30: 1197-1205.
- Solanki P, Khoury N and Zaman M M** (2009) Engineering Properties and Moisture Susceptibility of Silty Clay Stabilized with Lime, Class C Fly Ash and Cement Kiln Dust. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21 (12): 749-757.
- Sridharan A, Prashanth J P and Sivapullaiah P V** (1997) Effect of Fly Ash on The Unconfined Compressive Strength of Black Cotton Soil. *Ground Improvement*, 1: 169-175.
- Stehlik D, Dasek O, Hyzl P, Coufalik P, Krcmova I and Varaus M** (2015) Pavement Construction Using Waste Building Material – From Model a Theory. *Road Materials and Pavement Design*, 6 (S1): 314-329.
- Şenol A ve Edil T B** (2004) Uçucu Kül ile Stabilize Edilen Yumuşak Zeminlerin CBR Sonuçlarının Değerlendirilmesi, ZMTM 10. Ulusal Kongresi, 16-17 Eylül 2004, İstanbul, Türkiye, 275-280
- Şenol A, Edil T B, Bin-Shafique M S, Acosta H A and Benson C H** (2006) Soft Subgrades' Stabilization by Using Various Fly Ashes. *Resources, Conservation and Recycling*, 46: 365-376.
- Tan O ve İyisan R** (1996) Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu, ZMTM 6. Ulusal Kongresi, 24-25 Ekim 1996, İzmir, Türkiye, 417-425.
- TM 5-822-14** (1994) *Soil Stabilization for Pavements*. Report by Airforce AFJMAN 32-1019, Headquarters Departments of the Army and the Air Force, 57 p.
- Tran T D, Cui Y J, Tang A M, Audiguier M and Cojean R** (2014) Effects of Lime Treatment on the Microstructure and Hydraulic Conductivity of Hericourt Clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6, 399-404.
- TS 639** (1975) Uçucu küller – Çimentoda kullanılan, Türk Standardı.
- TS 1500** (2000) İnşaat mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması, Türk Standardı.
- TS EN 450** (1998) Uçucu kül - Betonda kullanılan - Tarifler, özellikler ve kalite kontrol, Türk Standardı.
- TS EN 450-1** (2013) Uçucu kül - Betonda kullanılan - Tarifler, özellikler ve kalite kontrol, Türk Standardı.
- TS EN 197-1** (2012) Çimento - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri - Bölüm 1: Genel çimentoları, Türk Standardı.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Turan C, Javadi A, Vinai R, Shariatmadari N and Farmani R** (2020) Use of Class C Fly Ash for Stabilization of Fine Grained Soils. *E3S Web of Conferences*, 195, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2020Evaluation of Western Coal Fly Ashes For Stabilization of Low-Volu506001>.
- Turner J P** (1997) Evaluation of Western Coal Fly Ashes For Stabilization of Low-Volume Roads Testing Soil Mixed with Waste or Recycled Materials. *ASTM STP 1275*.
- Türker P, Erdoğan B, Katnaş F ve Yeğınobalı A** (2009) Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, 4. Baskı, Fersa Matbacılık, Ankara, 112 s.
- URL-1** (2021) [https://en.wikipedia.org/wiki/Fly\\_ash](https://en.wikipedia.org/wiki/Fly_ash), (Erişim Tarihi 30.01.2021)
- White D J, Harrington D and Thomas Z** (2005). Fly Ash Soil Stabilization for Non-Uniform Subgrade Soils. IHRB Project TR-461, FHWA Project 4.
- Yang T, Ma X and Zhang B** (2016) Preliminary Studies into Methods for Microstructural Improvements of Hydrated Lime Putty. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (12).
- Yılmaz G, Özsoy E A ve Çetin M** (2008) Seyitömer Uçucu Küllerinin Killerle Kullanımı, ZMTM 12. Ulusal Kongresi, 16-17 Ekim 2008, Konya, Türkiye, 133-142.
- Yılmaz Y ve Sevencan Ü** (2010) Polipropilen Fiber ve Uçucu Kül Katkılı Ankara Kilinin Bazı Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması, ZMTM 13. Ulusal Kongresi, 30 Eylül-1 Ekim 2010, İstanbul, Türkiye, 133-142.
- Yılmaz Y** (2015) Compaction and Strength Characteristics of Fly Ash and Fiber Amended Clayey Soil. *Engineering Geology*, 188: 168-177.
- Yılmaz Y, Çoban H S, Çetin B and Edil T B** (2019) Use of Standard and Off-Spec Fly Ashes for Soil Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31 (2): 04018390.
- Yeboah N N N and Burns S E** (2011) Geological Disposal of Energy-Related Waste. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15 (4): 697-705.
- Yoobanpot N, Jamsawang P and Horpibulsuk S** (2017) Strength Behavior And Microstructural Characteristics of Soft Clay Stabilized with Cement Kiln Dust and Fly Ash Residue. *Applied Clay Science*, 141: 146-156.
- Zha F, Liu S, Du Y and Cui K** (2008) Stabilization of Expansive Belle Fourche Shale Clay With Different Chemical. *Nat Hazards*, 47: 509-523.
- Zhang J and Xing C** (2002) Stabilization of Expansive Soil by Lime and Fly Ash. *Journal of Wuhan University of Technology*, 17 (4).
- Zumrawi M M E** (2015) Stabilization of Pavement Subgrade by Using Fly Ash Activated by Cement. *American Journal of Civil Engineering*, 3 (6): 218-224.



## BİBLİYOGRAFYA

- Arman A and Munfakh G A** (1970) *Stabilization of Organic Soils With Lime*. Louisiana State Univ., Baton Rouge, Eng. Res. Bull., 103 p.
- Assarson K, Broms B, Granholm S and Paus K** (1974) *Deep Stabilization of Soft Cohesive Soils*, Linden Alimark, Skellefteaa, 49 p.
- Lea F M** (1956) *The Chemistry of Cement and Concrete*, Edward Arnord (Publishers) Ltd, London, 637 p.
- Glenn G R and Handy R L** (1963) Lime-Clay Minerals Reaction Products. *Highway Res. Board Rec.*, 29: 70-82.
- Goecker W L, Moh Z C, Davidson D T and Chu T Y** (1956) Stabilisation of Fine and Coarse-Grained Soils with Lime-Fly Ash Admixtures. *Highway Research Board Bull.* 129, 63-82.
- Metcalf J B** (1963) The Effect of High Curing Temperatures on the Unconfined Compressive Strength of a Heavy Clay Stabilized with Lime and with Portland Cement. *Proc. 4th ANZ Soil Mechanics and Foundation Engineering Cont*, Institution of Eng, Australia.
- Terrei R L, Epps J A and Associates** (1979) *Soil Stabilization in Pavement Structures: A User's Manual Volume 2*. DOT-FH-1 1-9406, Federal Highway Administration, Department of Transportation, Washington.
- Uppal H L and Dhawan P K** (1968) A Resume on the Use of Fly Ash in Soil Stabilization, *Road Research papers*, 95.
- Viskochil R K, Handy R L and Davidson D T** (1957) Effect of Density on Strength of Lime-Fly Ash Stabilised Soil. *Highway Research Board Bull.* 183, 5-15.



## ÖZGEÇMİŞ

Emrah DAĞLI, ilkokul, ortaokul ve lise eğitimini Ankara'da tamamladı. Lisans eğitimini 2010 yılında Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. Lisans mezuniyetinden sonra kısa bir süre Afganistan'da saha mühendisi olarak görev yaptı. Yüksek lisans eğitimini Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'nde 2014 yılında tamamladı. 17 Şubat 2014 tarihinde aynı üniversitede doktora eğitimine başladı. 8 Şubat 2011 tarihinden beri Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.