



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KIRMIZI ÇAMUR ve FİLTRE ÇAMURU  
ATIKLARININ KARIŞIMININ YOL DOLGU  
MALZEMESİ OLARAK  
KULLANILABİLİRLİĞİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Ahmet Mesut KARA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Şubat-2026  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet Mesut KARA tarafından hazırlanan “Kırmızı Çamur ve Filtre Çamuru Atıklarının Karışımının Yol Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması” adlı tez çalışması 18/02/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Murat OLGUN

.....

#### Danışman

Dr. Öğr. Üyesi İlyas ÖZKAN

.....

#### Üye

Prof. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

.....

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

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY  
FBE Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

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

## **DECLARATION PAGE**

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

Ahmet Mesut KARA

Tarih: 18/02/2026

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### KIRMIZI ÇAMUR ve FİLTRE ÇAMURU ATIKLARININ KARIŞIMININ YOL DOLGU MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Ahmet Mesut KARA

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlyas ÖZKAN

2026, 126 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi İlyas ÖZKAN  
Prof. Dr. Ali Sinan SOĞANCI  
Prof. Dr. Murat OLGUN

Nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler, endüstriyel atık miktarını hızla artırarak çevresel ve ekonomik sorunlara yol açmaktadır. Artan ham madde ihtiyacı da daha fazla üretim atığı oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle sanayi atıklarının incelenerek çevreye zarar vermeyecek ve ekonomik açıdan uygun yöntemlerle bertaraf edilmesi, mümkün olduğunca geri dönüştürülerek yeniden değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, kırmızı çamur atığına filtre çamuru ve uçucu kül eklenmesiyle zeminin yol dolgusu olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasıyla ilgili bazı deneyler yapılmıştır. Öncelikle çalışmada kullanılacak malzemelerin tane boyutları ve kıvam limitlerini bulmak için ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Ardından kırmızı çamura ilave edilecek filtre çamurunun maksimum oranının bulunması için ön çalışmalar yapılmıştır. Filtre çamurunun saf, yıkanmış ve yakılmış halleri, kırmızı çamura belli oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25) karıştırılmıştır. En uygun serbest basınç direnci sonuçlarını veren karışımlara belli oranlarda (%2.5, %5, %7.5, %10) uçucu kül katkısıyla iyileştirme yapılmıştır. Bütün numuneler için 0-7-28-56 günlük kürler uygulanmıştır. En uygun serbest basınç direnç değerini veren numune üzerinde Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi ve mikrokimyasal analizler yapılmıştır. Deney sonuçlarında; kırmızı çamur, filtre çamuru ve uçucu külün silt ağırlıklı malzemeler olduğu belirlenmiştir. Kırmızı çamurun kürsüz halde 220 kPa olarak belirlenen serbest basınç direnci, filtre çamurunun saf halinin %15 ve uçucu külün %10 katkısı ile 56 günlük kür etkisiyle 1298,668 kPa' a çıkarılmıştır. Kırmızı çamurun %5,5 olan şişme değeri aynı katkı ve kür süresi etkisiyle %0' a düşürülmüş olup %3,9 olan ıslak CBR oranı %34,63' e çıkarılmıştır. Ancak filtre çamurunu yakma ve yıkama işlemleri sonrasında kür etkisiyle birlikte serbest basınç direnci 499,996 ve 591,174 kPa olup saf haldeki filtre çamuru katkısına göre düşüş yaşanmıştır ancak yine de kırmızı çamur serbest basınç direncinin üzerinde kalmıştır. Mikroyapı testleri

sonucunda stabilize edilmiş kırmızı çamurun yapısında, puzolanik reaksiyonlar sonucu dayanımı arttıran kalsine alümina hidrat (C-A-H) ve kalsine silika hidrat (C-S-H) bağları gözlemlenmiştir. Sonuçlar filtre çamurunun yıkama ve yakma işleminin serbest basınç direncine her ne kadar etkili olduğunu göstermese de kırmızı çamura saf halde filtre çamuru ve uçucu kül katkısıyla oluşturulan karışımın Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Karayolları Teknik Şartnamesi' ne göre yol dolgu malzemesi olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Filtre çamuru, kırmızı çamur, uçucu kül, yol dolgusu



## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

#### **THE INVESTIGATION OF THE USABILITY OF RED MUD AND FILTER SLUDGE WASTE MIXTURE AS ROAD EMBANKMENT MATERIAL**

**Ahmet Mesut KARA**

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

**Advisor: Asst. Prof. Dr. İlyas ÖZKAN**

**2026, 126 Pages**

**Jury**

**Asst. Prof. Dr. İlyas ÖZKAN  
Prof. Dr. Ali Sinan SOĞANCI  
Prof. Dr. Murat OLGUN**

Population growth and technological advancements are rapidly increasing the amount of industrial waste, leading to environmental and economic problems. Increased demand for raw materials also results in more production waste. Therefore, it is crucial to analyze industrial waste and dispose of it using environmentally friendly and economically viable methods, and to recycle and reuse it as much as possible.

This study involved experiments to investigate the usability of red mud waste as road embankment by adding filter sludge and fly ash. Preliminary experiments were conducted to determine the particle size and consistency limits of the materials to be used. Subsequently, preliminary studies were carried out to determine the maximum ratio of filter sludge to be added to the red mud. Pure, washed, and incinerated filter sludge was mixed with the red mud in specific ratios (5%, 10%, 15%, 20%, 25%). The mixtures yielding the most suitable unconfined compressive strength results were improved by adding fly ash in specific ratios (2.5%, 5%, 7.5%, 10%). Curing periods of 0, 7, 28, and 56 days were applied to all samples. The California Bearing Ratio (CBR) test and microchemical analyses were performed on the sample yielding the most suitable unconfined compressive strength value. The experimental results revealed that the red mud, filter sludge, and fly ash were predominantly silt-based materials. The unconfined compressive strength of red mud, determined as 220 kPa in its uncured state, was increased to 1298.668 kPa after a 56-day curing period with the addition of 15% pure filter sludge and 10% fly ash. The swelling value of the red mud, which was 5.5%, was reduced to 0% with the same addition and curing time, and the wet CBR ratio, which was 3.9%, was increased to 34.63%. However, after incineration and washing of the filter sludge, the unconfined compressive strength, with the curing effect, was 499.996 and 591.174 kPa, respectively, showing a decrease compared to the pure filter sludge addition, but still remaining above the unconfined compressive strength of the red mud. Microstructure tests revealed the presence of calcined

alumina hydrate (CAH) and calcined silica hydrate (CSH) bonds in the stabilized red mud, which increase strength as a result of pozzolanic reactions. Although the results do not show that the washing and burning process of filter sludge is effective on the unconfined compressive strength, they indicate that a mixture created by adding pure filter sludge and fly ash to red sludge can be used as road embankment material according to the General Directorate of Highways (KGM) Highway Technical Specifications.

**Keywords:** Filter sludge, fly ash, red mud, road embankment



## ÖNSÖZ

Tez çalışmasının bütün süreçlerinde bana rehberlik eden, değerli bilgi ve deneyimleriyle çalışmamın şekillenmesinde katkılar sağlayan, sabırla sorularımı yanıtlayan, çalışma sürecinde karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmemde yardımcı olan ve motivasyonumu yüksek tutmayı sağlayan tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi İlyas ÖZKAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmada bulunan atık malzemelerin kullanılmasını sağlayan Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş. ve Konya Şeker Sanayi ve Ticaret A.Ş.' ye teşekkür ederim.

Çalışma boyunca manevi destekleriyle yardımcı olan sevgili annem Ayşe KARA, sevgili babam Mustafa KARA' ya; yokluğumda büyük sabır ve anlayış gösterip moral ve motivasyonumu yüksek tutan kıymetli eşim Safiye ÖZDEMİR KARA' ya teşekkürlerimi iletir, sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ahmet Mesut KARA  
KONYA-2026

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ .....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xi
ÇİZELGELER LİSTESİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xvii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>5</b>
2.1. Filtre Çamuru .....	5
2.1.1. Filtre çamurunun şeker fabrikasında oluşum süreci .....	5
2.1.2. Filtre çamurunun kimyasal bileşenleri.....	8
2.1.3. Filtre çamurunun değerlendirildiği alanlar .....	8
2.1.4. Filtre çamuru ile ilgili yapılmış çalışmalar .....	10
2.2. Kırmızı Çamur .....	13
2.2.1. Bayer Prosesi Yöntemi sonucu kırmızı çamur oluşum aşamaları .....	13
2.2.2. Kırmızı çamurun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	17
2.2.3. Kırmızı çamurun değerlendirildiği alanlar .....	19
2.2.4. Kırmızı çamur ile ilgili yapılmış çalışmalar .....	20
2.3. Uçucu Kül .....	25
2.3.1. Termik santrallerde uçucu külün oluşum aşamaları .....	25
2.3.2. Uçucu külün özellikleri.....	29
2.4. Yol Dolgusu .....	41
2.4.1. Yol dolgusu ile ilgili yapılmış çalışmalar .....	42
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM .....</b>	<b>45</b>
3.1. Malzemeler .....	45
3.1.1. Kırmızı çamur .....	46
3.1.2. Filtre çamuru.....	47
3.1.3. Uçucu kül.....	49
3.2. Karışım Oranlarının Belirlenmesi.....	50
3.2.1. Maksimum filtre çamuru oranının belirlenmesi .....	50
3.2.2. Karışım oranlarının belirlenmesi .....	52
3.2.3. Uçucu kül katkısının belirlenmesi .....	52
3.3. Deneysel Çalışmalar .....	53
3.3.1. İndeks deneyleri.....	53
3.3.2. Dayanım deneyleri.....	54
3.3.3. Mikrokimyasal analizler .....	58
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>61</b>
4.1. Hidrometre Deneyi Sonuçları .....	62

4.2. Atterberg Deneyleri Sonuçları .....	63
4.3. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....	65
4.3.1. KÇ+Normal FÇ numuneler .....	65
4.3.2. KÇ+Normal FÇ+UK numuneler .....	66
4.3.3. KÇ+Yakılmış FÇ numuneler .....	67
4.3.4. KÇ+Yakılmış FÇ+UK numuneler .....	68
4.3.5. KÇ+Yıkanmış FÇ numuneler .....	69
4.3.6. KÇ+Yıkanmış FÇ+UK numuneler .....	70
4.3.7. Genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	70
4.3.8. Tanjant modülü ( $E_0$ ) ve sekant modülü ( $E_{50}$ ) değerleri .....	77
4.4. CBR Testi Sonuçları .....	79
4.5. Mikroyapı Test Sonuçları .....	81
4.5.1. SEM analizi sonuçları .....	81
4.5.2. EDX analizi sonuçları .....	83
4.5.3. XRD analizi sonuçları .....	85
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>87</b>
5.1. Sonuçlar .....	88
5.2. Öneriler .....	91
5.2.1. Yol dolgularında C sınıfı uçucu külün kullanımıyla ilgili öneriler .....	92
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>93</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>100</b>
EK-1 KÇ+Normal FÇ Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....	100
EK-2 KÇ+Normal FÇ+UK Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....	105
EK-3 KÇ+Yakılmış FÇ Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....	109
EK-4 KÇ+Yakılmış FÇ+UK Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....	114
EK-5 KÇ+Yıkanmış FÇ Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....	118
EK-6 KÇ+Yıkanmış FÇ+UK Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....	123

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Ham şerbetin I. kireçlenmesi.....	6
Şekil 2.2. Ham şerbetin kireçleme, karbonatlama ve atık çamurun çıkış işlemleri.....	7
Şekil 2.3. Şeker fabrikası atık çamur havuzlarının uzaktan görünümü .....	7
Şekil 2.4. Alümina üretimi akış şeması .....	16
Şekil 2.5. Seydişehir Eti Alüminyum Tesisleri ve kırmızı çamur barajlarının konumu	17
Şekil 2.6. Zibo şehrinde kırmızı çamurun yol alttemel malzemesi olarak kullanımı .....	20
Şekil 2.7. Kömürle çalışan konvansiyonel buhar türbinli termik santral diyagramı .....	27
Şekil 2.8. (a) Elektrostatik filtre (b) Kumaş (torbalı) filtre .....	28
Şekil 2.9. Uçucu kül tanecik kesiti .....	31
Şekil 3.1. Kırmızı çamur ezme ve öğütme işlemi.....	46
Şekil 3.2. Saf kırmızı çamur ve öğütülüp elenmiş kırmızı çamur .....	46
Şekil 3.3. (a) Filtre çamurunu ezme işlemi (b) Ezilip elenmiş filtre çamuruve saf filtre çamuru .....	47
Şekil 3.4. Filtre çamuru yıkanma işlemi basamakları .....	48
Şekil 3.5. Filtre çamuru yakma işlemi .....	49
Şekil 3.6. Bayavşar Kömür Ocağına ait elenmiş uçucu kül .....	50
Şekil 3.7. Karışım numunelerini kürden çıkmış hali .....	51
Şekil 3.8. 24 saatlik hidrometre deney takibi sonucu numunelerin son hali .....	54
Şekil 3.9. (a) Oranlı malzemelerin karıştırılmamış hali (b) Malzemelerin10 nolu elek yardımıyla karıştırılması .....	55
Şekil 3.10. (a) Karışıma su eklenmesi (b) Su eklenen karışımın spatula ile aşamalı karıştırılması .....	56
Şekil 3.11. (a) Karışımın topraklardan arındırılması (b) Karışımın sıkıştırma işlemi için üç tabakaya bölünmesi .....	56
Şekil 3.12. (a) Karışımın sıkıştırılması (b) Tabakanın spatula ile üstünün çizilmesi (c) Numunenin hidrolik kriko yardımıyla kalıptan çıkarılması .....	56
Şekil 3.13. (a) Numunenin iki tabaka arasındaki hali (b) Numunenin yük hücrelerinde kırılmış hali (c) Kırılmış numune .....	57
Şekil 3.14. Kalıplanmış CBR numunesi .....	58
Şekil 3.15. Mikrokimyasal analizlerin yapılacağı numunelerin 110 °C' de kurutulmuş halleri .....	59
Şekil 3.16. (a) Denton püskürtme kaplama cihazı (b) Numunelerin cihazda altın-paladyum kaplama işlemi .....	60
Şekil 3.17. Zeizz GeminiSEM 500 taramalı elektron mikroskobu cihazı .....	60
Şekil 4.1. Kırmızı çamur, normal filtre çamuru ve uçucu küle ait tane çapı dağılım eğrisi.....	62
Şekil 4.2. Normal filtre çamuru, yakılmış filtre çamuru ve yıkanmış filtre çamuruna ait tane çapı dağılım eğrisi .....	62
Şekil 4.3. Normal filtre çamuru ve kırmızı çamurun AASHTO zemin sınıflandırma tablosundaki yeri.....	64
Şekil 4.4. Normal filtre çamuru ve kırmızı çamurun USCS plastisite grafiğindeki yeri	64
Şekil 4.5. KÇ+FÇ kürsüz numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	71
Şekil 4.6. KÇ+FÇ 7 günlük numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	71
Şekil 4.7. KÇ+FÇ 28 günlük numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	71

<b>Şekil 4.8.</b> KÇ+FÇ 56 günlük numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	72
<b>Şekil 4.9.</b> KÇ+FÇ+UK kürsüz numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	72
<b>Şekil 4.10.</b> KÇ+FÇ+UK 7 günlük numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	72
<b>Şekil 4.11.</b> KÇ+FÇ+UK 28 günlük numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	73
<b>Şekil 4.12.</b> KÇ+FÇ+UK 56 günlük numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	73
<b>Şekil 4.13.</b> KÇ+FÇ+UK numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	73
<b>Şekil 4.14.</b> KÇ+FÇ+%2,5 UK numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	74
<b>Şekil 4.15.</b> KÇ+FÇ+%5 UK numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	74
<b>Şekil 4.16.</b> KÇ+FÇ+%7,5 UK numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	74
<b>Şekil 4.17.</b> KÇ+FÇ+%10 UK numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	75
<b>Şekil 4.18.</b> KÇ+FÇ+UK numunelerin filtre çamurunun türüne genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	75
<b>Şekil 4.19.</b> KÇ+FÇ+%2,5 UK numunelerin filtre çamurunun türüne genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	75
<b>Şekil 4.20.</b> KÇ+FÇ+%5 UK numunelerin filtre çamurunun türüne genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	76
<b>Şekil 4.21.</b> KÇ+FÇ+%7,5 UK numunelerin filtre çamurunun türüne genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	76
<b>Şekil 4.22.</b> KÇ+FÇ+%10 UK numunelerin filtre çamurunun türüne genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	76
<b>Şekil 4.23.</b> Örnek gerilme-deformasyon grafiği ve $E_0 - E_{50}$ eğimler.....	77
<b>Şekil 4.24.</b> FÇ-15 ve Opt. FÇ+UK-10 numunelerinin kür süresine göre $E_0$ değişimi ..	78
<b>Şekil 4.25.</b> FÇ-15 ve Opt. FÇ+UK-10 numunelerinin kür süresine göre $E_{50}$ değişimi .	78
<b>Şekil 4.26.</b> Kırmızı çamura ait ıslak-kuru CBR değerleri için yük-yer değiştirme grafiği.....	79
<b>Şekil 4.27.</b> Opt. FÇ+UK-10 numunesinin 56 günlük kür sonrasında yük-yer değiştirme grafiği.....	80
<b>Şekil 4.28.</b> Kırmızı çamur 10.000 kat (solda) ve 50.000 kat (sağda) büyütülmüş SEM görüntüleri.....	81
<b>Şekil 4.29.</b> Normal filtre çamuru 10.000 kat (solda) ve 50.000 kat (sağda) büyütülmüş SEM görüntüleri .....	81
<b>Şekil 4.30.</b> Yakılmış filtre çamuru 10.000 kat (solda) ve 50.000 kat (sağda) büyütülmüş SEM görüntüleri .....	82
<b>Şekil 4.31.</b> Yıkanmış filtre çamuru 10.000 kat (solda) ve 50.000 kat (sağda) büyütülmüş SEM görüntüleri .....	82
<b>Şekil 4.32.</b> Stabilize edilmiş kırmızı çamura (Opt. FÇ+ UK-10) ait 10.000 kat (solda) ve 50.000 kat (sağda) büyütülmüş SEM görüntüleri.....	83
<b>Şekil 4.33.</b> Kırmızı çamur EDX grafiği.....	83
<b>Şekil 4.34.</b> Normal filtre çamuru EDX grafiği .....	84
<b>Şekil 4.35.</b> Yakılmış filtre çamuru EDX grafiği.....	84
<b>Şekil 4.36.</b> Yıkanmış filtre çamuru EDX grafiği.....	84

<b>Şekil 4.37.</b> Stabilize edilmiş kırmızı çamur (Opt. FÇ + UK-10) EDX grafiği.....	85
<b>Şekil 4.38.</b> Kırmızı çamur XRD grafiği .....	86
<b>Şekil 4.39.</b> Stabilize edilmiş kırmızı çamur (Opt. FÇ + UK-10) XRD grafiği.....	86
<b>Şekil Ek-1.1.</b> KÇ+Normal FÇ kürsüz numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	100
<b>Şekil Ek-1.2.</b> KÇ+Normal FÇ 7 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	100
<b>Şekil Ek-1.3.</b> KÇ+Normal FÇ 28 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	101
<b>Şekil Ek-1.4.</b> KÇ+Normal FÇ 56 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	101
<b>Şekil Ek-1.5.</b> %95 KÇ+ %5 Normal FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	102
<b>Şekil Ek-1.6.</b> %90 KÇ+ %10 Normal FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	102
<b>Şekil Ek-1.7.</b> %85 KÇ+ %15 Normal FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	103
<b>Şekil Ek-1.8.</b> %80 KÇ+ %20 Normal FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	103
<b>Şekil Ek-1.9.</b> %75 KÇ+ %25 Normal FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	104
<b>Şekil Ek-2.1.</b> KÇ+Normal FÇ+UK kürsüz numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	105
<b>Şekil Ek-2.2.</b> KÇ+Normal FÇ+UK 7 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	105
<b>Şekil Ek-2.3.</b> KÇ+Normal FÇ+UK 28 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları.....	106
<b>Şekil Ek-2.4.</b> KÇ+Normal FÇ+UK 56 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	106
<b>Şekil Ek-2.5.</b> KÇ+Normal FÇ+%2,5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	107
<b>Şekil Ek-2.6.</b> KÇ+Normal FÇ+%5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	107
<b>Şekil Ek-2.7.</b> KÇ+Normal FÇ+%7,5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	108
<b>Şekil Ek-2.8.</b> KÇ+Normal FÇ+%10 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	108
<b>Şekil Ek-3.1.</b> KÇ+Yakılmış FÇ kürsüz numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	109
<b>Şekil Ek-3.2.</b> KÇ+Yakılmış FÇ 7 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	109
<b>Şekil Ek-3.3.</b> KÇ+Yakılmış FÇ 28 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	110
<b>Şekil Ek-3.4.</b> KÇ+Yakılmış FÇ 56 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	110
<b>Şekil Ek-3.5.</b> %95 KÇ+ %5 Yakılmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	111
<b>Şekil Ek-3.6.</b> %90 KÇ+ %10 Yakılmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	111
<b>Şekil Ek-3.7.</b> %85 KÇ+ %15 Yakılmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	112

<b>Şekil Ek-3.8.</b> %80 KÇ+ %20 Yakılmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	112
<b>Şekil Ek-3.9.</b> %75 KÇ+ %25 Yakılmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	113
<b>Şekil Ek-4.1.</b> KÇ+Yakılmış FÇ+UK kürsüz numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	114
<b>Şekil Ek-4.2.</b> KÇ+Yakılmış FÇ+UK 7 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	114
<b>Şekil Ek-4.3.</b> KÇ+Yakılmış FÇ+UK 28 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	115
<b>Şekil Ek-4.4.</b> KÇ+Yakılmış FÇ+UK 56 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	115
<b>Şekil Ek-4.5.</b> KÇ+Yakılmış FÇ+%2,5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	116
<b>Şekil Ek-4.6.</b> KÇ+Yakılmış FÇ+%5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	116
<b>Şekil Ek-4.7.</b> KÇ+Yakılmış FÇ+%7,5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	117
<b>Şekil Ek-4.8.</b> KÇ+Yakılmış FÇ+%10 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	117
<b>Şekil Ek-5.1.</b> KÇ+Yıkanmış FÇ kürsüz numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	118
<b>Şekil Ek-5.2.</b> KÇ+Yıkanmış FÇ 7 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	118
<b>Şekil Ek-5.3.</b> KÇ+Yıkanmış FÇ 28 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	119
<b>Şekil Ek-5.4.</b> KÇ+Yıkanmış FÇ 56 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	119
<b>Şekil Ek-5.5.</b> %95 KÇ+ %5 Yıkanmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	120
<b>Şekil Ek-5.6.</b> %90 KÇ+ %10 Yıkanmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	120
<b>Şekil Ek-5.7.</b> %85 KÇ+ %15 Yıkanmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	121
<b>Şekil Ek-5.8.</b> %80 KÇ+ %20 Yıkanmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	121
<b>Şekil Ek-5.9.</b> %75 KÇ+ %25 Yıkanmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	122
<b>Şekil Ek-6.1.</b> KÇ+Yıkanmış FÇ+UK kürsüz numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	123
<b>Şekil Ek-6.2.</b> KÇ+Yıkanmış FÇ+UK 7 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	123
<b>Şekil Ek-6.3.</b> KÇ+Yıkanmış FÇ+UK 28 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	124
<b>Şekil Ek-6.4.</b> KÇ+Yıkanmış FÇ+UK 56 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	124
<b>Şekil Ek-6.5.</b> KÇ+Yıkanmış FÇ+%2,5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	125
<b>Şekil Ek-6.6.</b> KÇ+Yıkanmış FÇ+%5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	125

<b>Şekil Ek-6.7.</b> KÇ+Yıkanmış FÇ+%7,5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	126
<b>Şekil Ek-6.8.</b> KÇ+Yıkanmış FÇ+%10 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları .....	126



## ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1. Filtre çamurunun kimyasal bileşenleri .....	8
Çizelge 2.2. Kırmızı çamurun fiziksel özellikleri.....	17
Çizelge 2.3. Kırmızı çamurun kimyasal bileşenleri .....	18
Çizelge 2.4. Uçucu külün ASTM C 618 standardına göre fiziksel özellikleri .....	31
Çizelge 2.5. Türkiye’ de oluşan bazı uçucu küllerin fiziksel özellikleri .....	31
Çizelge 2.6. Türkiye’ de oluşan bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri.....	33
Çizelge 2.7. Türkiye’ de oluşan bazı uçucu küllerin mineralojik bileşenleri .....	33
Çizelge 2.8. Bazı C ve F sınıfı uçucu küllerin kimyasal bileşenleri.....	34
Çizelge 3.1 Kırmızı çamur kimyasal kompozisyonu.....	47
Çizelge 3.2. Uçucu küle ait kimyasal kompozisyon.....	50
Çizelge 3.3. Kırmızı çamur ve filtre çamurunun ağırlıkça karışım oranları.....	51
Çizelge 3.4. İyileştirilmesi amaçlanan kırmızı çamur numunelerinin karışım oranları .	52
Çizelge 3.5. İyileştirilmesi amaçlanan KÇ+FÇ numunelerine uçucu kül katkı oranları	53
Çizelge 4.1. Malzemelerin zemin türüne göre oranları .....	63
Çizelge 4.2. Normal filtre çamuru kıvam limit deney sonuçları .....	63
Çizelge 4.3. Kırmızı çamurun kıvam limit deney sonuçları.....	63
Çizelge 4.4. KÇ+Normal FÇ numunelerin serbest basınç deney sonuçları .....	65
Çizelge 4.5. KÇ+Normal FÇ+UK numunelerin serbest basınç deney sonuçları .....	66
Çizelge 4.6. KÇ+Yakılmış FÇ numunelerin serbest basınç deney sonuçları.....	67
Çizelge 4.7. KÇ+Yakılmış FÇ+UK numunelerin serbest basınç deney sonuçları.....	68
Çizelge 4.8. KÇ+Yıkılmış FÇ numunelerin serbest basınç deney sonuçları.....	69
Çizelge 4.9. KÇ+Yıkılmış FÇ+UK numunelerin serbest basınç deney sonuçları .....	70
Çizelge 4.10. CBR ve şişme değerleri için özet tablo .....	80

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### SİMGELER

<b>A-5(12)</b>	Siltli zeminler sınıfı (grup indisi 12)
<b>A-5(17)</b>	Siltli zeminler sınıfı (grup indisi 17)
<b>E<sub>0</sub></b>	Tanjant modülü
<b>E<sub>50</sub></b>	Sekant modülü
<b>MH</b>	Yüksek plastisiteli siltler sınıfı
<b>ML</b>	Düşük plastisiteli siltler sınıfı
<b>q<sub>u</sub></b>	Serbest basınç direnci

### KISALTMALAR

<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>CASH</b>	Kalsiyum Alüminat Silikat Hidrat
<b>CBR</b>	Kaliforniya Taşıma Oranı
<b>CSH</b>	Kalsiyum Silikat Hidrat
<b>ÇŞİB</b>	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
<b>EDX</b>	Enerji dağılımlı X ışını spetroskopisi
<b>EMO</b>	Elektrik Mühendisleri Odası
<b>FÇ</b>	Filtre Çamuru
<b>İMİB</b>	İstanbul Maden İhracatçıları Birliği
<b>KÇ</b>	Kırmızı Çamur
<b>KGM</b>	Karayolları Genel Müdürlüğü
<b>LL</b>	Likit Limit
<b>LOI</b>	Yanmada kayıp
<b>LVDT</b>	Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatör
<b>PL</b>	Plastik Limit
<b>SCR</b>	Selektif katalitik
<b>SEM</b>	Taramalı Elektron Mikroskopu
<b>SNCR</b>	Selektif katalitik olmayan
<b>TEİAŞ</b>	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
<b>TKİK</b>	Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu
<b>TS EN</b>	Türk Standartları Enstitüsü
<b>UCS</b>	Tek Eksenli Basınç Deneyi
<b>UK</b>	Uçucu Kül
<b>USCS</b>	Unified Soil Classification System (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi)
<b>XRD</b>	X-ışını difraksiyonu

## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun zamanla artması ve teknolojinin zamanla gelişmesi ile birlikte endüstriyel atıklarda oldukça fazla artış olmaktadır. Bu artış; endüstriyel atıklarla ilgili taşıma, depolama maliyetleri, çevre kirliliği gibi sorunlar ortaya çıkarmaya başlamıştır. Gıda, sanayi, maden, tekstil gibi sektörlerde ham maddeye olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu artış, ham maddelerden oluşacak atıkların ve bu atıkların meydana getireceği sorunların da artması anlamına gelmektedir. Bu durum, endüstride üretim atıklarının incelenerek güvenli, sağlıklı ve ekonomik bir şekilde bertaraf edilmesini zorunlu kılmaktadır. Atıklardan dolayı oluşacak sorunların bertaraf edilmesi için bu atıkların toplum yararına oluşacak şekilde geri dönüştürülmesi veya kullanılması gerekmektedir.

Atık malzemelerin yeniden değerlendirilmesi konusu son zamanlarda büyük ilgi görmektedir. Atıkların geri dönüştürülmesi veya kullanılması ile ilgili yapılan çalışmalara göre, atıklar tek başlarına ya da ana malzemeye kısmen karıştırılarak kullanılabilir. Ayrıca atık malzemeler başka atıklar ile beraber kullanılarak mühendislik problemlerine çözüm bulunabilmektedir. Atık malzemeler bu yollarla inşaat sektörünün yanı sıra seramik, kimya, madencilik, tarım, sağlık gibi sektörlerde değerlendirilerek hem atık malzemelerin kendisinin oluşturduğu problemlerin önüne geçilebileceği hem de birçok alanda problemlere çözüm olabileceği araştırmalarla görülmektedir.

Endüstriyel atık malzemelerin bertarafı için üzerinde çalışılan alanlardan birisi de yol dolgularıdır. Yol güzergahını, arazi şartlarına ve trafik yüküne göre projelendirilmiş geometrilere getirmek için güzergah üzerinde bazı yerler kazılır, bazı yerler ise kazılan malzemeyle veya dışarıdan malzeme getirilerek doldurulur. Güzergahta kırmızı kota getirilmesi için doldurulan kısım yol dolgusu olarak tanımlanır (Özbek, 2025). Ülkemizdeki sürdürülebilir yol altyapısı, sosyal ve ekonomik kalkınmayı sağlamakla birlikte ülkeler arasında rekabette varlığımızı da sağlar. İnşaat malzemelerine olan talebin hızla artması yol inşaatı için kullanılan kırmataş gibi doğal kaynakların da hızla tükenmesine ve yol inşaatı için gerekli maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Yol altyapılarının sürdürülebilir olması için yenilikçi, teknolojik, ekonomik, çevreci ve güvenli çözümler bulmak gerekir. Bu sebeple yol altyapısı için zemin iyileştirme, zayıf zeminin değiştirilmesi, yol dolgusu gibi işlemlerde alternatif malzemelerin kullanılması

ihtiyaç haline gelmiştir. Alternatif malzeme olarak endüstriyel atıkların değerlendirilmesi belirtilen özelliklere sahip bir çözüm yöntemi olacaktır.

#### *Araştırmanın amacı*

Bu tezde iki adet endüstriyel atığın belli oranlarda karıştırılmasıyla bir mühendislik problemine ekonomik bir çözüm bulmak amaçlanmaktadır. Bu çözümle birlikte bu atıklardan meydana gelecek çevre kirliliğini azaltmak ve ülke ekonomisine katkı sağlamak amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada kullanılacak ana atıklar kırmızı çamur ve filtre çamurudur. Uçucu kül ise optimum değerleri veren filtre çamuru ve kırmızı çamur karışımına ilave ürün olarak kullanılacaktır. Kırmızı çamur, boksitten Bayer prosesi yöntemiyle alümina elde ederken alkalilerle tepkimeye girmeyen demir minerallerinin katı fazlı bileşikler halinde kalmasıyla ortaya çıkan atık malzemesidir. Son 30-40 yılda bu atıkların artmasıyla modern atık depolama sahaları ve atık barajlarında kuru istifleme yöntemleriyle depolama yapılmaktadır. Örneğin 1973 yılında kurulup 1975 yılında tam kapasite ile üretime geçen Konya Seydişehir Eti Alüminyum Tesisleri'nde atık içerisindeki suyun zamanla prosese geri gönderilememesiyle birlikte 1975 yılında atık çamuru barajında yükseltme çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. Zamanla içerisine Kriyolit karışan su Kırmızı Çamur Atık Barajı ve Kriyolit Barajı'nda birikmeye başlamış, iki barajın da su işletme kotları dolduğu için II. Kırmızı Çamur Atık Barajı'na ihtiyaç duyulmuştur (Muş, 2015). Filtre çamuru ise şeker fabrikalarında şeker üretim aşamalarından biri olan ham şerbetin kireç sütü yardımıyla arıtımı aşamasında filtre prosesinden elde edilmektedir. Bu malzeme yaklaşık %70-80 kuru madde içeren atık topraktır (Topçu ve Sofuoğlu, 2017). Bu atık malzeme fabrikanın atık depolama sahalarında bir şekilde kullanılmayı beklemektedir.

Bu çalışmada, kırmızı çamur ve filtre çamuru karışımından oluşan bir yol dolgu malzemesi yapımı amaçlanmaktadır. Kırmızı çamur, yüksek baziklik özelliği nedeniyle çevresel açıdan zararlı olup kullanım alanı kısıtlıdır. Filtre çamuru ise bünyesinde bulunan organik maddeler nedeniyle zamanla lokal çürümelere ve küf oluşumuna neden olduğundan yol dolgusu için uygun bir dolgu malzeme değildir. Bu çalışmada, her iki atığın dezavantajlarını dengelemek ve birlikte değerlendirilerek kullanımlarını mümkün kılmak amaçlanmıştır.

Filtre çamuru katkılı kırmızı çamur numunelerinin yol dolgusuna uygunluğu, serbest basınç deneyi ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi ile araştırılacaktır.

Ayrıca en ideal karışım numunesi üzerinde SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizi ile detaylı inceleme yapılacaktır. Çalışma kapsamında yapılan testlerin ve analizlerin sonuçlarına göre kırmızı çamur ve filtre çamurunun yol dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilecektir.

#### *Araştırmanın önemi*

Dünya boksit rezervi 55-75 milyar ton olup bunun yaklaşık 30 milyar tonu işletilebilir durumdadır. Gine, Avustralya, Vietnam, Brezilya ve Jamaika dünyanın en çok boksit rezervine sahip ülkelerdir. Bu ülkeler dünyanın %73' lük boksit rezervini ellerinde bulundurmaktadır. Türkiye ise %0,21' lik dilim ile 63 milyon ton boksit rezervine sahiptir (İMİB, 2021). Türkiye' de boksit cevherlerinden alümina ve alüminyum üreten tek tesis Konya Seydişehir Eti Alüminyum Tesisleri' dir. Bu tesis yılda 550 bin ton boksit cevheri işleyip 260 bin ton kalsine alümina ve 82 bin ton birincil alüminyum üretmektedir (Günaydın, 2024). Bir ton alümina üretimi için yaklaşık 0,8-1,5 ton kırmızı çamur açığa çıkar (Eray, 2019). Bu da ülkemizde 260 bin ton kalsine alümina üretimi için yılda 208 bin ile 390 bin ton arasında kırmızı çamur oluşması anlamına gelir. Kırmızı çamur atıkları genelde derin vadi göletler, barajlar ve kanallarda depolanır. 1973 yılından beri faaliyet gösteren Konya Seydişehir Eti Alüminyum Tesisleri' nde kalsine alümina üretimi sonucu oluşan kırmızı çamur atıkları, atık barajına basılarak depolanmaktadır. Kırmızı çamur atığı, fabrikadan baraja 3,8 km uzunluğunda 2 adet çelik boru hatlarla gönderilmektedir (Arslan, 2016). Depolama sahası ve iletim hatları güzergahında kırmızı çamurun kimyasal bileşenlerinin çevreye ve yeraltı sularına sızmasına karşı gerekli önlemler alınmaması büyük riskleri ortaya çıkarır.

2023-2024 şeker kampanya sezonunda dünyada 181,4 milyon ton şeker üretimi yapılmıştır. Bu üretimin %79' u kamıştan, %21' i pancardan gerçekleşmiştir. 2024-2025 şeker kampanya sezonu için 175,6 milyon ton üretim öngörülmüştür. 2023-2024 şeker kampanya sezonunda Türkiye dünyada %2' lik üretim payıyla 3,34 milyon tonluk şeker üretimine sahiptir (Türkşeker, 2024). 1 kg şeker üretimi için yaklaşık 8 kg pancar gerekir. Pancarın da yaklaşık %8' i kadar filtre çamuru çıkar. Buna göre yıllık 3,34 milyon ton şeker üretiminden yılda yaklaşık 2 milyon 138 bin ton filtre çamuru oluşmaktadır. Oluşan filtre çamuru, şeker fabrikalarına ait atıksu havuzlarına yakın boş arazilerde depolanmaktadır. Depolanan filtre çamurunun kimyasal bileşenlerinin çevreye verdiği zarar insan sağlığı açısından büyük riskler doğurabilir.

Ülkemiz dünya kömür rezervinin yaklaşık %2,1' ini içermektedir ve linyit açısından önemli bir yere sahiptir. 2024 yılı verilerine göre ülkemizin 20,53 milyar tonu linyit ve asfaltit, 1,51 milyar tonu taşkömürü olmak üzere toplam kömür kaynağı yaklaşık 22,04 milyar tondur. Dünyada güncel verilere göre ise kanıtlanmış işletilebilir kömür rezervi 1,075 trilyon ton civarındadır (TKİK, 2025). Türkiye' de 2024 yılında elektrik enerjisi üretimi bir önceki yıla göre %7,1 artarak 354,6 TWh olarak gerçekleşmiştir. Bu elektriğin yaklaşık %56,7' sine tekabül eden 201,1 TWh üretim ise termik santrallerden elde edilmiştir (TEİAŞ, 2025). Taş kömürü yakıldığında %5-15, linyit kömürü yakıldığında ise %10-25 oranında uçucu kül çıkar. Linyitin elektrik üretiminde daha çok payı olduğu düşünülerek 1 ton kömürden yaklaşık 100-250 kg uçucu kül çıkar. 1 MWh elektrik başına yaklaşık 0,9-1,2 ton kömür yakılıp 150-250 kg uçucu kül çıkar (EMO, 2018). Buna göre Türkiye' de 2024 yılında 201,1 TWh elektrik elde edilirken yaklaşık 30 milyon-50 milyon ton uçucu kül ortaya çıktığı anlamına gelir. Pek çok ülkede ortaya çıkan uçucu külün yaklaşık %80' i çimento üretimi başta olmak üzere pek çok inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılabilir (Alkaya, 2009). Ülkemizde de çevresel sorunlara ve ekonomik kayıplara yol açılmaması adına uçucu külün değerlendirilmesi adına pek çok araştırma yapılmaktadır.

Ülkemiz açısından kırmızı çamur ve filtre çamurunun yıllık oluşma miktarlarına bakıldığında bu atıkların çevreye ve ekonomiye getirdiği zarar göz ardı edilemez. Onlarca sektörle ilişkisi olan alüminyum ve şekerin üretimini azaltmak veya bitirmek mümkün görünmemektedir. Bununla birlikte inşaat sektöründe malzemelerde kullanılacak ham madde ihtiyacının yoğun olması sebebiyle bu atıkların inşaat sektöründe kullanımının değerlendirilmesi kritik bir öneme sahip olmaktadır. Uçucu külün meydana getireceği çevresel ve ekonomik zararları azaltmak adına bu atık malzeme üzerinde senelerce bilimsel ve uygulamaya yönelik çalışmalar yapılmıştır ve yapılmaya devam edilmektedir. Yapılmış çalışmalarda uçucu küle ilgili birçok olumlu sonuçlar alınmış, başka atıkların değerlendirilmesi konusunda da uçucu külden kurtarıcı malzeme olarak istifade edilmiştir. Bu çalışmada da filtre çamuru ve kırmızı çamurdan optimum verim alınmaya çalışılmış, bu süreçte uçucu kül malzemesi takviye edilerek verim arttırılmaya çalışılmıştır. Yapılacak çalışmadan çıkacak sonuçlar hem birtakım mühendislik problemlerine bir çözüm hem de çevreye ve ülke ekonomisine faydası olabilecektir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Filtre Çamuru

Tarlalardan silolara getirilen pancarlar, içerisindeki taş, toprak, yaprak gibi yabancı maddelerin ayrıştırılmasıyla yüzdürme kanalları vasıtasıyla fabrikaya sevk edilir. Pancarlar; yıkama, kıyılma ve haşlama işlemleriyle difüzyon kulesinde şekeri alınır. Difüzyon kulesinden çıkan ham şerbet, birinci ve ikinci kireçlenme işlemlerinden geçerek şeker dışı maddeler çöktürülür. Ardından ham şerbet birinci karbonatlanma işlemi için kazana gönderilir. Bu kazana kireçlenmiş şerbet üstten, karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gazı alttan verilerek çökme işlemi yapılır. Karbonatlanma için gerekli olan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gazı, fabrika içerisinde kireç üretimi yapan tesisten elde edilir. Birinci karbonatlanma sonrası çamurlu şerbet, yoğunluk farkı dolayısıyla çamur parçacıklarının dibeye çökmesi ilkesine dayanan bir dekantörde çöktürülür. Dekantörün üstünde berrak şerbet, altında çamurlu şerbet birikir. Çamurlu şerbet pres filtrelelere veya döner filtrelelere gönderilerek şerbetin çamurdan ayrıştırılması sağlanır. Ayrıştırma sonucu %70 kuru maddeli çamur fabrikadan uzaklaştırılıp başka tesislerde depolanır. Bu depolanan malzemeye malzemeye “Filtre Çamuru” denir (Topçu ve Sofuoğlu, 2017).

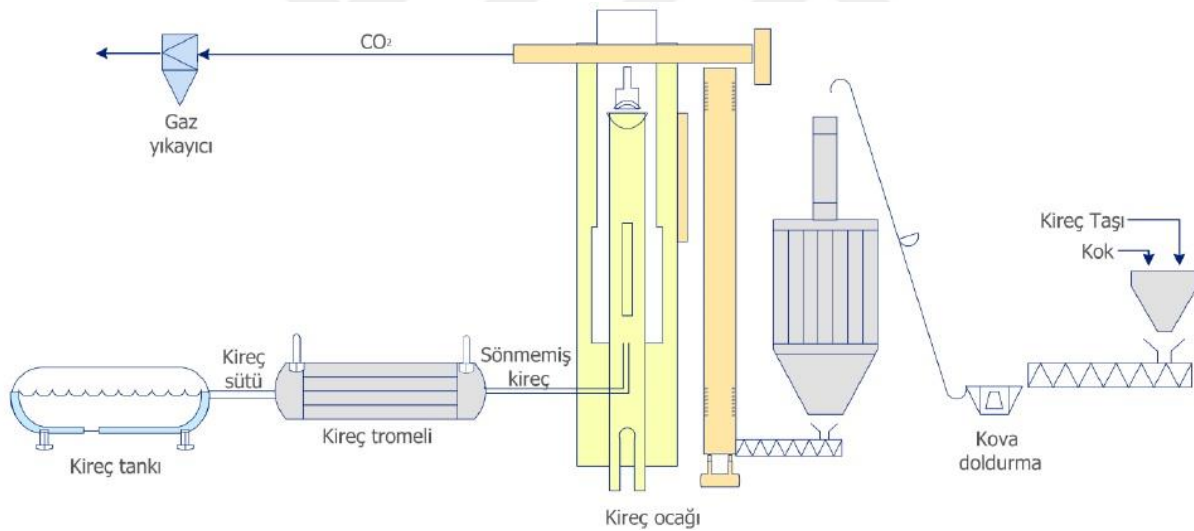
Yapılan literatür araştırmasında filtre çamurunun değerlendirilmesiyle ilgili yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Yapılan çalışmalara daha çok ülke dışında rastlanmaktadır. Ülkemizde filtre çamuru kavramı “**pres filtre atık kireç çamuru, kireç çamuru, şeker fabrikası atık çamuru, şeker fabrikası atığı, şeker sanayi atığı, şeker fabrikası filtre keki**” gibi kavramlarla adlandırılarak çalışmalar yapılmıştır. Ülke dışı kaynaklarda “**filter sludge, press filter waste, lime sludge, sugar filter mud, sugar industry waste**” gibi kavramlarla filtre çamuru üzerinde çalışmalar vardır.

#### 2.1.1. Filtre çamurunun şeker fabrikasında oluşum süreci

Şeker pancarlarının fabrikaya kabulü, boşaltılması, silolanması işlemlerinden sonra silolardan fabrikaya yüzdürme kanalları yardımıyla su ile veya kuru yolla sevk edilir. Pancar yüzdürme kanalları vasıtasıyla pancar üzerinde bulunan taşlar, çamurlar ve otlar tutucularda ayrıştırılır. Ayrıştırılan pancarlar buradan pancar yıkama teknesine geçer ve burada yaklaşık 10-15 dk. döndürülerek yıkanır. Ön yıkama, esas yıkama ve durulama işlemlerinden geçen pancarlar toprak, kum, taş ve pancar kuyruklarından ayrılır. Yıkama işleminden sonra kıyım işleminden geçen pancarlar, haşlama tankına alınarak burada

sıcak sirkülasyon şerbeti ile haşlama işlemi yapılır. Kıyılmış pancar-şerbet karışımı kule difüzörünün alt süzgecinin hemen üzerine basılarak sıcaklığın 70-72 °C' ye getirilmesi ve pancar hücrelerinin denatüre olarak şeker çıkışı sağlanır. Kule difüzöründe ayrışma sonrası yaş pancar posası preselere, ham şerbet ise tekrar haşlama teknesine verilir. Ham şerbetin bir kısmı haşlama teknesinde bulunan alın süzgeci yardımıyla çekilerek arıtıma verilir (ÇŞİB, 2020).

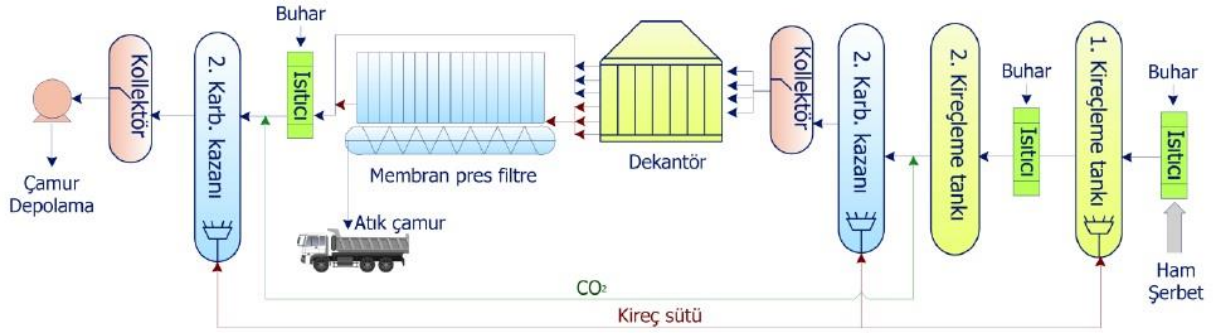
Ham şerbet bir tekne içerisinde şeker dışı maddeleri çöktürmek amacıyla kireçlenerek pH kademeli olarak 11' e getirilir. I. Kireçleme adı verilen bu işlemde teknenin bir ucundan ham şerbet ile diğer ucundan teknenin altından verilen kireç sütü  $[Ca(OH)_2]$  sabit kanatlar yardımıyla ters istikamette ilerleyerek karışım sağlanır. I. Kireçleme sonunda şeker dışı maddeler pıhtılaşmış ve süzölmeye hazır hale gelmiştir. I. Kireçlemeden çıkan şerbet II. Kireçleme teknesine alınır, burada II. Kireçleme yapılarak şerbet içindeki invert şeker parçalanır ve bakteri faaliyeti durdurulur (ÇŞİB, 2020). Ham şerbetin I. Kireçlenme aşaması Şekil 2.1' de verilmiştir.



Şekil 2.1. Ham şerbetin I. kireçlenmesi (ÇŞİB, 2020)

I. ve II. Kireçlenmeden geçen ham şerbet 80-82 °C' de I. Karbonatlamaya gelir. Karbonatlama kazanında kireçlenmiş şerbet üstten, karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gazı ise alt kısımdan verilir. Çökme işlemi tamamlanmış şerbet, karbonatlama kazanının alt kısmından alınır. I. Karbonatlamaya pH' ı 12 olarak gelen kireçli şerbet, I. Karbonatlanmayı 10,8-11,2 arasında pH ile terk eder. I. Karbonatlanma sonrası çamurlu şerbet, yoğunluk farkından dolayı çamur parçacıklarının dibine çökmesi ilkesine dayanan bir dekantörde çöktürülür. Dekantörün üstünde berrak şerbet, altında ise çamurlu şerbet birikir. Dekantör, çamurlu şerbeti pompa aracılığıyla pres filtreler veya döner filtreler

göndererek şerbetin çamurdan ayrışması sağlanır. Filtre sonrasında elde edilen şerbet, dekantörün üstündeki berrak şerbet ile karıştırılarak ısıtıcılara gönderilir. Isıtıcılarda 94-96 °C' ye kadar ısıtılan şerbet, II. Karbonatlanmaya alınır. Açığa çıkan %70 kuru maddeli çamur ise fabrikadan uzaklaştırılır (ÇŞİB, 2020). Ham şerbetin kireçleme, karbonatlama ve atık çamurun çıkış işlemleri şeması Şekil 2.2' de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Ham şerbetin kireçleme, karbonatlama ve atık çamurun çıkış işlemleri (ÇŞİB, 2020)

Fabrikadan yerleşim yerlerine uzak noktalarda belirlenen açık arazilere gönderilen atık çamurlar, bu açık arazilerde kurumaya bırakılıp depolanmaktadır. Tunçez (2007), Konya ilinde Şeker Fabrikasından çıkan atıksuların borular yardımıyla Karatay ilçesi, Aslım bataklığı mevkinde bulunan boyutları 200 x 300 x 1,75 m olan 4 adet havuza pompalandığını, atıksuyun arıtımından sonra kalan çamurun kamyonlarla taşınarak havuzlar civarındaki boş arazilerde depolandığını belirtmiştir (Şekil 2.3.).



Şekil 2.3. Şeker fabrikası atık çamur havuzlarının uzaktan görünümü (Google Earth, Görüntü Tarihi: 15/03/2025)

### 2.1.2. Filtre çamurunun kimyasal bileşenleri

Yaklaşık %10-15 oranında organik madde (ot, posa, pancar kuyruğu vb.) içeren filtre çamurunun kimyasal bileşenleri Çizelge 2.1’ de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Filtre çamurunun kimyasal bileşenleri (Topçu ve Soğuoğlu, 2017)

Madde	Kütlece Oran (%)
Mgo	2,0242
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,2064
SiO <sub>2</sub>	3,7480
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1948
SO <sub>3</sub>	0,2142
K <sub>2</sub> O	0,0910
CaO	56,3714
TiO <sub>2</sub>	0,0783
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0392
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0255
BaO	0,2331
LOI (Yanmada Kayıp)	34,7740

### 2.1.3. Filtre çamurunun değerlendirildiği alanlar

Bitkilerde asitlik derecesinin artması, bitkilerin ve toprak mikroorganizmaların yaşamsal aktivitelerini kısıtlar ve hastalıkların gelişimini arttırır. Bu nedenle özellikler pH değeri 5,5’ ten küçük olan toprakların kireçlenerek pH değerinin arttırılması gerekir. Bu durumda pH düzenleyici olarak %0,3-0,8 arasında azot, %0,2-1 arasında fosfor, %0,4-0,8 arasında potasyum bulunan filtre çamuru oldukça iyi bir düzenleyicidir (URL-1, 2004).

Filtre çamurunun elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir yakıt olarak kullanılmasıyla ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada filtre çamurunun çöktürme tankından ayrılmasından sonra ağırlıkça %10-20 küspe ilave edilir ve kurutucuda su içeriğinin %65-75 ‘ ten %45-55’ e düşürülmesi sağlanır. Kurutucudan yakma tesisine gönderilen filtre çamurunun burada yakılmasıyla buhar elde edilir ve bu buhar buhar türbini jeneratörüne gönderilir ve elektrik enerjisi üretimini sağlar (URL-2, 2020).

Filtre çamuru fide yetiştiriciliğinde substrat görevinde kullanılabilir. Bununla alakalı çalışmada filtre çamuru posa karışımının su içeriği %40-70’ e ayarlanır. Karıştırma ve çalkalama işleminden sonra filtre çamurunun su içeriği %20-40’ a getirilir. Birincil ve ikincil fermantasyon işlemlerinden geçen filtre çamuru son olarak karıştırılıp

çalkalanarak yenilenebilir okalıptüs fide yetiştirme substratı olarak hazırlanır. Bu yöntemle okalıptüs fide yetiştirme substratının yenilenebilir hammadde kaynağı sorunu çözülmüş ve filtre çamurunun çevreci bir şekilde değerlendirilmesi sağlanmıştır (URL-3, 2020).

Filtre çamuru, beton üretiminde mikro dolgu maddesi olarak kullanılabilir. Bunun için bileşenleri %74,2 kalsiyum karbonat, %2 şeker, %9,5 azotsuz organik madde, %0,9 azot, %2,8 farklı asitlerin tuzları formundaki kireç, %3 diğer mineral maddeler olan filtre çamuru kullanılmıştır. Filtre çamuru miktarı ise Portland çimentosunun kütlece %40' ını geçemez. Karışım işleminden önce filtre çamuru 0,071 mm' den küçük tanecikli hale getirilir, 1200 °C' de ısıtılarak organik maddeler yakılır ve mineraller daha aktif hale gelir. Karışım işleminden sonra karışımın türüne bağlı olarak kireç oranı %32-40 civarındadır. Filtre çamuru bu haliyle beton için aktif bir katkı maddesi durumundadır ve betonun mukavemetini ve yoğunluğunu artırabilecek düzeydedir (Shoira, 2006).

Köpük betonlarda kuvars kumu geleneksel bir katkı malzemesidir. Kuvars kumunun yoğunluğunun yüksek olması sebebiyle beton ağırlığını artıracığı için her zaman tercih edilmez. Köpük beton üretiminde bu malzeme yerine filtre çamuru kullanılabilir. Filtre çamuru yapısında bulunan kalsiyum karbonatın tanecikleri, karbondioksit ve hava yardımıyla sıkışır. Bu nedenle filtre çamurunun görünür yoğunluğu kum ve çimentoya göre önemli derecede düşüktür. Gözenekli karbonat parçacığı ile çimento tanesi arasındaki temas bölgesinin güçlü bağları sayesinde filtre çamuru içeren köpük betonun çatlamaya karşı daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca karbonat-çimento tanecik temas bölgelerinin, çimento-çimento ve çimento-kuvars tanecik temas bölgelerine göre daha derin şekilde hidrastayon geçirdiği için sızdırmazlık özellikleri artar (Shoira, 2006).

Filtre çamurundan geri dönüştürülmüş tuğlaların yapımıyla ilgili çalışmada %50-70 su içeriğine sahip filtre çamuru su içeriği %30' u geçmeyecek şekilde kurutulur. Lös, cüruf ve kırılmış beton öğütülüp olarak karıştırılarak ince taneli homojen hale getirilir. Bu karışıma filtre çamuru, genleşmiş ve camlaşmış mikroboncuklar ve kükürt ve azot fiksasyonu koku giderici ile homojen olarak karıştırılır ve bu karışıma klinker çamuru elde edilecek şekilde su katılır ve karıştırılmaya devam edilir. Klinker çamurundan tuğlalar kalıplanır ve kurumaya bırakılır. Ardından tuğlalar fırına verilerek sinterleme işlemi uygulanır ve doğal şekilde soğumaya bırakılarak yanmış tuğla elde edilir. Bu

sonuçla düşük maliyetli, hafif, basınca dayanıklı, sızıntıyı önleyici ve çevreci geri dönüştürülmüş tuğlalar elde edilmiş olur (URL-4, 2015).

Hayvan beslemede kum taşı ve kireç taşı, kalsiyum kaynağı olarak tercih edilmektedir. İçeriğinde kalsiyum, magnezyum, krom, demir, kükürt bulunması ve temizlenip istenilen öğütme inceliğine getirilebilmesi sebebiyle filtre çamuru, kireç taşı yerine alternatif besin kaynağı olarak kullanılabilir (Shoira, 2006).

Filtre çamuru, özel bir yöntemle baryum stearat ( $C_{36}H_{70}BaO_4$ ) ile karıştırılarak çatı su yalıtımı, zemin nem yalıtımı için uygun su ve nem geçirmez bir yapı malzemesi elde edilebilir. Üretim sırasında atık oluşumu ve yakıt tüketimi meydana gelmemektedir (URL-5, 1991).

#### **2.1.4. Filtre çamuru ile ilgili yapılmış çalışmalar**

Alaryan (2022), Konya II. Organize Sanayi Bölgesindeki düşük ve yüksek plastisiteli iki tür kil zeminin pres filtre atık kireç çamuru (PKF) ile stabilizasyonunu araştırmıştır. Yüksek ve düşük plastisiteli killerin iyileştirilmesi amacıyla numunelere farklı oranlarda katkı maddeleri; PKF (%5, %10, %15, %20) karşılaştırma yapmak amacıyla çimento (%5, %10) ve kireç (%5, %10) eklemiştir. Tüm karışımlara; 0, 7, 15 ve 28 günlük kür süreleri uygulamıştır. Optimum su içeriğinde hazırladığı numuneleri sırasıyla, kayma mukavemeti, oturma ve permeabilite değerlerini araştırmıştır. Killi zeminlerdeki PKF katkısının etkilerini analiz etmiş ve PKF atığının optimum katkı oranlarını belirlemiştir. Çalışmada, yüksek ve düşük plastisiteli kil zeminlere belirli oranlarda ilave ettiği PKF' nin zeminlerin basınç ve kayma mukavemetini artırıp oturma miktarını azalttığını tespit etmiştir.

Topçu ve Sofuoğlu (2018), harç karışımında çimento ağırlığına göre farklı oranlarda çimento yerine kullandığı pres filtre atık kireç çamurunun (PKF) harç özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Laboratuvarda referans harçlarla yaptıkları deneylerden elde ettikleri sonuçlar ve basınç dayanım değerlerini, atık malzeme içeren harç numuneleriyle karşılaştırmışlardır. Kum, su ve CEM I 42,5, CEM II 32,5 tipi çimento harç karışımına %5, %10, %15, %20 oranında PKF ekleyip bu karışımları 4x4x16 ve 2 adet 4x4x8 cm ebatlarında prizmatik kalıplara dökmüşlerdir. Numunelere 7 ve 28 günlük basınç deneyleri yapmışlardır. %5 PKF katkılı CEM I 42,5 çimentolu harç karışımının 7 günlük ortalama basınç dayanımını 29,25 MPa olarak bulmuşlar, bu

değerlerin devam eden çalışmalar çerçevesinde uygun standartlara sahip olduğunu göstermişlerdir.

Eroğlu (2003), orman yollarının üst yapı elemanlarından olan kaplama tabakası ile taban zeminlerin iyileştirilmesinde, alternatif stabilizasyon tekniği araştırmıştır. Bu amaçla Afyon-Çay Seka İşletmesi atığı olan kireç çamurunu katkılı çimentoyla karışıma sokarak basınç dayanım testi, priz başlama ve sona erme, hacim genişlemesi, tane büyüklüğü, yoğunluk ve özgül ağırlık deneyleri, SEM (Taramalı Elektron Mikroskop) analizleri uygulamıştır. Ayrıca kireç çamurunu 3 değişik zemin türüyle karıştırarak üç eksenli basınç dayanımı, Atterberg limitleri, konsolidasyon, kompaksiyon, su muhtevası deneylerine tabi tutarak değişimleri incelemiştir. Çalışmada, kireç çamurunun %5 ile %10 arası oranlarda katılarak oluşturulan numunelerin iyi basınç dayanımı gösterdiğini tespit etmiştir. %5-%10 kireç çamuru katkısının; çalışmada kullandığı kumlu kil, killi balçık ve ağır kil zeminlerde belirli oranlarda dayanımını ve Atterberg limitlerini olumlu yönde etkilediğini tespit etmiştir. Bu oranların taban zeminlerinin iyileştirmesinde kullanılabileceğini göstermiştir.

Man vd. (2017), delikli tuğlaya ağırlıkça %0-%30 arasında düşük dereceli diatomit ve şeker filtre çamuru (SFM) karıştırarak 700-900 °C arasında pişirme sıcaklığında delikli tuğlanın bu oranlara göre mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu özellikleri DSC-TG termal analiz, XRD, SEM ve universal test makinesi ile belirlediler. Pişirme işleminden sonra gözenekli tuğla numunelerinin kabul edilebilir performans parametrelerine sahip olduğunu görmüşlerdir. %70 diatomit, %20 şeker filtre çamuru, %6 dolomit, %4 sodyum perborat karışımının 800 °C' de pişirilmesiyle mekanik ve fiziksel açıdan en iyi sonuçların elde edildiğini görmüşlerdir. Görünür porozite %50,39 , birim hacim ağırlığı 1,25 gr/cm<sup>3</sup> , eğilme mukavemeti 10,05 MPa olarak belirlemişlerdir.

Li vd. (2013), kireç esaslı hammadde olarak şeker filtre çamuru (FM) ile Portland çimentosunun hazırlanmasını değerlendirmişlerdir. Ham karışımın yanabilirliği, klinkerin SEM karakteristiği ve faz bileşenleri, çimentonun basınç dayanımı, priz süresi ve hidratasyon karakteristiğini incelemişlerdir. Sonuç olarak FM' nin ham karışımın yanabilirliğini iyileştirebildiğini ve likit faz miktarını artırabileceğini göstermektedir. %20' den az FM, C<sub>3</sub>S oluşumunu desteklemeye ve klinkerdeki C<sub>3</sub>S içeriğini yükseltmeye yardımcı olur. %20' den fazla FM ise yeni faz oluşumuyla sonuçlanacaktır.

Uygun FM miktarının basınç dayanımını artırabileceği, priz süresini kısaltabileceği ve çimento hidratasyonunu artırabileceğini bulmuşlardır. Fazla FM oranının ise basınç dayanımını azaltabileceğini, priz süresini geciktirebileceğini ve çimento hidratasyonunu uzatabileceğini tespit etmişlerdir.

Durgun (2019), cam sanayi atığı olan cam tozu, bor sanayi yan ürünü olan kolemanit cevheri atığı ve şeker fabrikaları atıklarından olan filtre kekinin alçı ve kireç esaslı harçlarla değerlendirmiştir. Çalışmada alçı yerine %10-%20-%30 oranlarında tüm atık malzemeleri belli oranlarda karıştırarak eklemiştir. Karışım EN 13454-2 Standardına göre hazırlanarak 4x4x16 cm kalıplarda 28 günlük kür uygulamıştır. 28 gün sonra etüvde 40 °C sıcaklıkta 24 saat beklettiği numunelere birim ağırlık, ultrasonik dalga hızı (UPV), ısı iletkenlik, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneylerini uygulamıştır. Ayrıca Arşimet metoduyla görünür porozite değerlerini ölçmüştür. Sonuç olarak atıkların kullanımının ısı özelliklerini iyileştirirken mekanik özellikleri olumsuz etkilediği göstermiştir.

Shoira (2006), Özbekistan’ da bulunan Khorezm Şeker Şirketi’ nin fabrikadaki faaliyetleri ve üretimle alakalı çevresel sorunları incelemiştir. Atık kireçlerin, kuru ve küçük boyutlu taneciklerden oluştuğu için rüzgarda kolayca savrulabildiğini belirtmiştir. Asya ülkelerinde atık kirecin zemin iyileştirici, gübre, sera toprak karışımlarında katkı maddesi, atık su arıtımında emici madde, köpük beton ve çimento üretiminde mikro dolgu madde ve hayvan yemlerinde mineral katkı maddesi gibi durumlarda kullanılması konusunda yöntemleri açıklamıştır. Bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarını incelemiştir. Bu yöntemlerin Khorezm Şeker Şirketi’ nde çıkan kireç atığı için uygulanabilirliğini incelemiştir. Yöntemleri tartışırken ekonomik ve teknolojik özellikleri dikkate almıştır. Sonuç olarak, kireç atığının çimento ve köpük beton üretiminde ana iyileştirme ürünü olarak kullanılmasını önermiştir. Ayrıca zemin iyileştirici olarak, sera toprak karışımında katkı maddesi olarak ve su arıtımında emici olarak kullanılmasını önermiştir.

Özkan ve Yenginar (2023), yüksek plastisiteli kile toprağın kuru ağırlığının %3-%6-%9-%12-%15 oranlarında filtre çamuru (FS) ilave ederek jeoteknik özelliğindeki değişimleri incelemişlerdir. Bu oranlara sahip karışımlar üzerinde kıvam limitleri, sıkıştırma parametreleri, dayanım, şişme potansiyeli, CBR gibi değerlerin değişimlerini belirlemişlerdir. Sonuç olarak, plastik limit ve optimum su içeriği toprağa eklenen FS

oranı arttıkça artmakta; likit limit, plastisite indisi ve maksimum kuru yoğunluğu azalmaktadır. FS oranı ve kür süresi arttıkça toprak dayanımı artmaktadır. En yüksek dayanım %15 FS ile elde edilmiştir. Optimum katkı oranıyla serbest basınç dayanımı %33 artmış, yüksek plastisiteli kilin şişme yüzdesi %42,5' ten %20' ye düşmüştür. Yaş CBR sonuçlarına göre toprağın taşıma gücü %1,1' den %4,4' e çıkmıştır. Böylece FS atık malzemesinin zeminin jeoteknik özelliklerini iyileştirdiklerini tespit etmişlerdir.

## 2.2. Kırmızı Çamur

Madenlerden çıkarılıp alüminyum üretim tesislerine getirilen boksit cevheri, kırılıp öğütülme işlemlerinden sonra 140-250°C sıcaklık ve yüksek basınçlı otoklavlarda sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ile tepkime edilir. Bu sırada boksit içerisindeki gibbsit, böhmit, diaspor alüminyum mineralleri sodyum aliminat  $[Na[Al(OH)_4]]$  formunda çözünür. Tepkime sonucunda çözünmemiş  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $CaO$  gibi safsızlıklar da ortaya çıkar. Elde edilen bulamaç, önce çöktürme tanklarına alınır. Çözünmeyen safsızlıklar katı haldedir ve bunlar çöktürme tankında pres filtreleri ve çöktürme üniteleri ile ayrılır. Ortaya çıkan katı atık olarak nitelendirilen malzemeye “Kırmızı Çamur” denir (ÇŞİB, 2016).

Yapılan literatür araştırmasında kırmızı çamur ile ilgili yapılan çalışmalar hem ülke içinde hem ülke dışında oldukça fazladır. Ülkemizde kırmızı çamur kavramı “**atık kırmızı çamur, boksit kırmızı çamuru, bayer proses artığı, alümina üretim artığı, boksit atık çamuru, bayer çamuru**” olarak da adlandırılmıştır. Ülke dışındaki kaynaklarda ise “**red mud, red mud base bauxite residue, bayer process residue, bauxite tailings, bayer red mud, bauxite processing waste, alümina refinery waste**” gibi kavramlar kullanılmıştır.

### 2.2.1. Bayer Prosesi Yöntemi sonucu kırmızı çamur oluşum aşamaları

Dünya’ da boksitten alümina üretim yöntemi olarak en ekonomik yöntem olması sebebiyle genelde Bayer Prosesi tercih edilmektedir. Bu yöntem 1887 yılında Karl J. Bayer tarafından geliştirilmiştir (Arslan, 2016).

Bayer Prosesi yönteminde, fabrikaya gelen boksit, elekten geçirilerek çekiçli kırıcı ile boyutu 25 mm altına getirilir. Boksit kırıldıktan sonra, buharlaştırma bölümünden gelen kuvvetli çözelti ve kayıpları karşılayacak miktarda dışardan ilave

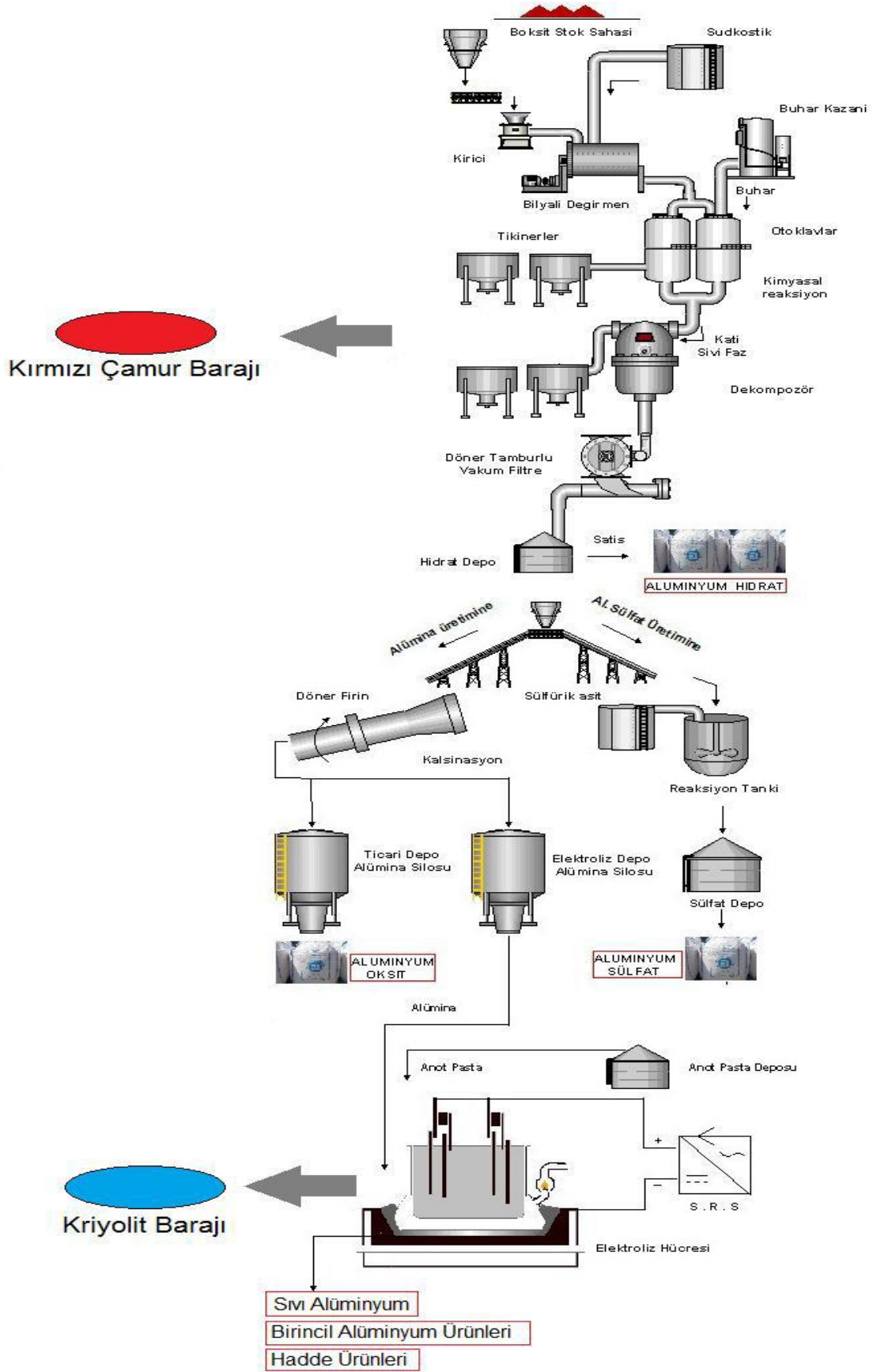
edilen taze kostik ile birlikte bilyalı değirmen öğütme devresine gönderilir. Malzeme burada hamur haline geldikten sonra ön ısıtma işlemi yapılır, ardından basınçlı-pistonlu pompalar yardımıyla otoklava gönderilir. Burada boksit içerisindeki alümina ( $Al_2O_3$ ), yüksek sıcaklık (110-270 °C) ve basınç altında çözünerek sıvı faza geçer. Hamur, atmosferik şartlara indirildikten sonra seyreltme ünitesine gönderilir. Seyreltilen hamur, çöktürme tankında sıvı katı olarak ayrıştırılır. Burada alüminat çözeltisi, alüminyum hidroksit kristali halinde çöktürülür. Vakum filtrasyon işlemiyle hidroksit çökeltisi ayrılır ve saf su ile yıkanır. Döner ya da akışkan yataklı fırınlarda kalsine edilmesi ile kuru, beyaz toz halinde alümine elde edilir. Elde edilen üst akım sodyum alüminat ( $NaAlO_2$ ) çözeltisi, kontrol filtrelerine gönderilerek süzülür. Süzülen sodyum alüminat çözeltisi Dekompozisyon ve Hidrat bölümlerine gönderilir. Boksitte bulunan silika, sodyum alüminyum silikat ( $NaAlSiO_4$ ) olarak çöker. Bununla birlikte demir, titanyum oksit ve diğer kirlilikler de çöktürülür. Çöken bu malzemeler kırmızı çamuru oluşturur (ÇŞİB, 2016). Alüminyum üretim akım şeması ve bu şema içerisinde kırmızı çamurun yeri Şekil 2.4’ te belirtilmiştir.

Çalışmada kullanılan kırmızı çamur numunesinin temin edildiği Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş. ‘ de, Bayer Prosesi sonucu oluşan kırmızı çamur atığı, baraja gönderilmeden önce sıvı fazdaki alüminyum ve kostik ihtivasını en aza indirmek amacıyla, ters akım prensibi ile çalışan 6 kademe yıkama tikinerlerinden geçirilir. Yıkama sisteminde alt akım sıvı/katı oranı 2,5-3 civarındadır. 1 ton kırmızı çamuru yıkamak için 5-6 m<sup>3</sup> sıcak su gerekir. Yıkama esnasında 1. yıkayıcıdan 6. yıkayıcıya kostik konsantrasyon azalır, 6. yıkayıcı alt akım sıvı/katı oranı maksimum 2,5 olarak ayarlanır ve baraj dönüş suyu ile sıvı/katı oranı 6-8 civarına seyreltilir (Arslan, 2016). 6. yıkayıcı alınan ve katı oranı kütlece %28-29 olan kırmızı çamur, pompa basma gücünü artırmak amacıyla katı oranı bir miktar düşürülür ve çift kademeli santrifüj pompalar ile kırmızı çamur atık barajlarına basılmaktadır (Muş, 2015).

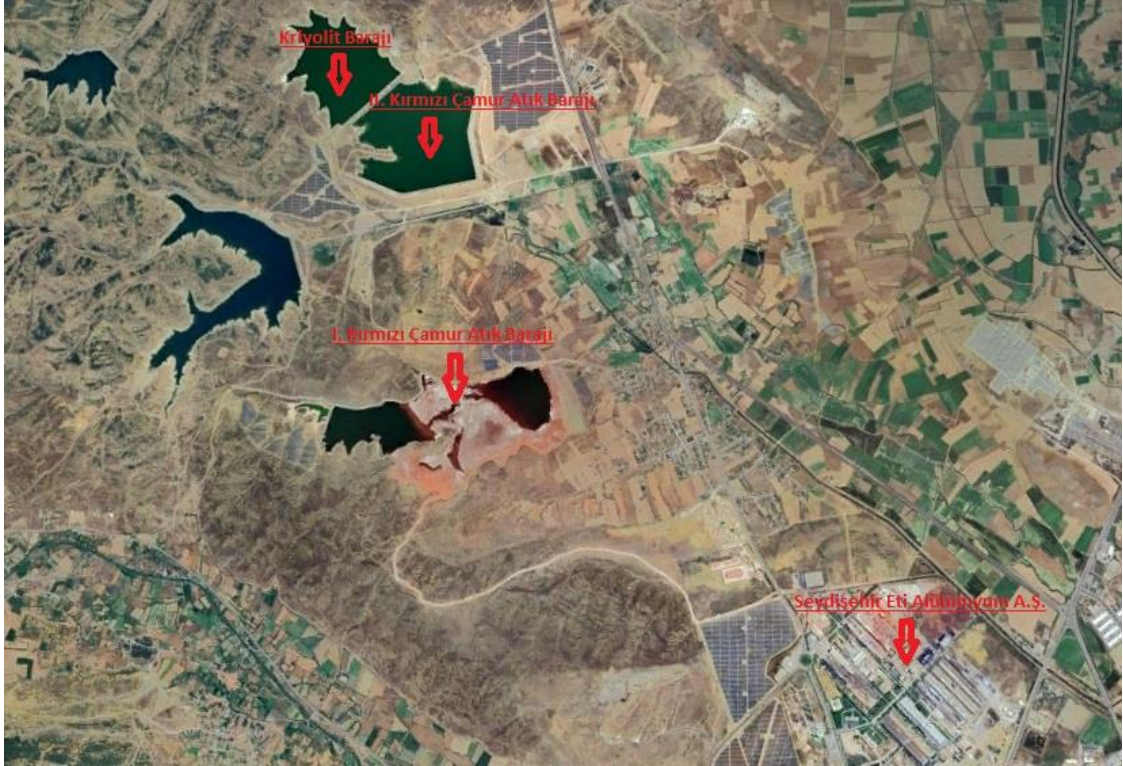
Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş. Alümina Fabrikası’ ndan çıkan kırmızı çamur 2 adet atık barajına basılmaktadır. Birinci baraj tesisden 3 km uzaklıkta olup barajda çevreye ve yeraltı sularına sızdırma olmaması için taban, kenarlar ve gövdede sıkıştırılmış kil dolgu uygulaması yapılmıştır. Baraja gönderilen çözeltilerin katı kısımları zaman içinde çökelerek depolanır, üst kısımdaki sıvı çözelti ise çamuru sulandırmak amaçlı kullanılır. Barajda aşırı dolma durumlarında ikinci baraja by-pass amaçlı takviye yapılmaktadır

(Muş, 2015). Seydişehir Eti Alüminyum Tesisleri ve kırmızı çamur atık barajının haritadaki konumu Şekil 2.5' te verilmiştir.





Şekil 2.4. Alümina üretimi akış şeması (Muş, 2015)



Şekil 2.5. Seydişehir Et Alüminyum Tesisleri ve kırmızı çamur barajlarının konumu (Google Earth, Görüntü Tarihi: 31/07/2023)

## 2.2.2. Kırmızı çamurun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kırmızı çamurun kimyasal ve mineralojik bileşimleri ve fiziksel özellikleri; boksitlerin tiplerinden, farklı çözündürme uygulamalarından ve prosese giren katkı maddelerinden dolayı değişiklik gösterebilir. Çizelge 2.2 ve 2.3' te kırmızı çamura ait farklı çalışmacılar tarafından belirlenmiş fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşenleri verilmiştir.

Çizelge 2.2. Kırmızı çamurun fiziksel özellikleri

Özellik	Özdemir vd. (2024)	Deelwal vd. (2014)	Jha vd. (2020)
Malzeme Temin Yeri	Seydişehir/Türkiye	Uttar Pradesh/Hindistan	Jharkhand/Hindistan
Özgül Ağırlık	2,56	3,04	2,98
Likit Limit, LL (%)	40,5	45,5	38,0
Plastik Limit, PL (%)	37	32,3	27,14
Plastisite İndisi, PI (%)	3,5	13,2	10,86
Zemin Sınıfı (USCS)	ML	ML	ML
Optimum Su İçeriği (%)	34	33,5	29,1
Maksimum Kuru Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,41	1,53	1,62
Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	220	-	138,42
Kuru CBR (%)	4,15	7,8	7,8
Islak CBR (%)	2,85	4,2	4,2

Çizelge 2.3. Kırmızı çamurun kimyasal bileşenleri

Madde	Özdemir vd. (2024) Seydişehir/Türkiye	Rao vd. (2012) Orissa/Hindistan	Mukiza vd. (2019) Çin	Chandra vd. (2022) Karnataka/Hindistan	Sahoo ve Mohanty (2016) Odisha/Hindistan	Kalkan (2006) Seydişehir/Türkiye
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,30	22,84	22,45	18,20	18	20,20
SiO <sub>2</sub>	11,40	19,84	19,484	14,50	9,80	13,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,10	-	19,55	44,30	51	35,04
CaO	25,10	1,24	13,26	1,11	1,80	5,30
Na <sub>2</sub> O	9,35	7,75	8,83	9,29	5,30	9,40
TiO <sub>2</sub>	2,95	7,87	3,905	10,50	4,60	4
ZrO <sub>2</sub>	0,44	-	-	-	-	-
SO <sub>3</sub>	0,28	-	1,14	0,37	-	-
MgO	0,22	-	0,832	-	-	0,33
K <sub>2</sub> O	0,11	-	2,16	-	-	0,39
FeO	-	39,32	-	-	-	-
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,68	-	0,35	0,035	-
ZnO	-	0,45	-	-	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	0,74	0,15	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0,18	-	-

### 2.2.3. Kırmızı çamurun değerlendirildiği alanlar

Literatürde kırmızı çamurun, filtre çamuruna göre daha fazla potansiyel kullanım alanı görülmektedir. WIPO (World Intellectual Property Organization), EPO (European Patent Office) ve Türk Patent ve Marka Kurumu gibi patent kurumlarının verilerine bakıldığında, “red mud, bauxite residue, alumine waste, residue from Bayer Process” kavramlarıyla dünya genelinde on binlerce patent alındığı görülmektedir. Boksit cevherinin çıkarıldığı yere ve kullanılan yöntemlere bağlı olarak kırmızı çamurun kimyasal yapısında değişiklik olması sebebiyle kırmızı çamurun değerlendirme alanları da farklı olabilmektedir.

Kırmızı çamurdaki dikalsiyum silikat ( $Ca_2SiO_4$ ), çimento klinkerinin ana fazlarından biridir. Uçucu külün yapısındaki  $SiO_2$  ve  $Al_2O_3$ , kırmızı çamurda da bulunur ve bu maddeler su emme ve reaktif silika içeriğini iyileştirmek için kullanılabilir. Hammadde olarak kırmızı çamur, uçucu kül, kireç ve alçıtaşı kullanılarak çimento üretimi üzerine çalışmalar vardır. Kırmızı çamur katkısıyla çimento üretiminin enerji tüketimi azalır, çimentonun erken dayanımını ve sülfat etkisine karşı direncini artırır (Qiu ve Qi., 2011).

Sırbistan Birac Alüminyum Üretim Tesisi’nden elde edilen kırmızı çamurun standart beton karışımları üzerinde renk verici özelliği araştırılmıştır. Kurutulmuş, öğütülmüş, öğütülmemiş, kalsine edilmiş özellikte kırmızı çamurlar, öğütülmüş kireçtaşı, çimento ve su karışımından oluşan betonlara pigment olarak eklendiğinde ağırlıkça %1-%32 arasında kırmızı çamur içeren beton karışımlarının 14,83-27,77 MPa arasında kabul edilebilir basınç dayanımları gösterdiği tespit edilmiştir (Satapathy vd., 1991).

Kırmızı çamurun tuğla üretiminde kullanımıyla ilgili çalışmalar da yapılmıştır. Kırmızı çamur ile kilin belirli oranlarda (%80-20, %70-30, %60-40, %50-50) elde edilen karışımları 800-900-1100 °C sıcaklıklarda pişirilmesiyle 1,51-1,59 g/cm<sup>3</sup> arasında birim hacim aralığında tuğlalar elde edilmiştir. Üretilen tuğlaların sinterleme sıcaklıklarının artmasıyla mekanik dayanımlarının da arttığı görülmüş, optimum sonuçlar veren karışımın %50-50 olduğu anlaşılmıştır. Böylece kırmızı çamurun tuğla yapımında kullanılması; düşük maliyetli, geri dönüştürülebilir ve çevre dostu yapı malzemeleri olarak kullanılması potansiyelini taşımaktadır (Dodoo-Arhin vd., 2013).

Çin' in Shandong eyaletinin Zibo şehrinde, alttemel malzemesi kırmızı çamurdan oluşan 15 m genişliğinde ve 4 km uzunluğunda bir yol inşa edilmiştir (Şekil 2.6.). Yolun alt zemin stabilitesi ve dayanıklılığı ilgili departman tarafından test edilmiş ve sonuçların standartlarda bulunan dayanımları karşıladığı sonucuna varmışlardır (Yang vd., 2006).



Şekil 2.6. Zibo şehrinde kırmızı çamurun yol alttemel malzemesi olarak kullanımı

Çin' de bulunan Changsha Madencilik Araştırma Enstitüsü ve Shandong Alüminyum Şirketi kırmızı çamurun madene çimento dolgusu olarak kullanılabilmesi için çalışmalar yapmışlardır. Bu kapsamda kırmızı çamur, uçucu kül, kireç ve suyu 2:1:0.5:2,43 oranında karıştırıp madene pompalamışlardır. Zemin çökmesini önlemek amaçlı yapılan bu işlemi takip eden 28. günde dayanım 3,24 MPa' a ulaşmıştır. Bu sonuçla madencilikte çimentolu dolgu işleminde dolgu maliyetlerinin azaltılıp güvenlik faktörünün artırılabilceğini kanıtlamışlardır (Wang vd., 2011).

Kırmızı çamurdan demirin geri kazanımı konusunda dünyada kapsamlı araştırmalar vardır. Rusya, Macaristan, Amerika, Japonya gibi ülkelerde kırmızı çamurdan demir üretimi deneyleri yapılmıştır. Hatta kırmızı çamurdan manyetik ayırma yöntemleri kullanılarak demir kazanımıyla doğrudan çelik ve sünger demir yapım çalışmaları mevcuttur. Ayrıca demirin manyetik olarak ayrıştırılması konusunda manyetik yakma-manyetik seçme yöntemleri geliştirilmiştir (Li, 2006; Sun vd., 2009).

#### 2.2.4. Kırmızı çamur ile ilgili yapılmış çalışmalar

Arslan (2016), Eti Alüminyum A.Ş. tesisindeki kırmızı çamurun susuzlandırma performansını artıracak alternatif teknikler incelemiştir. Derin tikiner, vakumlu tambur filtre, dekantör santrifüj ve yatay pres filtre tekniklerini ele almış ve bu tekniklerin kırmızı

çamuru susuzlandırması üzerine etkilerini araştırmıştır. Tekniklerden elde edilen veriler sonucunda optimum bir seçenek belirlemeye çalışmıştır. Mevcut durumda kırmızı çamur barajına gönderilen atığın katı miktarı %25-30 iken derin tikinerde %38, vakumlu tambur filtrede %45, dekantör santrifüjde %52 ve pres filtre yönteminde %70 olarak elde etmiştir.

Dereli (2019), kırmızı çamura mikronize edilmiş pirolastik kayaç ilavesinin etkilerini araştırmıştır. Önce kırmızı çamura %10-%20-%30-%40-%50 oranında mikronize edilmiş pirolastik kayaç ilavesi yapmıştır. Karışım oranlarına göre numuneleri 930, 1000 ve 1050 °C sıcaklıkta pişirmiştir. Hacim küçülme oranları ve basınç dayanım değerlerini belirlemiştir. Bunların sonucunda optimum karışım oranı ve pişirme sıcaklığını tespit etmiştir. Optimum değerlere sahip numunelerin mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla fiziksel, mekanik ve kimyasal deneyler yapmıştır. Sonuç olarak kırmızı çamura mikronize edilmiş pirolastik kayaç ilavesi ile sürdürülebilir çağdaş bir yapı malzemesi üretilebileceğini tespit etmiştir.

Günaydın (2024), Seydişehir Eti Alüminyum üretim tesislerinden çıkan kırmızı çamur atığının fiziksel, kimyasal, mineralojik ve mekanik özelliklerini deneylerle araştırmış, sonuçları farklı ülkelerdeki kırmızı çamurların özellikleri ile karşılaştırmış ve atığın dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğini incelemiştir. Ayrıca kırmızı çamuru damıtılmış su ile süzerek pH değerini düşürmeye çalışmıştır. İlk başta yapılan deneyleri pH değeri düşürülmüş kırmızı çamur ile tekrar yaparak elde edilen sonuçları tartışmıştır. Sonraki bölümde taşıyıcı matris polimeri olarak polisülfon (PSF) ve katkı malzemeleri olarak kırmızı çamur, bentonit, eşen kili ve pomza kullanarak geosentetik bariyer amaçlı çeşitli kompozitler hazırlamıştır. Faz inversiyon yöntemini kullanarak hazırladığı bu kompozitlerin mekanik, yapısal ve su geçirgenliği özelliklerini araştırmış; baraj, göl, katı atık depolama alanlarında kullanılabilirliğini değerlendirmiştir.

Li vd. (2018), kentsel katı atık yakma uçucu külü (MSWIFA) ve kırmızı çamur ile kırmızı çamur bazlı jeopolimer malzemeler (RGM) hazırladılar. RGM' nin hidrasyon özelliklerini; X ışın kırınımı, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi yöntemleriyle incelediler. RGM' nin donma-çözülme döngüsüyle uzun dönem stabilitesi ve fiziksel özellikleri, Avrupa Topluluğu Referans Bürosu (BCR) ve serbest basınç dayanım deneyleriyle (UCS) belirlemeye çalışmışlardır. Mekanik aktivasyon kırmızı çamuru etkili bir şekilde aktive etmiştir ve MSWIFA ile kırmızı çamurun reaksiyonunu etkili bir şekilde iyileştirmiştir. Bağlayıcıya %14 sodyum

silikat eklendiğinde UCS değeri 28. günde 12,75 MPa' a ulaşmıştır. Donma-çözülme döngüleri ve BCR test sonuçları ayrıca RGM' nin uzun dönem stabiliteye sahip olduğunu ve özelliklerinin MU10 uçucu kül tuğlalarının gereksinimlerini karşıladığını göstermiştir. Bu çalışmayla RGM' nin çimento bileşenlerinde kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Tang vd. (2018), kendiliğinden yerleşen betonda (SCC) uçucu külün yerine ağırlıkça %12,5 - %25 - %50 oranlarında kırmızı çamur ilave ederek kırmızı çamurun SCC' nin taze ve sertleşmiş durumunda mikro yapısal davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Taze SCC karışımlarında çökme-yayıma, T500 ve J-halka deneylerini uygulamışlardır. Basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü de dahil olmak üzere SCC' nin sertleşmiş özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca X ışın kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spektroskopisi (EDS) yöntemleriyle kırmızı çamurlu beton numunelerinin kimyasal birleşimi ve mikro yapısal özelliklerini analiz etmişlerdir. Sonuçta; betonda kırmızı çamur içeriğinin artmasıyla mekanik dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. %50 kırmızı çamur oranındaki SCC numunelerinin basınç dayanımı ve elastisite modülü açısından en iyi performansı gösterdiğini görmüşlerdir. Mikroskobik çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre kırmızı çamur betonunda agrega ile çimento hamuru arasındaki arayüz geçiş bölgesinde normal betona göre bir miktar iyileşme olduğunu tespit etmişlerdir.

Satayanarayana vd. (2012), yol inşaatında kırmızı çamurun kullanılabilirliğini anlamak için çalışma yapmıştır. Bu çalışmada kırmızı çamur, kireç ile %2-%4-%6-%8-%10-%12 oranlarında karıştırarak serbest basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı, Kaliforniya taşıma oranı testleri sırasıyla 1-3-7-28 günlük kürlenme sürelerinde gerçekleştirmişlerdir. Sonuçta; %10 kireç oranı diğerlerine göre daha yüksek değerleri göstermiştir. Tüm kireç yüzdelerinde 28 günlük kür süresi diğer kür sürelerine göre en yüksek değerleri göstermiştir. 28 günde %10 kireç için CBR değerini %25 bularak yol inşaatında alt temel malzemesi olarak kullanılabilirliğini tespit etmişlerdir.

Özdemir vd. (2024), kırmızı çamur atığının yol dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Kırmızı çamur ile uçucu külü karıştırarak Atterberg limit deneyleri, kompaksiyon deneyleri, serbest basınç deneyleri, CBR testleri ve SEM analizleri yapmışlardır. Uçucu kül oranı arttıkça Atterberg limitleri ve optimum su içeriği artmakta ve yoğunluk azalmaktadır. Kırmızı çamurun mekanik özelliklerinde uçucu kül içeriği ve kür süresi arttıkça serbest basınç dayanımı, başlangıç ve sekant elastisite

modülü ve Kaliforniya taşıma oranı artmakta; maximum pik gerilme azalmaktadır. SEM görüntüleri, karışımın mikro yapısında oluşan CSH ve CAH jelleri nedeniyle mekanik özelliklerde artış olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlarla uçucu kül ile karıştırılmış kırmızı çamur atığının yol alt yapı malzemesi olarak kullanılabilceğini tespit etmişlerdir.

Sabat ve Mohanta (2015), dolime tanelerinin; kompaksiyon özellikleri, serbest basınç dayanımı (UCS), yaş Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve optimum uçucu kül oranıyla karıştırılmış kırmızı çamurun dayanıklılığı üzerindeki etkilerini tartışmışlardır. Modifiye edilmiş Proctor sıkıştırma ve UCS testleri sonucunda optimum uçucu kül oranını %15 olarak belirlemişlerdir. Dolime taneleri, optimum uçucu kül yüzdesiyle karıştırılmış toprağa %0 ile %12 arasına %2' lik artışlarla eklemişlerdir. Bu oranlar üzerinden oluşturulan numunelere Proctor sıkıştırma, UCS ve yaş CBR deneyleri yapmışlardır. Deneyler sonucunda optimum dolime tane oranını %8 olarak bulmuşlardır. Optimum kırmızı çamur, uçucu kül ve dolime tane oranına sahip numune üzerinde dayanım testleri yapmışlardır. Sonuç olarak; kırmızı çamur-uçucu kül karışımına dolime taneleri ilave edilmesiyle düşük CBR değerine sahip bir zemin yerine alttemel olarak kullanılmasının inşaat maliyetlerinde önemli tasarruflar sağlayacağını bulmuşlardır.

Levent (2012), tuğla içerisine kırmızı çamur ilave ederek tuğla üzerinde meydana getirdiği değişimleri incelemiştir. Afyonkarahisar bölgesi tuğla kiline ağırlıkça %0-5-10 kırmızı çamur ilave ederek presleme yöntemiyle tuğla numuneleri üretmiştir. Tuğla numuneleri laboratuvar tipi elektrikli ark fırında 100°C' lik artışlarla 800-900 ve 1000 °C' de üç farklı sıcaklıkta pişirmiştir. Pişirilmiş numuneler üzerinde fiziksel ve mekanik testler uygulamıştır. Sonuç olarak %10 kırmızı çamur katkısının 1000 °C' de, %0 ve %5 kırmızı çamur örneklerine göre basınç dayanımını arttırdığını tespit etmiştir. Ayrıca kırmızı çamur katkılı örneklerin renkleri, katkisiz olanlara göre daha kırmızı olduğunu tespit etmiştir.

Rao vd. (2012), çelik üretim tesislerinden atık malzeme olarak çıkan öğütülmüş granüler yüksek fırın cürufu katkısı yapılan kırmızı çamurun davranışlarını incelemek için deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Kırmızı çamura %5-10-15-20-25 ve 30 oranında öğütülmüş granüler yüksek fırın cürufu katkılı ve 1-3-7 ve 28 günlük kürlere bırakacak şekilde numuneler hazırlamışlardır. Bu numuneler üzerinde serbest basınç dayanım, yarmada çekme dayanım, Kaliforniya taşıma oranı testleri uygulamışlardır. Sonuç olarak %25 oranında öğütülmüş granüler yüksek fırın cürufuna sahip numunelerin en yüksek

değerleri gösterdiğini tespit etmişlerdir. 28 günlük numuneler diğer kür sürelerine göre daha yüksek değerler göstermiştir. Öğütülmüş granüler yüksek fırın cürufu katkılı kırmızı çamurun yol alt temel malzemesi olarak kullanılabilceğini saptamışlardır.

Alameri (2017), yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun mekanik özellikleri üzerinde kırmızı çamur ve nano toz katkısının etkisini inceleyerek daha yüksek performanslı bir beton üretmeye çalışmıştır. %10-15-20 oranında kırmızı çamur katkılı beton numuneleri üretilip 200-300-400-600 ve 800 °C sıcaklıklarındaki performanslarını incelemiştir. Optimum kırmızı çamur içeriğini %10 olarak tespit etmiştir. Optimum kırmızı çamur katkılı beton numunelere çimentonun %0,5-1-1,25 oranlarında Nano- $Al_2O_3$  tozu ilave ederek 200-400 ve 600 °C sıcaklıklar altında dayanımlarını incelemiştir. %10 oranında kırmızı çamur ve %0,5 oranında Nano- $Al_2O_3$  katkısının optimum oranlar olarak en olumlu sonuçlar olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca sıcaklık artışıyla mekanik özelliklerde belirgin azalmalar oluştuğu ve kırmızı çamur ile Nano- $Al_2O_3$  tozu katkılı yüksek sıcaklık altında performansı daha iyi olan betonlar üretilebileceği sonucuna varmıştır.

Chandra ve Krishnaiah (2022), saf kırmızı çamurun geoteknik özelliklerini bulup kırmızı çamurun kuru ağırlığının %10-20-30' unu uçucu kül ile değiştirmiş ve bu kombinasyonlara %0,5-1 oranında alçıtaşı eklemiştir. Hazırladıkları numuneleri serbest basınç dayanımı, Kaliforniya taşıma oranı deneylerine tabi tutmuşlar, Toksikite Karakteristikleri Sızdırma Prosedürü Yöntemi' yle sızdırmazlık özelliklerini incelemiştir. Uçucu kül ve alçıtaşı ilavesinin katkısız kırmızı çamura kıyasla dayanım özelliklerini arttırdığını tespit etmişlerdir. Oluşturulan karışımların kırmızı çamurun alt yapı malzemesi olarak kullanılabilceğini saptamışlar, sızıntı incelemeleri sonucunda ise sızıntı yapan ağır metallerin çoğunluğunun Dünya Sağlık Örgütü tarafından izin verilen toksisite eşliğinde olduğunu ortaya koymuşlardır.

### 2.3. Uçucu Kül

Termik santrallerde genellikle linyit veya taş kömürü gibi fosil yakıtlar kullanılır. Kömür kurutulur, öğütülür sonra yakma kazanına hava ile püskürtülür. Yakma kazanında toz kömür yaklaşık 1200-1600 °C sıcaklıkta yanar. Kömürün yanmasıyla oluşan yüksek ısı, kazan borularındaki suyu buhara dönüştürür. Kömürün içerisinde bulunan inorganik maddelerin bir kısmı yanma sonucu kaybolur, bir kısmı ise ince parçacıklar halinde dumanla birlikte taşınır. Gaz akımıyla birlikte taşınan bu parçacıklar, soğudukça yoğunlaşarak mikroskobik cam kürecikler oluşturur. Bu parçacıklar baca gazı akımı içinde askıda kalır ve kazan çıkışına kadar taşınır. Baca gazından ayrılıp filtreler yardımıyla silolara taşınan ve boyutları 0,1-100 mikrometre arasında değişen bu atık malzeme “Uçucu Kül” olarak tanımlanır (Erol, 1999). Bu işlemlerden geçmeyip yanma esnasında kazanın dibinde kalan daha iri taneciklerden oluşan atık malzemeye ise “Taban Külü” veya “Yatay Kül” denir.

Yapılan literatür araştırmasında uçucu kül ile ilgili yapılan çalışmalar hem ülke içinde hem ülke dışında oldukça fazladır. Ülkemizde uçucu kül kavramı “kömür uçucu külü, termik santral külü, kül tozu, puzolanik kül yanma artığı külü” olarak da adlandırılmıştır. Ülke dışındaki kaynaklarda ise “coal fly ash, pulverized fly ash, coal combustion fly ash, coal combustion residue, coal combustion products, ash particule emissions, pozzolanic fly ash, fine particulate ash” gibi kavramlar kullanılmıştır.

#### 2.3.1. Termik santrallerde uçucu külün oluşum aşamaları

Uçucu kül; katı, sıvı ve gaz halindeki yakıtlarda bulunan kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren termik santrallerde ortaya çıkar. Termik santrallerde kullanılabilen yakıtlar ise taş kömürü, linyit kömürü, petrol ürünleri, doğalgaz, türetilmiş gazlar ve turba yakıtlardır. Termik santrallerinde “Konvansiyonel Buhar Türbinli” ve “Gaz ve Buhar Türbinli” olmak üzere iki yöntemle enerji üretilebilir. Uçucu kül, konvansiyonel buhar türbinli santrallerde enerji üretimi sırasında açığa çıkar (ÇŞİB, 2016).

Kömür, ilgili santrale ulaştırıldıktan sonra yakma işlemini kolaylaştırmak için yakma öncesinde bilyalı, dövmeli veya silindir değirmenlerde pulvarize edilir. Bu işlemde sonra sabit yakıt kalitesi elde edebilmek ve çevresel etkileri en aza düşürebilmek için harmanlama ya da karıştırma işlemleri yapılır. Yakıt turba ise turba içerisindeki suyu azaltmak için ekstra kurutma işlemi gerçekleştirilir. Pulvarize kömür yakılmak için

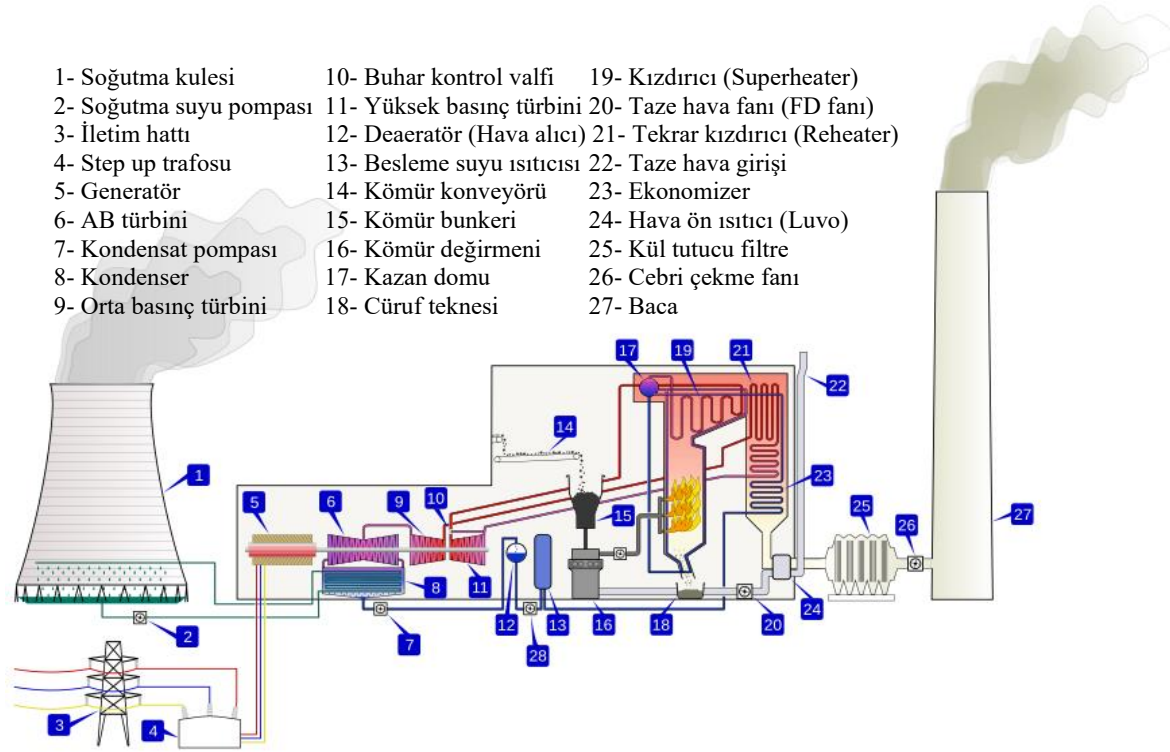
kazana taşınır. Yakma işlemi öncesinde fuel oil, mazot gibi yakıtlarla kazanın ateşlemesi sağlanır (ÇŞİB, 2016).

Katı yakıtların yakma işlemi, pulvarize katı yakıt yakma fırınlarında veya akışkan yatak yakma fırınlarında gerçekleştirilebilir. Pulvarize katı yakıt yakma şeklinde iki tür yöntem vardır. Bunlardan birincisi kuru kazanaltı külü fırınında, külün erime noktasının çok altındaki sıcaklıklarda çalıştırarak külün fırına yapışmasını ve cüruf oluşumunu önlemek amacı bulunan yöntemdir. Diğeri ise cüruf musluğu fırınında külün erime noktasının çok üstünde sıcaklıklarda çalıştırarak külün sıvılaşıp uzaklaşmasını ve uçucu külün tutulmasını amaçlayan yöntemdir (ÇŞİB, 2016). Akışkan yatak yakma fırınları günümüzde daha çok tercih edilmeye başlamıştır. Bu yöntemde yakıt; sıcak akışkanlaştırılmış kum, kül veya tutucu yatağında ısıtılmış havanın kademeli olarak verilmesiyle yakılır. Yanma sıcaklığı 750 – 950 °C arasında meydana gelir. Bu yakma işleminde azot oksitlerin ( $\text{NO}_x$ ) emisyonları azdır, Kükürt dioksitin ( $\text{SO}_2$ ) emisyonu ile kireçtaşı ile kontrol edilmektedir. Ayrıca bu yöntemde düşük kalite kömürler daha az çevresel etkiyle yakılabilmektedir (Volkan, 2006).

Yanma olayı sonrasında oluşan uçucu kül partikülleri baca gazlarından yakalamak için baca gazı arıtma sistemleri kullanılır. Bu sistemler uçucu partikülleri ve diğer zararlı bileşenlerin atmosfere salınımını engelleyerek çevreye oluşturdukları zararı en aza indirir. Baca gazı  $\text{NO}_x$  arıtımında selektif katalitik (SCR) veya selektif katalitik olmayan (SNCR) yöntemlerinden biri kullanılabilir. Bu yöntemlerdeki amaç sıvı amonyak ile  $\text{NO}_x$  gazı tepkimesi ile nitrojen elde etmektir (Avrupa Komisyonu, 2006). Tepkime sonrasında geriye kalan uçucu küller elektrostatik veya kumaş filtreler yardımıyla tutulur. Elektrostatik filtrelerde baca gazı içerisindeki uçucu kül partikülleri dikey paralel plakalar arasından geçer. Elektrotların partiküllere negatif yük vermesiyle pozitif yüklü plakalar, zıt yüklü bu partikülleri çekerek tutar. Toplayıcılarda biriken partiküller sistemden çekilir. Kumaş filtrelerde ise baca gazı içerisindeki uçucu kül partikülleri, kumaş torbalardan geçerken takılır ve torba yüzeyinde birikir. Filtreden geçen gazlar ise havaya salınır. Partiküller torbalarda birikince çalkama veya ters hava akış yöntemiyle torbalardan uzaklaştırılır. Elektrostatik veya kumaş filtrelerden uzaklaştırılan uçucu kül partikülleri depolama alanlarına transfer edilir (Çinçin, 2024). Havaya salınan gaz ise  $\text{SO}_2$  arıtımı için desülfürizasyon ünitesine gelir. Burada ıslak, kuru, yarı kuru yöntemler uygulanabilir. En yaygın kullanılan yöntemde, toz haline getirilmiş kireçtaşının sulu süspansiyonuyla baca

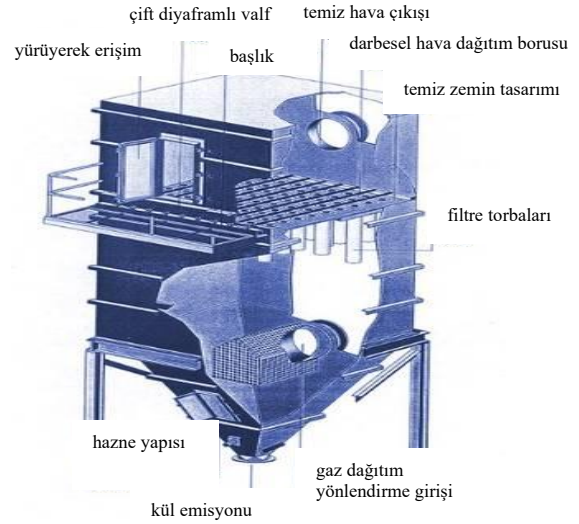
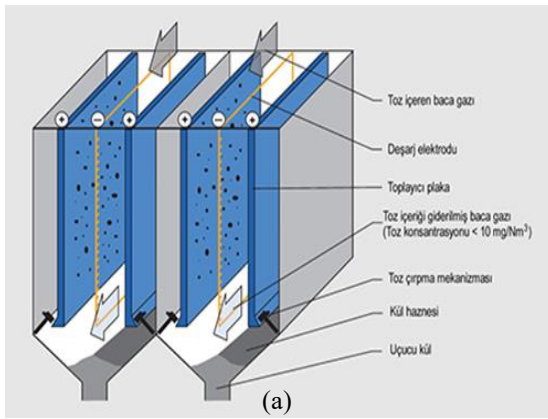
gazının tepkimesi sonucu  $\text{SO}_2$  arıtılır. Temizlenen baca gazı ise atmosfere salınır. Akışkan yatak yakma fırınında  $\text{SO}_2$  arıtımı için desülfürizasyon ünitesine gerek yoktur.  $\text{SO}_2$  arıtımı, kazanda yakma sırasında kireçtaşı kullanılarak yapılabilir (Avrupa Komisyonu, 2006).

Kömürle çalışan konveksiyonel buhar türbinli termik santral diyagramı Şekil 2.7’ de verilmiştir.



Şekil 2.7. Kömürle çalışan konveksiyonel buhar türbinli termik santral diyagramı (URL-6, 2025)

Sıvı amonyak ile  $\text{NO}_x$  gazı tepkimesi nitrojen elde edilemesi sonrasında ortaya çıkan uçucu külleri havada tutan elektrostatik veya kumaş filtrelerin şeması Şekil 2.8’ de verilmiştir.



Şekil 2.8. (a) Elektrostatik filtre (URL-7, 2025)

(b) Kumaş (torbalı) filtre (URL-8, 2025)

Çalışmada kullanılan uçucu kül, Eti Alüminyum A.Ş. Bayavşar Kömür Ocağı'ndan elde edilen linyit türü kömür olan Bayavşar kömüründen elde edilen uçucu küldür. Seydişehir Eti Alüminyum Tesisleri'nde buhar kazanında; otoklavlar ve kırmızı çamur bölümlerinde, buharlaştırma bölümünde, ortam ısıtmada ve kazanın kendi iç tüketimini karşılamak amacıyla üretim aşamasında 46 bar basınçta, 440 °C sıcaklıkta 120 ton/h buhar üretebilen buhar santrali bulunmaktadır. Bu santralde yakıt olarak yaklaşık 1279 kcal/kg enerjiye sahip Bayavşar kömürü kullanılır. Buhar kazanının termal verimi %89 civarında olup 1 ton buhar üretmek için yaklaşık 0,61 ton kömür kullanılması gerekir. Ayrıca termik santralde katı yakıt yakma işlemlerinden olan akışkan yataklı fırın yöntemi, Seydişehir Eti Alüminyum Tesisleri'nde de kalsinasyon aşamasında kullanılmaktadır. Bu yöntemle yakıt tüketimini azaltmayı ve daha kaliteli alüminayı üretmek amaçlanmıştır (Avcu, 2019). Bayavşar kömürü, Seydişehir Eti Alüminyum Tesisleri'ne yaklaşık 20 km mesafede bulunan Bayavşar mahallesi yakınlarındaki Eti Alüminyum A.Ş. Bayavşar Kömür Ocağı'ndan çıkarılmaktadır. Bayavşar kömürün üzerinde yapılan çalışmada saf halde yakıldığında uçucu kül oranı kütlece %36,40 olarak belirlenmiştir (Agacayak ve Ağca, 2021). Bu da buhar kazanında 1 ton buhar üretimi sırasında yaklaşık 0,22 ton uçucu kül oluştuğu anlamına gelir.

### 2.3.2. Uçucu külün özellikleri

Uçucu külün özellikleri; santral tipi, işletim biçimi, yakılma özellikleri, yakılan kömürün cinsi ve kömür kompozisyonlarına göre farklılık gösterir. Aynı santralde aynı günde yapılan yükleme biçiminin değişmesi dahi uçucu külün özelliklerini değiştirebilmektedir. Kömürün yakılmasından elde edilen uçucu kül, kömürdeki organik ve inorganik bileşenlerden kaynaklanır. Uçucu külün homojen özelliklere sahip olmayıp karmaşık yapısı, farklı tanecik boyutları ve şekilleri, ince taneli yapısı ve kendine özgü özellikleri sebebiyle ciddi dezavantajlara sahiptir. Bu sebeple uçucu külün geniş çaplı üretimlerde katkı olarak büyük oranlarda verimli bir şekilde yönetilmesi zordur. Uçucu külün uygun oranlarda ve doğru kullanımı halinde katkı sunduğu malzemenin birçok özelliğini olumlu yönde etkilediği ve özellikle kimyasal etkilere dayanımını artırdığı araştırmalarda görülmektedir (Görhan vd., 2009; Yosef, 2024).

#### 2.3.2.1. Uçucu külün sınıflandırılması

Uçucu küller, kimyasal bileşen yüzdeleri baz alınarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartlarına göre sınıflandırılır.

ASTM C 618 standardı, dünyada uçucu külü iki ana kimyasal kategoriye ayırır. Birincisi genelde %10' dan az kireç (CaO) içerdiği için düşük kalsiyumlu uçucu kül olarak bilinen "F sınıfı" uçucu küldür. F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürden üretilirler ve toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %70' ten fazladır. F sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğe sahip olup su ve kalsiyum hidroksit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ile reaksiyona girdiğinde sertleşirler. Ancak tek başına çimento benzeri özelliklere sahip olamazlar. Çimentolu bileşikler oluşturabilmeleri için su ve Portland çimentosu, kireç veya hidratlı kireç gibi bağlayıcı malzemelerle birleştirilmesi gerekmektedir. ASTM C 618 standardına göre ikinci kategori ise linyit ve düşük bitümlü kömür gibi düşük kaliteli kömürlerden elde edilen "C sınıfı" uçucu küldür. C sınıfı uçucu kül yüksek kalsiyum değerlerine sahiptir ve F sınıfı uçucu külün aksine suya maruz kaldığında kendi kendine sertleşebilme özelliğine sahiptir. CaO oranı %10' dan fazla olan C sınıfı uçucu küllerin toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %50' ten fazladır. CaO oranı F sınıfı uçucu küle göre daha fazla olduğu için C sınıfı uçucu kül daha yüksek basınç dayanımına sahiptir. C sınıfı uçucu külün F sınıfı uçucu küle göre karbon miktarı ve yanmada kayıp oranı (LOI) daha az, demir miktarı ve yoğunluğu ve daha fazladır (Görhan vd., 2009; Yosef, 2024).

TS EN 197-1 standardı, uçucu külleri silissi (V) ve kalkersi (W) olarak ikiye ayırmaktadır. V sınıfı uçucu küller; puzolanik özelliklere sahiptir, esas olarak reaktif silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ), alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), kalanı ise demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve diğer bileşenlerden oluşur, kireç ( $\text{CaO}$ ) oranı %10' dan az, reaktif silis oranı ise %25' ten fazladır. W sınıfı uçucu küller; hidrolik ve/veya puzolanik özelliklere sahiptir, esas olarak  $\text{CaO}$ , reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , kalanı ise  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve diğer bileşenlerden oluşur,  $\text{CaO}$  oranı %10' dan fazla, reaktif silis oranı ise %25' ten fazladır (Görhan vd., 2009).

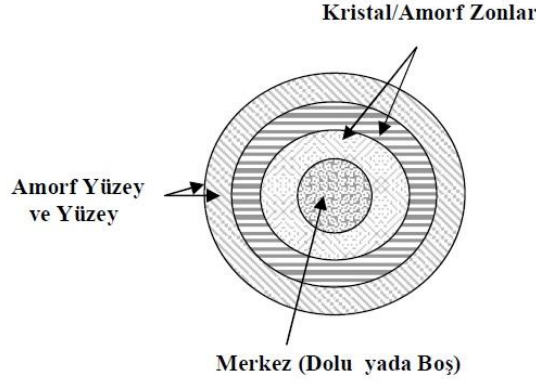
Uçucu küller, kireç ( $\text{CaO}$ ) ve sülfat ( $\text{SO}_3$ ) miktarına göre de sınıflandırılabilir. Genelde taş kömüründen elde edilip esas yapısı siliko alüminatlardan oluşan uçucu küllere “siliko alüminöz uçucu kül” denir. Genellikle linyit kömüründen elde edilip diğerlerine göre daha yüksek oranda  $\text{SO}_3$  ve  $\text{CaO}$  içeren uçucu küllere “sülfokalsik uçucu küller” denir. Linyit kömüründen elde edilip kireç ve silika oranı daha yüksek uçucu küllere “silikokalsik uçucu küller” denir (Tosun, 2024).

Uçucu küller içerisindeki  $\text{CaO}$  miktarına göre de sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmada aktiviteler kullanılmakta ve aktiviteler  $\text{CaO}$  miktarına göre belirlenmektedir. Bu sınıflandırmada  $\text{CaO}$  oranı; %3,5' ten az ise çok düşük aktiviteli kül, %3,5 - %7 arasında ise düşük aktiviteli kül, %7 - %14 arasında ise aktif kül, %14 üzerinde ise çok aktif kül olarak sınıflandırılmıştır (Görhan vd., 2009).

Uçucu küller pH değerine göre de sınıflandırılabilir. pH değeri; 1,2-7 arasında ise asidik kül, 8-9 arasında ise hafif alkali kül, 11-13 arasında ise güçlü alkali kül olarak sınıflandırılmıştır (Yosef, 2024).

### 2.3.2.2. Uçucu külün fiziksel özellikleri

Uçucu kül, çoğunlukla küresel yapıda küçük, toz halindeki parçacıklardan oluşur ve için katı veya boş olabilir. Parçacıklar berrak kristal bir yapıya sahip olmayıp amorf haldedirler. Uçucu külün tanecik kesiti Şekil 2.9' da verilmiştir. Uçucu küllerin özgül ağırlıkları parçacık şekli, boyut dağılımı, kimyasal bileşen gibi faktörlere değişiklik göstermekle birlikte 1,6-3,1 arasında değişir. Uçucu küller kumlu siltten siltli kuma kadar değişen tane boyutlarıyla sınıflandırılabilirler. Ayrıca yüksek özgül yüzey alanı ve düşük birim hacim ağırlığa sahiptirler. Uçucu küllerin rengi içeriğindeki karbon ve demir miktarına göre değişmekte olup turuncu, koyu kırmızı, kahverengi, beyaz, sarı renklerde uçucu küller mevcuttur (Yosef, 2024).



Şekil 2.9. Uçucu kül tanecik kesiti

Uçucu kül küresel taneciklere sahip olduğunda kayganlaştırıcı nitelik taşır ve dolgu malzemesi özelliğine sahip olur. Taneciklerin şekilsiz ve pürüzlü yüzeye sahip olma durumunda ise su ihtiyacı artar. Tane dağılımının düzensiz olması durumunda da su ihtiyacı artar. Tanecik boyutlarının çoğunu 40  $\mu\text{m}$  altında olması ve şeklinin genelde küresel olması puzolanik reaksiyonu artıran faktörlerdir. Yüzeyi pürüzsüz ince küresel taneciklerin yüzey alanları fazla olduğu için kireç silikat reaksiyonlarına daha hızlı girerler (Anuk, 2004).

Uçucu külün ASTM C 618 standardına göre fiziksel özellikleri Çizelge 2.4' te ve Türkiye' de oluşan bazı uçucu küllerin fiziksel özellikleri Çizelge 2.5' te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Uçucu külün ASTM C 618 standardına göre fiziksel özellikleri (ASTM C 618, 2019)

Özellik	Değer aralığı
Tanecik boyutu ( $\mu\text{m}$ )	1 - 100
Birim hacim ağırlığı ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	540 – 860 (sıkıştırılmamış) 1120 – 1500 (sıkıştırılmış)
Özgül ağırlık	2,2 – 2,8
Maksimum su muhtevası (%)	< 3
LOI (Yanmada kayıp) (%)	< 6
Yüzey alanı ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	300 - 400

Çizelge 2.5. Türkiye' de oluşan bazı uçucu küllerin fiziksel özellikleri (Alkaya, 2009)

Özellik	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma-B	Tunçbilek	Yatağan
İncelik 200 $\mu\text{m}$ elek	3,0	2,7	1,0	3,0	4,5	1,9
% Kalan 200 $\mu\text{m}$ elek	14,9	11,5	3,0	19,0	13,5	12,8
Özgül ağırlık	26,3	19,7	24,6	24,2	19,9	-
PAI Kireçle ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )	49,7	45,1	43,8	52,5	34,0	36,0
P.C. ile (% kontrol)	86,4	77,2	79,8	94,5	72,5	67,3
Su ihtiyacı (% kontrol)	111,8	102,7	112,4	110,0	104,2	106,5

### 2.3.2.3. Uçucu külün kimyasal ve mineralojik özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal birleşimi; yakılan kömürün yapısı, jeolojik orjini ve proses koşullarına göre farklılık göstermektedir. Uçucu külde 316 'sı benzersiz olmak üzere 504 mineral bulunur, bu sebeple uçucu küller oldukça karışık maddelerdir. Bu karmaşıklık içerisinde tüm uçucu küller içerisinde silika ( $\text{SiO}_2$ ), alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve CaO başlıca ve büyük oranlarda amorf ve kristal formlarda bulunmakta olup bu oranlar uçucu külün tipine göre değişir. Oranların farklı olması uçucu külün karakteristiklerini belirler uçucu külün farklı yerlerden elde edilmiş olmasını kanıtlar. Uçucu külün bir kısmını da alkali elementlerin özellikle  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ile yaptıkları camsı bileşiklerden oluşur. MgO,  $\text{SO}_3$  gibi alkali oksitler de uçucu küllerde minör bileşen olarak bulunmaktadır (Anuk, 2004 ; Yosef, 2024, Görhan vd., 2009).

Uçucu küllerde reaktif silis ve reaktif kireç, çimentonun hidrasyonunda oluşan ve dayanım kazanmada payı olan silikat hidrat jeli oluşturan silisyum ve kalsiyum oksit kaynağıdır. Reaktif silis oranı, %25' ten az olmaması gerekir. Reaktif kireç oranı ise düşük kireçli küllerde %10' un altında, yüksek kireçli küllerde %10-15 arası olabilir (Anuk, 2004).

Yanmada kayıp (LOI), uçucu küldeki yanmamış karbon ve metal oksitlerin seviyesini belirlemek için önemlidir. Yüksek bir LOI değeri, uçucu kül kalitesini düşürebilecek yüksek karbon içeriği anlamına gelir. Bu değer yüksek olması beton, dolgu vb. çalışmalarda katkı olarak tercih edilmemesine sebep olur. Bu yüzden TS EN 450 standartı yanmada kayıp oranını %5 olarak sınırlamıştır (Anuk, 2004 ; Yosef, 2024).

Uçucu küllerin mineralojik yapıları, kömürdeki minerallere ve proses koşullarına göre değişiklik gösterir. Uçucu küllerde temel olarak Si, Al, Ca ve S elementleri bulunur. Uçucu küllerin matrisi genelde alümina silikatlar, Fe, Mg, Na, K, Ca, T, ve nadir toprak elementlerinden oluşur. As, Cd, Ga, Mo, Pb, Se ve Zn gibi elementler ise matrise girme eğiliminde olmayıp bu elementler uçucu küllerin yüzeylerinde toplanırlar (Görhan vd., 2009). Yapılan mineralojik analizlerde uçucu küldeki silisyumun kuvars kristalleri halinde, alüminat ile birleşip mullit halinde ve camsı halde olduğu belirlenmiştir. Demirin ise bir kısmının manyetit ve hematit bileşiminde bir kısmının ise camsı halde olduğu görülmüştür. Uçucu küllerin %66-88' inin camsı yapıdadır ve alümina silikatlar uçucu külün genelde %70-88' ini oluşturur (Alkaya, 2009).

Türkiye’ de oluşan bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ve TS EN 450, TS 639 ile ASTM C 618 sınır değerleri Çizelge 2.6’ da, mineralojik bileşimleri ise Çizelge 2.7’ de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.6.** Türkiye’ de oluşan bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri (Anuk, 2004)

UK Üretim Yeri	Orhaneli	Seyitömer	Yatağan	Soma	TS EN 450	TS 639	ASTM C 618	
Bileşim (%)							F	C
SiO <sub>2</sub>	47,48	54,49	51,50	43,39	-	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,17	20,58	23,08	21,71	-	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,03	9,27	6,07	4,07	-	-	-	-
S+A+F	79,68	84,34	80,65	70,76	-	> 70,00	> 70,00	> 50,00
CaO	11,38	4,26	10,53	22,23	-	-	-	-
MgO	2,27	4,48	2,42	1,65	-	< 5,00	-	-
SO <sub>3</sub>	2,49	0,52	1,32	2,07	< 3,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00
K <sub>2</sub> O	2,47	2,01	2,54	1,09	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> O	0,35	0,65	0,77	0,30	-	-	-	-
LOI	1,11	3,01	1,06	2,64	< 5,00	< 10,00	< 6,00	< 6,00

**Çizelge 2.7.** Türkiye’ de oluşan bazı uçucu küllerin mineralojik bileşimleri (Anuk, 2004)

Mineral (%)	Uçucu Kül					
	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma-B	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1,0	18,1	1,2	4,3	8,8	6,0
Kuartz	4,5	10,9	5,6	5,1	13,9	22,4
Magnetit	0,8	0,2	2,5	0,6	4,1	2,9
Hematit	4,0	0,1	6,0	2,0	3,0	7,0
Serbest CaO	18,6	0,7	5,5	9,8	0,9	1,0
Anhidrit	12,2	-	9,3	7,4	-	-
Plagioclase	≈ 28	-	≈ 15	≈ 20	-	≈ 25
Camsı ve amorf faz	≈ 30	≈ 70	≈ 50	≈ 50	≈ 70	≈ 35

Uçucu külle ilgili bazı çalışmalarda belirlenmiş kimyasal birleşimlerin oranı Çizelge 2.8’ de gösterilmiştir.



#### 2.3.2.4. Uçucu külün değerlendirildiği alanlar

Dünyada termik santraller sayısının artmasından dolayı miktarı her geçen gün daha da artan uçucu küller kuru olarak atık sahalarında depolanmakta veya su ile karıştırılıp uçucu kül barajlarına pompalanıp değerlendirilmeyi beklemektedir. Uçucu küllerin her iki durumda da yarattığı çevre kirliliğini önlemek ve ekonomik bir malzeme olarak kullanmak amacıyla son yıllarda fazlaca değerlendirme çalışmaları yapılmaktadır (Bacanak, 2001).

Uçucu küller, çimento ve beton üretiminde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirler. Puzolanik malzemelerin aktivitesi esas olarak puzolandaki reaktif silis içeriğine bağlıdır. Silisli ve alüminli minerallerin türü ve miktarı puzolanik aktivite açısından büyük önem arz eder. Uçucu külün de yeterli puzolanik aktiviteyi gösterebilmesi için yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda silis, alümin ve demir oksit içermesi gerekmektedir. Yüksek kireçli uçucu kül kullanımının betonda durabilite ve stabilite özelliklerini bozabileceği için betonda genellikle düşük kireçli uçucu kül kullanılır. Uçucu külde bulunan karbon ve sülfürün betonda korozyonu hızlandırması, elektrik iletkenliğini artırması, betonun su ihtiyacını artırmasına sebep olduğu için betonda %20-30 oranında uçucu kül kullanımı, korozyon direnci ve beton dayanımı açısından olumlu sonuçlar vermektedir. Betonda ince öğütülmüş uçucu kül kullanımı betonun geçirimsizliğini artırmaktadır. Portland çimentosuna uçucu külün ilave edilmesi çimentonun hidrasyon süresini artırmaktadır. Hidrasyon süresinin artmasıyla betonda priz süresi artarak betonun erken dayanımı düşmektedir. Uçucu külün bu olumsuzluğunu ortadan kaldırmak için  $\text{NaSO}_4$  ve  $\text{CaCl}_2$  gibi kimyasal aktivatörler kullanılmaktadır (Görhan vd., 2008).

Beton içerisinde ince agrega yerine uçucu kül kullanılmasıyla daha hafif, ekonomik ve çevre dostu beton üretmek mümkündür. Betonda agrega olarak %40' a kadar farklı oranlarda uçucu kül kullanımı; betonun işlenebilirliğini, basınç dayanımını, elastisite modülü ve rötre değerlerini, aşınma direncini olumlu yönlerde geliştirmektedir (Görhan vd., 2008).

Uçucu külün tuğla üretiminde kullanılmasıyla alakalı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar sonucunda 0,1-10 mikron arasında uçucu kül kullanımının tuğlada durabiliteyi geliştirdiği ve mikro gözenekleri azalttığı görülmüştür. Birim hacim ağırlığında, kuruma,

pişme, toplam küçülmede belirgin bir değişiklik olmamış, daha düşük ısı iletkenlik değeri ve su emme miktarları çıkmıştır (Bentli vd., 2005; Cultrone ve Sebastian, 2009).

Uçucu kül gazbeton üretiminde kullanılabilir. İnce kum ikamesi olarak kullanılan uçucu külün gazbetonda kullanılmasıyla, kuvars kumu ile üretilen gazbetona göre daha iyi ısı yalıtım ve dayanım özellikleri gösterdiği görülmüştür (CEGB, 1972). Ancak çimento-kum karışimli gazbetona göre daha yüksek su emme değerleri de görülmüştür (Nambiar ve Ramamurthy, 2006).

Uçucu kül köpük beton üretiminde kullanılmasıyla ilgili çalışmalar yapılmıştır. Köpük betona ince kum yerine uçucu külün dolgu malzemesi olarak katılmasıyla daha homojen gözenek dağılımı elde edildiği görülmüştür (Nambiar ve Ramamurthy, 2007). Gözenegin tane boyutunun küçülmesiyle köpük betonun dayanımında artış gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca başka bir çalışmada köpük betonda çimento yerine %75 oranda uçucu kül kullanılmasının köpük betonun basınç dayanımında dikkate değer artışlar sergilediği tespit edilmiştir (Kearsleya ve Wainwright., 2001).

Uçucu küller problemleri iyileştirmek amaçlı kullanılabilirler. Uçucu küller özellikle hava ile temas etmeyen topraklarda bor, molibden, selenyum, alüminyum gibi elementleri çekip temizleme eğilimine sahiptir. Bu sayede toprakta bulunan zehirlerde önemli miktarda azalmalar görülür, böylece insan ve hayvan sağlığına önemli katkı yaparlar (Görhan vd., 2008). Uçucu küller yol yapımında ve geoteknik uygulamalarda dolgu malzemesi olarak veya zemin stabilitesi sağlamak amacıyla kullanılabilir. Uçucu küllerin sıkıştırıldığında düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle sıkıştırılabilir zeminler üzerinde daha uygun bir dolgu malzemesi olarak kullanılabilirler. Böylece yol, köprü, bina gibi üstyapıların yapılacağı zeminlerde oturmaların önüne geçilebilir (Bacanak, 2001). Uçucu külün şişen zemine %40 oranında eklendiğinde zeminin şişme özelliğinin %42-48 oranında azaldığı, basınçtaki dayanımının %40-48 oranında arttığı başka bir çalışma da mevcuttur (Ahmad vd., 2024).

Uçucu küllere kil ve feldispat ilavesi yapılarak tabak, fincan, vazo, küllük, süs eşyaları gibi seramikler üretmek mümkündür. Tane boyutlarının küçük olmasından dolayı öğütme masraflarının olmaması, maliyet düşüklüğü ve içerdiği karbonun pişirme işlemi sırasında sağladığı enerji sebebiyle uçucu küllerin seramik sanayisinde kullanımı avantajlıdır (Mukherji vd., 1993).

Uçucu küller ayrıca; harç yapımında, taşkın önlenmesinde, metal yüzeylerin püskürtme ile temizlenmesinde, petrol kuyu sondajlarında, tarımda sıkı toprağın gevşetilmesiyle rutubet tutma kapasitesini artırmada, sulardan ağır metal gideriminde, bataklık kurutmada, döküm kumu olarak, maden ocaklarında filtre olarak ve ısı yalıtım malzemesi olarak da kullanım alanları mevcuttur (Bacanak, 2001).

### 2.3.2.5. Uçucu kül ile ilgili yapılmış çalışmalar

Zha vd. (2008), uçucu kül ve uçucu kül-kireç karışımının şişen zeminlerin stabilitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Plastisite indisi, aktivite, serbest şişme, şişme potansiyeli, şişme basıncı ve eksenel büzülme yüzdeleri; uçucu kül veya uçucu kül-kireç karışımı olan katkı maddelerinin artmasıyla azaldığını gözlemlemişlerdir. İncelenen numunelerde kür süresinin artmasıyla şişme potansiyelinin ve şişme basıncının azaldığını tespit etmişlerdir. Uçucu kül ilave edilen numuneler, serbest basınç dayanımında önemli bir değişiklik göstermemiştir. Ancak 7 günlük kürden sonra serbest basınç dayanımı önemli ölçüde artmıştır. Ön işlem görmüş ve işlem sonrası zeminler için plastisite indisi ile şişme-büzülme özellikleri arasındaki ilişkiyi tartışmışlardır.

Karami vd. (2021), F sınıfı uçucu kül ile kireç, CSA çimentosu, enzim ve polimer karışımı yaparak bu katkı maddesinin zemin stabilitesine etkisini incelemişlerdir. Farklı katkı maddesi kombinasyonları üzerinde bir dizi mekanik ve mikroskobik deney (CBR, kompaksiyon testi, SEM, XRD, FTIR, TGA) gerçekleştirmişlerdir. Sonuçta; toprak, uçucu kül, kireç, enzim kombinasyonu taşıma kapasitesini artırmak için optimum kombinasyon olarak belirlenirken toprak, uçucu kül, kireç ve toprak, uçucu kül, enzim kombinasyonları alttemel performansında iyileştirmeler göstermiştir. Laboratuvar sonuçlarından elde edilen bulgular, zayıf zeminlere ikincil katkı maddesi olarak uçucu kül ilave edildiğinde kaplama kalınlığının azalmasının önemli faydalarını ortaya koyan kaplama performansını değerlendirmek için 3B sayısal model uygulaması yaparak doğrulamışlardır.

Kaya (2010), Seyitömer Termik Santralinden tedarik ettiği uçucu kül ve taban külünü, klinker muadili olarak ağırlıkça %10-%20-%30-%40 oranlarında kullanmıştır. Laboratuvar ortamında bir Portland çimentosu ve sekiz katkılı çimento örneği hazırlamıştır. Uçucu kül ve taban külü katkılı çimentoların 2, 7, 28, 90 günlük mukavemetlerini, normal kıvamlarını, hacim sabitliliğini, priz sürelerini belirlemiştir.

%10 ve %20 oranlarında uçucu kül ve taban külü kullanılan çimentolar, 28 günlük kür süresi sonunda kıyaslanabilir sonuçlar vermiştir. Hazırlanan bütün numunelerin Türk ve Amerikan standartları tarafından istenen özellikleri karşıladığını tespit etmiştir.

Kim vd. (2005), Indiana’ da iki elektrik santralinden tedarik ettikleri uçucu kül ve taban külü üzerinde kompaksiyon, geçirgenlik, mukavemet, rijitlik ve sıkıştırılabilirlik özelliklerini belirlemek için bir dizi test yapmışlardır. Test için ağırlıkça %50-%75-%100 uçucu kül oranına sahip uçucu kül-taban külü karışımı hazırlamışlardır. Test sonuçları, kül karışımlarının klasik granüler malzemelerle olumlu şekilde karşılaştırıldığını göstermiştir.

Kula vd. (2000), kolemanit cevheri atığı, taban külü, uçucu kül, çimento-kül karışımları, çimento-kolemanit cevheri atığının fiziksel ve kimyasal özellikleri ile betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu malzemeleri farklı oranlarda Portland çimentosu ile karıştırmışlardır. Priz süresi, hacim genişmesi ve basınç dayanımı gibi fiziksel özellikleri belirlemişler ve referans karışım ve Türk standartlarıyla karşılaştırma yapmışlardır. Sonuçlar, çimento yerine kullanılan malzemelerin mekanik özellikler üzerinde belirgin etkileri olduğunu göstermiştir. Uçucu kül ve taban külünün %25 konsantrasyonda bile kullanılması, referans karışımla kıyaslandığında karşılaştırılabilir veya daha iyi sonuçlar vermiştir. Portland çimentosunun ağırlıkça %9 oranında kolemanit cevheri atığı ile karıştırılması basınç dayanımında azalmaya neden olmuştur ancak elde edilen değerler yine Türk standartları sınırları içerisinde kalmıştır.

Topal vd. (2011), termik santral cürufu ve uçucu külünden ve atıksu arıtma çamurundan bazı ağır metallerin liçlenebilmelerini Toksikite Özelliklerini Sızdırma Prosedürü (TCLP) ve Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu (ASTM) metotları ile tespit etmeyi amaçlamışlardır. TLCP ve ASTM analiz sonuçlarına göre, atıkların liçlemesi sonrasında çözeltilere geçen ağır metal konsantrasyonlarının yönetmelikte belirtilen sınır değerlerin üzerinde olduğunu tespit etmişlerdir. Bu atıkların liçlemesi sonucu önemli bir kirlilik oluşturabileceklerini belirlemişlerdir.

Büyükoflaz (2023), kireç ve uçucu kül ile stabilize edilen yüksek plastisiteli kil zemine atık lastik ilavesinin etkilerini araştırmıştır. %3-6-9-12-15-18 oranlarında uçucu kül, %0,5-1-1,5 oranlarında atık lastik parçaları ve optimum sabit oranda kireç karışımları

hazırlamıştır. Karışımlar üzerinde kıvam limit, kompaksiyon, şişme potansiyeli, serbest basınç deneyleri ve XRF, XRD, SEM analizleri gerçekleştirmiştir. Optimum su muhtevasında hazırladığı karışımları 2, 7, 28 ve 56 günlük kürde bekleterek serbest basınç deneyine tabi tutmuştur. Zemine kireç, uçucu kül ve atık lastik eklenmesiyle şişme potansiyelinin düştüğünü tespit etmiştir. Atık lastik parçalarının karışımların dayanımlarını artırdığını ve sünek kompozitler elde edilebildiği belirlemiştir. Bu kompozitlerin sıkıştırılmış toprak üretiminde, ulaşım yapılarında temel ve alt temel olarak, dayanma duvarlarında ise dolgu olarak kullanılabilceği sonucuna varmıştır.

Tosun (2024), uçucu kül ve mermer tozu atığı %3-6-9-12 oranlarında kaolin kili zemine katılarak yalnız zemin, zemin-uçucu kül, zemin-uçucu kül-mermer tozu karışımları oluşturmuştur. Hazırlanan karışımlar üzerinde kıvam limit, serbest şişme, lineer büzülme, kompaksiyon, serbest basınç, kesme kutusu, düşen koni ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) gibi testler gerçekleştirmiştir. Belirli sayıdaki karışımları 7 ve 28 günlük kürden sonra serbest basınç deneyine tabi tutmuştur. Uçucu kül içeriği arttıkça kaolin kilinin likit limit, plastisite indeksi, şişme ve büzülme potansiyeli değerlerinin düştüğünü görmüştür. Uçucu kül-mermer tozu katkısında bu azalmaların daha fazla olduğunu tespit etmiştir. Zemin-uçucu kül-mermer tozu atığı karışımının zemin-uçucu kül karışımına göre daha yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve daha düşük optimum su muhtevası değerlerine sahip olduğunu tespit etmiştir. Kaolin kili-uçucu kül-mermer tozu karışımının küre bırakıldıktan sonra serbest basınç dayanımında önemli artışlar görmüştür. Kaolin kilinin drenajsız kayma mukavemetinin uçucu kül ve uçucu kül-mermer tozu içeriğinin artması ile önemli ölçüde arttığını gözlemlemiştir. Uçucu kül ve uçucu kül-mermer tozu katkılarının kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerini arttırdığını gözlemlemiştir. Kaolin kilinin CBR değeri %6 uçucu kül katkısı ile %16,86' dan %24,46 ya, %6 uçucu kül-mermer tozu katkısı ile %31,20' ye yükseldiğini tespit etmiştir. Uçucu kül atığının mermer tozu atığıyla birleştirilmesiyle problemlili zeminlerin ıslahında oldukça iyi sonuçlar verdiğini görmüştür. Uçucu kül-mermer tozu katkısının sadece uçucu kül katkısına kıyasla kaolin kilinin fiziksel ve mekanik özelliklerini daha pozitif yönde değiştirebileceği sonucuna varmıştır.

Ahmad vd. (2024), uçucu külün şişen zeminlerin mekanik davranışını iyileştirmedeki katkısı üzerine geçmişte yapılmış araştırmaları eleştirel bir şekilde incelemiştir. Toprak-uçucu kül karışımının farklı dozajlar üzerinde Atterberg limitleri,

serbest basınç dayanımı, Kaliforniya Taşıma Oranı ve şişme potansiyeli üzerindeki etkisini bir dizi geoteknik ve mikroyapısal deneyler yoluyla incelemişlerdir. Şişen zemin zemine değişen oranlarda (%25-40) uçucu kül eklenmesiyle plastik davranışta %30-33, basınçtaki kesme dayanımında %40-48, en düşük şişmeyle (%42-48) penetrasyon direncinde %52-55 ve uçucu kül-zemin karışımının sıkıştırılabilirliğinde %36-40 iyileşme gözlemlemişlerdir. Killi zeminin şişme büzülme davranışını, aktif puzolanik tepkimeler nedeniyle oluşan mineral değişimine ve kimyasal bileşimlere bağlamışlardır.

Krishnan vd. (2024), killi pişirilmiş tuğla, pişirilmemiş tuğlalara uçucu kül ekleme ve beton tuğlalara atık malzeme-uçucu kül karışımının eklenmesi üzerine yapılan çalışmaların kapsamlı bir analizini sunmuşlardır. Kil veya betondan üretilen pişirilmemiş tuğlaların çamur, alçıtaşı, taş ocağı tozu ve kireç gibi geri dönüşüm malzemeleriyle ikame edilebileceğini savunmuşlardır. Uçucu kül katkılı tuğlaların yüksek performansları, düşük karbon emisyonları, düşük malzeme maliyetleri ve geleneksel tuğlalara alternatif malzeme olabileceğini ve uçucu külün faydalarından dolayı dünyada tarımsal uygulamalar da dahil potansiyel endüstriyel kullanımını vurgulamışlardır.

Taştan vd. (2011), organik zeminlerin stabilizasyonunda uçucu külü katkısının etkisini ve statibilizenin derecesini etkileyen muhtemel faktörleri incelemişlerdir. Organik zemin-uçucu kül karışımları ve işlenmemiş toprak numuneleri üzerinde serbest basınç ve esneklik modülü testleri gerçekleştirmişlerdir. Organik zeminlerin serbest basınç dayanımının uçucu kül katkısı arttıkça artabileceğini, ancak bu artışın zemin türü ve uçucu kül özelliklerine bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Kuru uçucu kül katkısının organik zemine eklenmesiyle su içeriğinin azalması sebebiyle mukavemetin artabileceğini gözlemlemişlerdir. Uçucu külün serbest basınç dayanımı ve esneklik modülündeki artışı etkileyen önemli faktörler arasında CaO içeriği ve CaO/SiO<sub>2</sub> oranı olduğunu tespit etmişlerdir. Zeminin organik madde içeriğindeki artışın toprak-uçucu kül karışımının dayanımını azalttığı düşüncesiyle hareket ederek karışımlardaki uçucu kül oranını arttırmışlardır. Bu durumda serbest basınç dayanımı ve esneklik modülünün arttığını gözlemlemişlerdir.

Naganathan vd. (2015), uçucu kül ve taban külünü kullanarak geleneksel olmayan yöntemler tuğlalar üzerinde çalışma yapmışlardır. Tuğlaları taban külü, uçucu kül ve çimento kullanılarak, presleme ve pişirme olmadan, kendiliğinden yerleşecek şekilde üretmişlerdir. Tuğlalar daha sonra basınç dayanımı, kopma modülü, ultrasonik darbe hızı

(UPV), su emme, ilk emme oranı, yangın direnci ve durabilite özellikleri test edilmiştir. Bu testler sonucunda geleneksel yöntemle yapılan kil tuğlalara kıyasla daha iyi performans gösterdiğini tespit etmiştir. Basınç dayanımı 7,13 ile 17,36 MPa arasında iken UPV 2,2 ile 2,96 km/s arasındadır. Uçucu küldeki artış su emilimini azaltmıştır. Yangına dayanıklılık testleri ile tuğlalarda herhangi bir parçalanma olmadığını gözlemlemişler ve ısıtmadan sonra %30' a kadar dayanım artışı tespit etmişlerdir. Tuğlaların en iyi performansı için taban külü, uçucu kül ve çimento oranının 1/1/0,45 olduğunu belirlemişlerdir. Bu çalışmayla geliştirilmiş tuğlaların geleneksel tuğlalara alternatif olarak kullanılabilceğini ve sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlayabileceğini savunmuşlardır.

Rafieizonooz vd. (2016); kumu taban külü yerine, çimentoyu da uçucu kül yerine kullanarak beton üretmeye çalışmışlardır. Portland çimentosu yerine %0-20-50-75 ve 100 taban külüyle birlikte %20 uçucu kül içeren beton numuneleri hazırlamışlardır. Numunelerin taze ve sertleşmiş durumdaki özelliklerini belirlemişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda kum yerine koyulan taban külünün içeriği arttıkça betonun işlenebilirliğinin azaldığını tespit etmişlerdir. 28 günlük kürde tüm beton numunelerinin basınç, eğilme ve çekme dayanımlarında belirgin bir etki gözleyememişlerdir. 91 ve 180 günlük kür sürelerinden sonra hem deneysel hem de kontrol numunelerin basınç dayanımı önemli ölçüde artmış ancak neredeyse aynı kalmıştır. %75 taban külü ve %20 uçucu kül içeren deneysel karışımın eğilme ve yarıma çekme dayanımları kontrol numunesine göre çok daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. %50-75-100 taban külü ve %20 uçucu kül içeren deneysel beton karışımlarının kuruma büzülmesi kontrol numunesinden daha düşük olmuştur. Bu deneysel karışımların temel, alt temel, asfalt gibi yapılarda kullanılmasının maliyet, enerji ve çevre sorunlarını büyük ölçüde azaltacağını ispatlamışlardır.

#### **2.4. Yol Dolgusu**

Yol güzergahını, arazi şartlarına ve trafik yüküne göre projelendirilmiş geometrilere getirmek için güzergah üzerinde bazı yerler kazılır, bazı yerler ise kazılan malzemeye veya dışarıdan malzeme getirilerek doldurulur. Güzergahta kırmızı kota getirilmesi için doldurulan kısım “Yol Dolgusu” olarak tanımlanır (Özbek, 2025).

Geoteknik mühendisliğinde kaynakları zamanla tükenmeye başlayan doğal agregalar yerine geri dönüştürülebilen atık malzemelerin değerlendirilmesi oldukça

önemlidir. Hem çevreye hem de ekonomiye faydası olması sebebiyle geri dönüştürülebilir atık malzemelerin karayolu tabakalarında değerlendirilmesi konusundaki çalışmalar yaygındır. Yapılan literatür araştırmasında yol dolgusu ile ilgili hem ülke içinde hem ülke dışında fazlaca çalışmalar yapılmıştır. Yol dolgusu kavramı ülke dışındaki kaynaklarda “**road embankment**” kavramıyla fazlaca karşılaşılmaktadır.

#### **2.4.1. Yol dolgusu ile ilgili yapılmış çalışmalar**

Çiçek (2020), doğal ve atık malzemelerin geri kazanımından elde edilen yeni malzemeler ile oluşturulmuş yol dolgusu modellerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz etmiştir. Kumlu silt, kaya agregası, beton, cam gibi farklı malzemelerin yol dolgusuna etkilerini incelemiş, atık liflerin yol dolgusunda kullanıldığı modellerin analiz sonuçlarını doğal koşullar ile karşılaştırmıştır. Farklı geosentetik donatı sayıları ile güçlendirilmeye çalışılan yol dolgusu modelleri için de hesaplamalar yapmıştır. Böylece oluşturduğu yol modelinin güvenlik sayısına farklı malzemelerin, liflerin ve geosentetik sayısının etkilerini incelemiştir. Yolun ani göçmelerine karşı değerlendirmeler yaparak, dolgu altındaki yeraltı suyundan kaynaklanan konsolidasyon davranışının etkilerini farklı malzeme koşulları ile karşılaştırmıştır. Farklı malzemeler kullanarak inşa edilen dolgularda yolun farklı bölgelerinde trafik yükünden oluşabilecek oturma farklarını da değerlendirmiş ve geosentetiğin de etkilerini belirlemeye çalışmıştır. Hem çevreci hem de daha verimli çözümler için değerlendirmeler yapmıştır. Atık malzemelerin geri dönüşümü ile elde edilen malzemelerin, yol dolgularının stabilite ve güvenlikleri için önemli katkılar sağlayabileceğini gözlemlemiştir.

Karagül (2007), çift yönlü geogrid kullanarak ve kullanmadan yapılan yol dolgusunun statbilite ve maliyet analizlerini araştırmıştır. Plaxis programında dördünde geogrid kullanarak birinde kullanmadan analizler yapmıştır. Geogrid bulunan yol dolgularında kullanılan dolgu malzemesi kum-çakıl iken, geogrid olmayan yol dolgusunda kullanılan malzeme Karayolları Şartnamesi’ nde belirtilen özelliklerde temel ve alt temel malzemesidir. İki durum arasında oturmalar, plastik noktalar ve maliyet analizlerini karşılaştırmıştır. Geogrid olan yol dolgusunun olmayan yol dolgusuna göre daha stabil, ekonomik ve pratik olduğunu tespit etmiştir.

Bayram (2017), dip tarama malzemelerini çeşitli katkılar ile iyileştirerek yol dolgusunda yeniden kullanım potansiyelini aratmıştır. İki farklı bölgeden temin edilmiş

ince daneli dip tarama malzemelerini Dtm-1 ve Dtm-10 olarak adlandırmıştır. Kirlilik barındırmayan dip tarama malzemelerinin temel zemin özelliklerini belirlemiştir. Dip tarama malzemeleri düşük mühendislik özelliklerine sahip olduğu için hidrolik katkıları bu özellikleri iyileştirmek için kullanmıştır. Katkı malzemesi olarak kireç ve çimento kullanmıştır. Doğal haldeki dip tarama malzemelerini ağırlıkça %2-4-6 oranlarında kireç ile, %5-10-15 oranlarında çimento ile karıştırmıştır. Oluşturduğu karışımlar ve saf haldeki dip tarama malzemeleri üzerinde Atterberg limit testleri, minyatür kompaksiyon testi ve serbest basınç deneyi gerçekleştirerek tarama malzemesinin mühendislik üzerindeki değişimler ve yol inşaatında potansiyel kullanımını değerlendirmiştir. Yapılan çalışmalarda kireç ve çimento katkı malzemeleri ile Tuzla bölgesinden çıkarılan ince daneli dip tarama malzemelerinin mühendislik özelliklerinin iyileştirilebileceğini ve malzemenin yol dolgusu olarak kullanılabilirliğini göstermiştir.

Baydilli (2018), Kayseri Çinko-Kurşun üretim tesisi atıklarını, yol temel ve alttemel tabakalarında belirli oranlarda karıştırarak kullanılabilirliğini araştırmış ve Karayolu Teknik Şartnamesi' nde bulunan limitlere göre değerlendirmiştir. Karayolları 6. Bölge Müdürlüğüne ait Pamuktepe Taş Ocağı' nda üretilen kalker ile ÇİNKOM A.Ş. de stok sahasında bulunan atık cürufu kullanarak Modifiye Proktor ve CBR deneylerini uygulamıştır. Temel ve alttemel malzemelerinde taş ocağı malzemesi yerine farklı oranlarda cüruf malzeme ilave edilerek cüruf katkısının meydana getirdiği olumlu ve olumsuz etkileri araştırmıştır. Yapılan deneyler sonucunda belirli oranlarda kullanılan cürufun istenilen niteliklerin bazılarında olumlu cevap verdiğini ve cüruf katkısının dolgu ve üstyapı temel alttemel tabakalarında ayrı ayrı belirlenen oranlarda kullanılabilir olduğunu tespit etmiştir.

Taştan (2023), yol dolgusunda kullanılması planlanan geri kazanılmış asfalt agregası , geri kazanılmış beton agregası, elektrik arkı fırın cürufu , pota fırın cürufu atık malzemelerinin geoteknik açıdan dolgu malzemesi olarak kullanılabilir nitelikte olup olmadığını araştırmıştır. Atık malzemelerin dane çapı dağılımı, plastisite özellikleri, özgül ağırlığı, kompaksiyon parametreleri, permeabilite katsayıları, kayma mukavemeti parametreleri, ıslak ve kuru CBR değerlerini belirlemek için deneyler yapmıştır. Çelik ASTM D4792-13 standardına uygun hızlandırılmış şişme deneyleri gerçekleştirerek maksimum şişme yüzdeleri belirlemiştir. Atık malzemelerin geoteknik mühendisliği açısından kullanılabilirliğini incelemek için ince ve kaba gradasyonlu iki doğal zemin

malzemeleri kullanarak sonuçları karşılaştırmıştır. Sonuç olarak belirtilen atık malzemelerin yol dolgusunda doğal agrega yerine granüler malzeme olarak kullanılmasının, atık yönetimini kontrol altına almak ve doğal kaynakları korumak için uygun koşullara sahip olduğunu belirlemiştir. Ayrıca pota fırın cürufunun duraylılık sorunlarına yol açmadan yol dolgusunda kullanılabilmesi için pota fırın cürufuna farklı iyileştirme yöntemleri uygulanarak şişme davranışının incelenmesi gerektiği sonucuna da varmıştır.

Havanagi vd. (2012), Hindistan'ın farklı endüstrilerinden bakır cürufu, çinko cürufu, çelik cürufu ve gölet külünü temin etmişler ve bu atıkların yol dolgusu ve alt zemin tabakalarında kullanılmasına uygun olup olmadığını araştırmışlardır. Dolgunun tasarım ve stabilite analizlerini; farklı doygunluk, trafik ve sismik koşullar altında yapmışlardır. Bu atık malzemelerin temel ve bitümlü tabakalarda ince agrega yerine kullanılabilirliğini de araştırmışlardır. Ayrıca atık malzemelerin fiziksel, kimyasal ve geoteknik özelliklerini de belirlemişlerdir ve geleneksel yerel zemin özellikleriyle karşılaştırmışlardır. Tüm atık malzemelerin yol dolgusu yapımına uygun olduğunu, bakır cürufu ve çinko cürufunun ise alt temel, temel ve bitümlü tabakaların inşasında ince agrega yerine kısmen kullanılabileceğini tespit etmişlerdir.

Arama vd. (2023), konut binalarında depremlerin neden olduğu yapısal hasarlar sonucunda ortaya çıkan plastik atıkları oransal ve niteliksel olarak sınıflandırıp geoteknik mühendisliğinde alternatif malzeme olarak kullanma yöntemlerini araştırmışlardır. 2023'te Kahramanmaraş'ta ve Hatay'da meydana gelen depremlerden elde edilen verilerden yararlanmışlardır. Yıkılan, yıkılması gereken ve orta-ağır hasarlı binalardan çıkarılan plastik parçaların türlerine ve miktarlarına göre sınıflandırma yapmışlardır. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın "Enkaz Döküm Sahasından Toplanan Hafriyatın Deprem Bölgelerinde Hasar Görmüş Yolların Tamirinde Kullanılması" çalışması çerçevesinde, plastik atıkların yol dolgusu olarak kullanılabilmesi durumunda mümkün olan iyileştirme seviyesi ve mevcut atıklarla hangi yol uzunluklarının iyileştirilebileceği konusunda parametrik çalışmalar yapmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemiyle bilgisayar programında analizler yapmışlardır. Plastik atık malzemeler ile zemin iyileştirme konusunda deprem bölgesine ait bir modelleme yapılamadığı için literatür araştırması yaparak benzer zemin profillerine sahip sahalara ait deneylerden yararlanarak tasarım parametrelerini belirlemişlerdir. Statik yüklemeler durumunda

plastik atık malzemelerin yol alt yapısında kullanılmasının avantaj ve dezavantajlarını; ilave boşluk suyu basıncı, deplasman ve güvenlik sayısı gibi faktörlerin değişimleri üzerinden değerlendirmişlerdir. Hasar görmüş yapıların enkazlarının hızlı bir şekilde bertaraf edilebilmesi ve bu atık malzemelerden etkin bir şekilde faydalanabilmesine dair süreçler ortaya koymuşlardır.

### **3. MATERYAL ve YÖNTEM**

Çalışmada, kırmızı çamur atık malzemesini üç farklı halde hazırlanan filtre çamuru malzemesi ile karıştırıp yol dolgusunda kullanılması araştırılmıştır. Çalışma sırasında yapılan deneyler Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümüne ait olan Geoteknik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilk kısmında malzemelerin deneylere hazır hale getirme işlemleri yapılmıştır. Katkılı kırmızı çamur numunelerin karışım oranları araştırılmıştır.

DeneySEL çalışmaların ilk kısmında kullanılan malzemeler üzerinde tanımlayıcı deneyler olan hidrometre, Atterberg limit (plastik limit, likit limit) ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır.

Filtre çamuru katkılı kırmızı çamur numunelerinde dayanımın artıp artmadığını araştırmak için tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Yol dolgusunda kullanılacak olan malzemelerde aranan mühendislik parametrelerinden biri olan Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi yapılmıştır. CBR deneyi malzeme ince taneli olduğu için ıslak olarak yapılmıştır.

Filtre çamuru ile gerçekleştirilen iyileştirme işleminin mikro-kimyasal yapısını incelemek amacıyla SEM, EDX ve XRD analizleri yapılmıştır.

#### **3.1. Malzemeler**

Çalışma kapsamında kullanılan malzemeler Konya ili içerisinde yer alan fabrikalardan elde edilen endüstriye atık malzemelerdir. Atık malzemelerin depolanması ve çevreye etkileri nedeni ile geri dönüşüme kazandırılması amaçlanmaktadır.

### 3.1.1. Kırmızı çamur

Çalışmada kullanılan kırmızı çamur Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş. ye ait kırmızı çamur atık barajından getirilmiştir. İçerisinde bir miktar su bulunan ve büyük boyutlarda gelen kırmızı çamur, su muhtevasını daha hızlı kaybetmek amacıyla daha küçük boyutlara getirmek suretiyle çekiçle ezilmiş ve içerisindeki nemi bitirmek için 110°C sıcaklıkta 24 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutulan malzeme öğütücüde öğütülerek yaklaşık 10 nolu elekten geçecek tane boyutuna getirilmiştir (Şekil 3.1.). Ardından malzeme 40 nolu elekten geçirilerek karışım numuneleri için istenen tane boyutuna getirilmiştir. Kırmızı çamurun saf hali ve öğütülüp elenmiş hali Şekil 3.2' de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kırmızı çamur ezme ve öğütme işlemi



Şekil 3.2. Saf kırmızı çamur ve öğütülüp elenmiş kırmızı çamur

Kırmızı çamura ait kimyasal kompozisyon Çizelge 3.1' de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Kırmızı çamur kimyasal kompozisyonu

Bileşik	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O
Kırmızı çamur (%)	14,30	11,40	24,10	25,10	9,35	2,95	0,44	0,28	0,22	0,11

### 3.1.2. Filtre çamuru

Çalışmada kullanılan filtre çamuru Konya Şeker Fabrikasından temin edilmiştir. Filtre çamuru kolay ezilebilir yapıda olduğu için öğütme işlemine gerek kalmadan çekiçle ezilmiştir. Ezilen malzeme 40 nolu elekten geçirilerek karışım numuneleri için istenen tane boyutuna getirilmiştir. Filtre çamurunun ezme işlemi ve saf haliyle ezilip öğütülmüş hali Şekil 3.3' te verilmiştir.



**Şekil 3.3. (a)** Filtre çamurunu ezme işlemi **(b)** Ezilip elenmiş filtre çamuru ve saf filtre çamuru

Filtre çamuru içerdiği organik maddeler, zemin stabilizasyonunda kullanılmasını etkilemektedir. Filtre çamurunun içindeki organik madde miktarını azaltmak adına iki farklı metot uygulanmıştır. Bu metotlar;

- 1.Filtre çamurunu yıkayarak organik madde miktarını azaltmak,
- 2.Filtre çamurunu yakarak organik madde miktarını azaltmak.

Yukarıda bahsedilen iki metot ilgili alt başlıklarda açıklanmıştır.

### 3.1.2.1. Filtre çamurundaki organik maddelerin uzaklaştırılması

Filtre çamuru içerisindeki organik maddeler, filtre çamuru içerisindeki kirecin aktivasyonunu düşürebilmektedir. Bu yüzden filtre çamurunun içerisindeki organik maddelerden kurtulmak için bazı yöntemler araştırılmıştır. Bu çalışmada filtre çamuru yıkanarak ve yakılarak iki farklı şekilde organik maddeden arındırılmaya çalışılmıştır.

Yıkama işleminde, özgül ağırlığı hafif olan organik maddelerin suyun üstünde kalarak arıtılması amaçlanmıştır. Yıkama işlemindeki işlemler sırası ile verilmiştir.

Yıkamış durumda 40 nolu elekten geçirilmiş filtre çamurundan 100 gr alınmış ve suyla birlikte 1000 ml' lik tüpte süspansiyon hazırlanmıştır (Şekil 3.4.a.). Bu süspansiyon 60 saniye boyunca alt üst yapmak suretiyle karıştırılarak filtre çamurunun suyun içinde homojen olarak dağılması sağlanmış ve 24 saat bekletilerek organik maddelerin yoğunluk farkından dolayı üste çıkması sağlanmıştır (Şekil 3.4.b.). Üste çıkan organik maddeler şırınga yardımıyla suyla birlikte alınmıştır. Ardından filtre çamuru, içerisinde kalan az miktarda su ile birlikte tepsiye serilmiş ve suyun üste çıkması için bir süre bekledikten sonra üste çıkan su şırınga yardımıyla tekrar çekilmiştir. Bu işlem sırasında malzemenin şırıngaya kaçmamasına özen gösterilmiştir. Malzeme içerisinde kalan su ise  $110^{\circ}\text{C}$ ' de 24 saat kurutulularak uzaklaştırılmıştır (Şekil 3.4.c.). Kurutulmuş filtre çamuru topaklaşmalardan kurtulmak amacıyla tekrar ezilip ufalanarak 40 nolu elekten geçecek hale gelmesi sağlanmıştır. Yapılan işlemlerden sonra filtre çamurunda %6,3 kütle kaybı tespit edilmiştir.



**Şekil 3.4.** Filtre çamuru yıkama işlemi basamakları: **(a)** Süspansiyon **(b)** 24 saat sonra süspansiyon **(c)** Kurutulmuş filtre çamuru

Filtre çamurundaki organik madde arındırmaya yönelik önceki denemelerde uygulanan 450° ısıda uzun süreli yakma işlemi, düşük verimle sonuçlanmıştır (Yenginar ve Özkan, 2023). Bu nedenle yakma işlemi daha yüksek ısılarda daha kısa sürede yapılmıştır.

Yakılmış durumda 40 nolu elekten geçirilmiş filtre çamurundan 100 gr alınmış ve kalınlığı yaklaşık 1 mm olacak şekilde serilmiştir. Ardından malzeme pürmüzlü ateş yardımıyla beş dakika boyunca gezdirilerek yakılmıştır (Şekil 3.5.). Yakma işleminde enerji tüketimini arttırmamak ve kimyasal yapıyı bozmamak amacıyla filtre çamurunun fazla koyulaşmamasına dikkat edilmiştir. Yapılan işlemlerden sonra filtre çamurunda %1,3 kütle kaybı tespit edilmiştir.



Şekil 3.5. Filtre çamuru yakma işlemi

### 3.1.3. Uçucu kül

Çalışmada kullanılan uçucu kül Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş. den getirilmiştir. Uçucu kül fabrikadan kuru halde geldiği için herhangi bir kurutma işlemi yapılmamıştır. Ayrıca iri tanelere sahip olmadığı için herhangi bir ezme ve öğütme işlemi yapılmamıştır. Kırmızı çamur ve filtre çamurunda da olduğu gibi 40 nolu elekten geçirilerek karışım numuneleri için istenen tane boyutuna getirilmiştir. Uçucu küle ait kimyasal kompozisyon Çizelge 3.2' de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Uçucu küle ait kimyasal kompozisyon

Bileşik	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O
Uçucu kül (%)	5,10	15,50	8,09	41,80	-	0,42	0,40	16,50	1,20	0,60

Bu malzeme Eti Alüminyum A.Ş. Bayavşar Kömür Ocağından çıkarılan linyit kömürünün yakılmasıyla elde edilmiş olup C sınıfına aittir (Şekil 3.6.). Fabrikadan getirilen uçucu kül ASTM C618 standardının en son versiyonuna göre kimyasal bileşimi nedeniyle C sınıfı olarak kategorize edilmiştir. Bu sınıflandırmanın temel nedeni, malzemenin CaO (yanmamış kireç) içeriğinin %41,8 olmasıdır. ASTM C618 standardına göre, CaO içeriği 18%' den büyük olan uçucu küller C sınıfı olarak tanımlanır. C Sınıfı Uçucu külü, yüksek oranda CaO içeriğinden dolayı hem puzolanik hem de kendinden çimentolama özelliklerine sahiptir.

**Şekil 3.6.** Bayavşar Kömür Ocağına ait elenmiş uçucu kül

### 3.2. Karışım Oranlarının Belirlenmesi

Kırmızı çamur çalışmada ana malzeme olarak kullanılmıştır. Kırmızı çamurun geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacı ile filtre çamuru katkısı yapılmıştır.

Filtre çamuru katkılı numuneleri hazırlamadan önce ilk olarak maksimum filtre çamuru katkısı oranı belirlenmiştir. İkinci aşama filtre çamuru katkılı kırmızı çamur numunelerinde karışım oranlarını belirlenmesi amaçlanmıştır. Son olarak ise filtre çamuru katkılı kırmızı çamur numunelerine uçucu kül katkısı ilave ederek dayanım parametrelerini daha da iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

#### 3.2.1. Maksimum filtre çamuru oranının belirlenmesi

Bu çalışmada ilk olarak kırmızı çamur ve filtre çamuru arasındaki karışım oranı araştırılmıştır. Karışım oranları hazırlanırken dikkat edilen nokta, filtre çamurunun

içerisinde bulunan organik maddelerin zamanla çürümesi ve numunelerde küflenmeye yol açmasıdır. Bu yüzden ilk olarak saf halde olan filtre çamuru kırmızı çamura belirli oranlarda ilave edilmiştir. Karışımların ağırlıkça oranları Çizelge 3.3' te gösterilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Kırmızı çamur ve filtre çamurunun ağırlıkça karışım oranları

Karışım Numarası	Kırmızı çamur (ağırlıkça yüzde (%))	Filtre Çamuru (ağırlıkça yüzde (%))
1 nolu karışım	80	20
2 nolu karışım	75	25
3 nolu karışım	70	30
4 nolu karışım	65	35
5 nolu karışım	60	40

Bu karışım oranlarında hazırlanan numuneler bir hafta kürde bekletilmiştir. Kürden çıkartılan numuneler, yüzeylerinde küflenme olup olmadığı araştırılmıştır. Numunelerin bir hafta kürde bekletildikten sonra görünüşleri Şekil 3.7' de verilmiştir.



1 nolu karışım

2 nolu karışım

3 nolu karışım

4 nolu karışım

5 nolu karışım



**Şekil 3.7.** Karışım numunelerini kürden çıkmış hali

Kürde bekletilen numuneler incelendiğinde karışımdaki filtre çamuru oranının %25 geçtiğinde numunelerde küflenmelere yol açtığı görülmektedir. Bu durum malzemenin giderek zayıflanmasına yol açtığı için karışımdaki maksimum filtre çamuru oranı %25 olarak belirlenmiştir.

### 3.2.2. Karışım oranlarının belirlenmesi

İyileştirilmesi amaçlanan kırmızı çamur numunelerinde karışım oranlarında ilk olarak maksimum filtre çamuru oranı belirlenmiştir. Bir sonraki aşamada filtre çamurunun içerisindeki organik madde miktarını azaltmak için yıkanma ve yakılma işlemleri yapılmıştır.

Bu çalışmalar sonrasında iyileştirilmesi amaçlanan kırmızı çamur numunelerine ait karışım oranları Çizelge 3.4’ te verilmiştir.

**Çizelge 3.4.** İyileştirilmesi amaçlanan kırmızı çamur numunelerinin karışım oranları

Filtre çamuru	Karışım Adı	Kırmızı çamur (ağırlıkça yüzde (%))	Filtre Çamuru (ağırlıkça yüzde (%))
Saf halde	FÇ-5	95	5
	FÇ-10	90	10
	FÇ-15	85	15
	FÇ-20	80	20
	FÇ-25	75	25
Yıkanmış	Yık. FÇ-5	95	5
	Yık. FÇ-10	90	10
	Yık. FÇ-15	85	15
	Yık. FÇ-20	80	20
	Yık.FÇ-25	75	25
Yakılmış	Yak. FÇ-5	95	5
	Yak. FÇ-10	90	10
	Yak. FÇ-15	85	15
	Yak. FÇ-20	80	20
	Yak. FÇ-25	75	25

### 3.2.3. Uçucu kül katkısının belirlenmesi

Filtre çamuru ile iyileştirilmiş kırmızı çamur numunelerinin dayanım özelliklerini artırmak için uçucu kül katkısı kullanılmıştır

Seydişehir Eti Alüminyum Fabrikasından alınan kırmızı çamur ve uçucu kül ile yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalara göre uçucu kül katkılı kırmızı çamur numunelerinin dayanımları uçucu kül ile artış göstermiştir (Yenginar vd., 2023). Bu çalışmada kırmızı çamur ve filtre çamuru atık malzemelerinin kullanımı araştırıldığı için, uçucu kül miktarı karışım ağırlığının %10 ile sınırlandırılmıştır.

Seydişehir Eti Alüminyum Fabrikasından getirilen uçucu kül katkısı üç farklı karışım grubunda (saf halde, yıkanmış, yakılmış) tek eksenli deney sonucunda elde edilen

en iyi numunelere ilave edilmiştir. Uçucu kül katkılı numuneler, ağırlıkça %2,5 , %5, %7,5 ve %10 olmak üzere dört farklı oranda ilave edilmiştir. İyileştirilmesi amaçlanan kırmızı çamur filtre çamuru karışımına ilave edilecek uçucu kül oranları Çizelge 3.5' te verilmiştir.

**Çizelge 3.5.** İyileştirilmesi amaçlanan KÇ+FÇ numunelerine uçucu kül katkı oranları

Filtre çamuru	Karışım Adı	Kırmızı çamur+Filtre çamuru (ağırlıkça yüzde (%))	Uçucu kül (ağırlıkça yüzde (%))
Saf halde	Opt. FÇ+ UK-2,5	97,5	2,5
	Opt. FÇ+ UK-5	95	5
	Opt. FÇ+ UK-7,5	92,5	7,5
	Opt. FÇ+ UK-10	90	10
Yıkanmış	Opt. Yık. FÇ+ UK-2,5	97,5	2,5
	Opt. Yık. FÇ+ UK-5	95	5
	Opt. Yık. FÇ+ UK-7,5	92,5	7,5
	Opt. Yık. FÇ+ UK-10	90	10
Yakılmış	Opt. Yak. FÇ+ UK-2,5	97,5	2,5
	Opt. Yak. FÇ+ UK-5	95	5
	Opt. Yak. FÇ+ UK-7,5	92,5	7,5
	Opt. Yak. FÇ+ UK-10	90	10

### 3.3. Deneysel Çalışmalar

Çalışma kapsamında öncelikle indeks deneyleri olan elek analizi, hidrometre, Atterberg limitleri deneyleri ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. İndeks deneylerinden sonra dayanım parametresini ölçmek için tek eksenli basınç deney (UCS) işlemi yapılmıştır. Son olarak, stabilize edilen malzemenin yol dolgusu ve alt temel uygulamalarına uygunluğunu değerlendirmek için Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır.

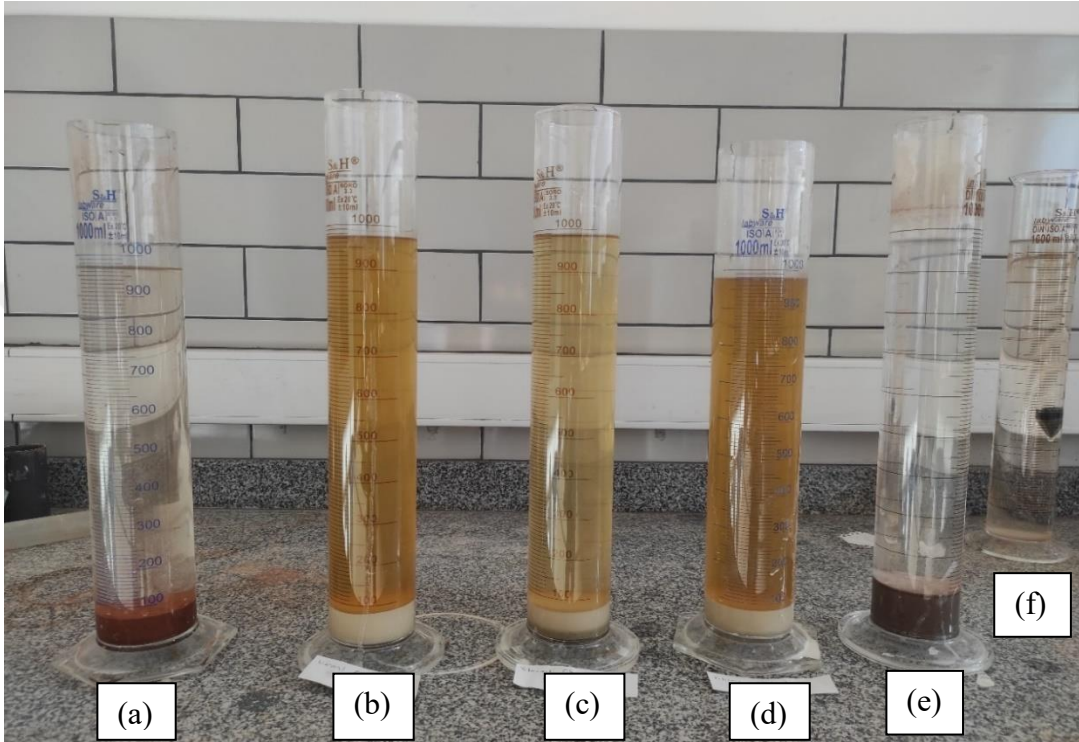
#### 3.3.1. İndeks deneyleri

Yapılan çalışmada, stabilize edilecek kırmızı çamur ve katkı malzemelerinin (filtre çamuru ve uçucu kül) temel özelliklerini belirlemek üzere öncelikle indeks deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Malzemelerin tane boyutu dağılımını tespit etmek için, iri daneli malzemeler için ASTM D6913' e uygun elek analizi ve ince daneli malzemeler için ASTM D7928' e uygun hidrometre deneyleri yapılmıştır. 24 saatlik hidrometre deney takibi sonucunda numunelerin deney tüpündeki son halleri Şekil 3.8' de verilmiştir.

Zeminlerin plastik davranışını ve sınıflandırma parametrelerini belirlemek amacıyla likit limit ve plastik limit deneyleri ASTM D4318 standardına göre uygulanmıştır.

Kullanılan malzemelerin diğer tanımlayıcı özelliği olan özgül ağırlık değeri ASTM D854 standardı kullanılarak tayin edilmiştir.



**Şekil 3.8.** 24 saatlik hidrometre deney takibi sonucu numunelerin son hali: (a) Kırmızı çamur (b) Saf filtre çamuru (c) Yıkılmış filtre çamuru (d) Yakılmış filtre çamuru (e) Uçucu kül (f) Okumadan sonra hidrometrenin konulduğu saf su

### 3.3.2. Dayanım deneyleri

Kırmızı çamur ve filtre çamuru, genellikle ince daneli malzemelerden oluşan atık malzemeler olduğu için dayanım parametreleri tek eksenli basınç deneyi ile yapılmıştır.

#### 3.3.2.1. Tek eksenli basınç (UCS) deneyi

Filtre çamuru katkılı kırmızı çamur numunelerinin dayanımları için UCS deneyleri yapılmıştır. Sönmemiş kireç (CaO) içeren filtre çamuru ilaveli numunelerde, kimyasal reaksiyonlar sonucu hem plastik özelliklerinde hem de dayanım parametresinde değişimler beklenmektedir. Bu kimyasal reaksiyon sürecini ve zamanla oluşan

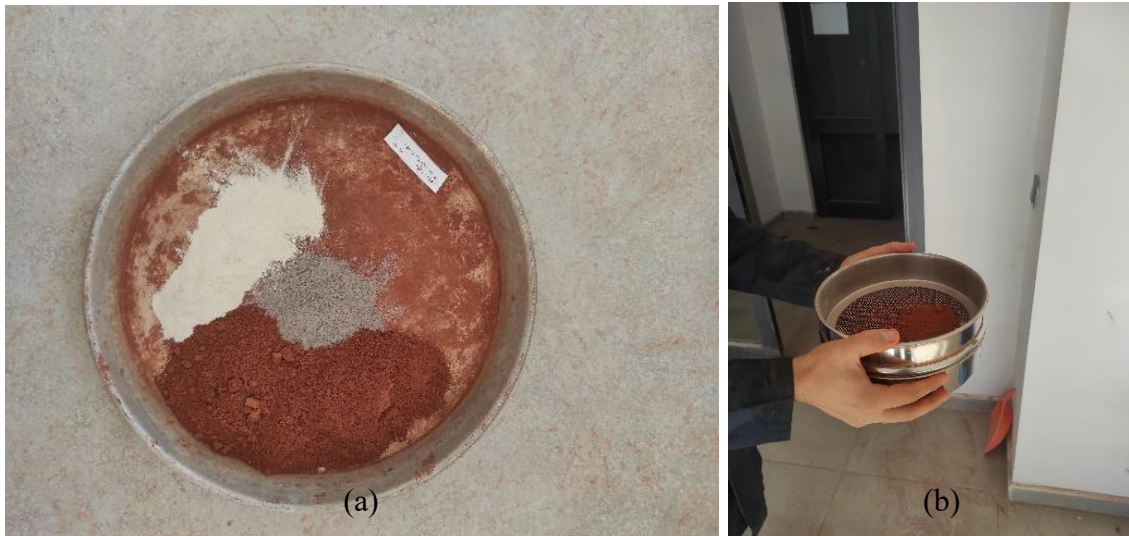
değişimleri gözlemlemek amacıyla, UCS deneyleri için hazırlanan katkılı numuneler kür ortamında bekletilmiştir. Bu kapsamda, numuneler sırasıyla 7, 28 ve 56 günlük kür ortamında bekletilmiştir. Kür süresi biten numuneler test edilmiştir.

Çalışmada UCS deneyleri yapılmadan önce kırmızı çamura ait standart kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Bu deney sonunda kırmızı çamura ait maksimum kuru yoğunluk  $1,41 \text{ g/cm}^3$  ve optimum su içeriği %34 bulunmuştur.

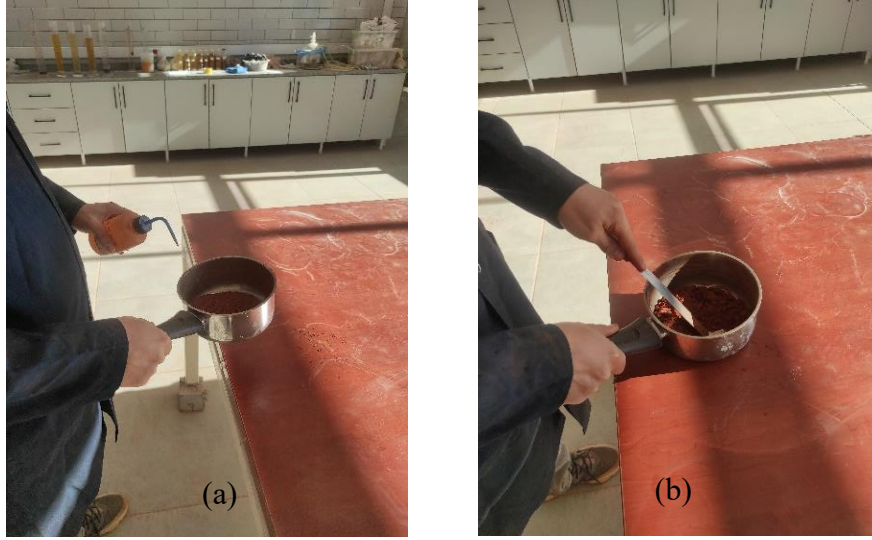
Standart kompaksiyon deneyinden elde edile kuru yoğunluk ve su içeriği değerlerine göre, filtre çamuru katkılı kırmızı çamur numuneleri UCS deneyi için hazırlanmıştır. UCS numuneleri 3 tabakada hidrolik piston yardımı ile statik olarak sıkıştırılmıştır. Her tabaka arasında kenetlenmeyi ve yoğunluğu ayarlamak için spatula yardımı ile sıkışan tabakanın üst kısmı çizilmiştir (Şekil 3.9. - 3.12.).

Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra UCS numuneleri kalıptan çıkartılmıştır. Numune çıkartma işleminin ardından kürsüz numuneler doğrudan deneye tabi tutulmuştur. Kürde bekletilecek olan numuneler gerekli veriler yazılarak plastik torba içinde kür ortamına koyulmuştur.

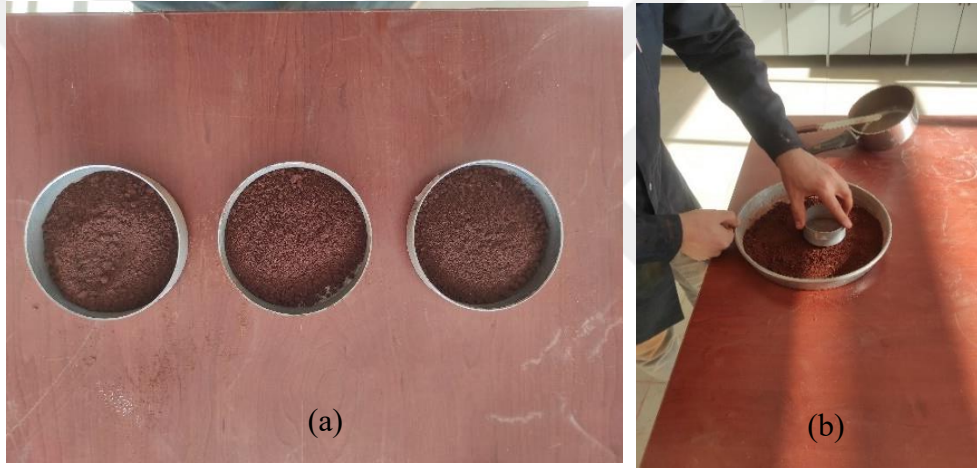
Tek eksenli basınç deneyi (UCS), ASTM D2166 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Deney süresince, oluşan deformasyonlar LVDT (Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatör) ve uygulanan eksenel yüklemeler load cell (yük hücresi) kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3.13.). Gerekli tüm okumalar, deney boyunca manuel olarak kaydedilmiştir.



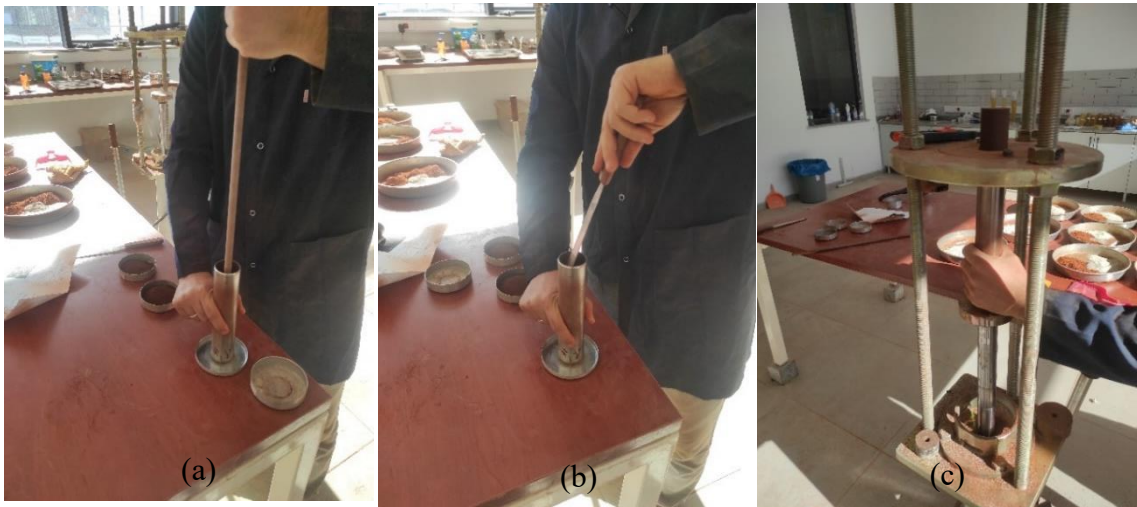
Şekil 3.9. (a) Oranlı malzemelerin karıştırılmamış hali (b) Malzemelerin 10 nolu elek yardımıyla karıştırılması



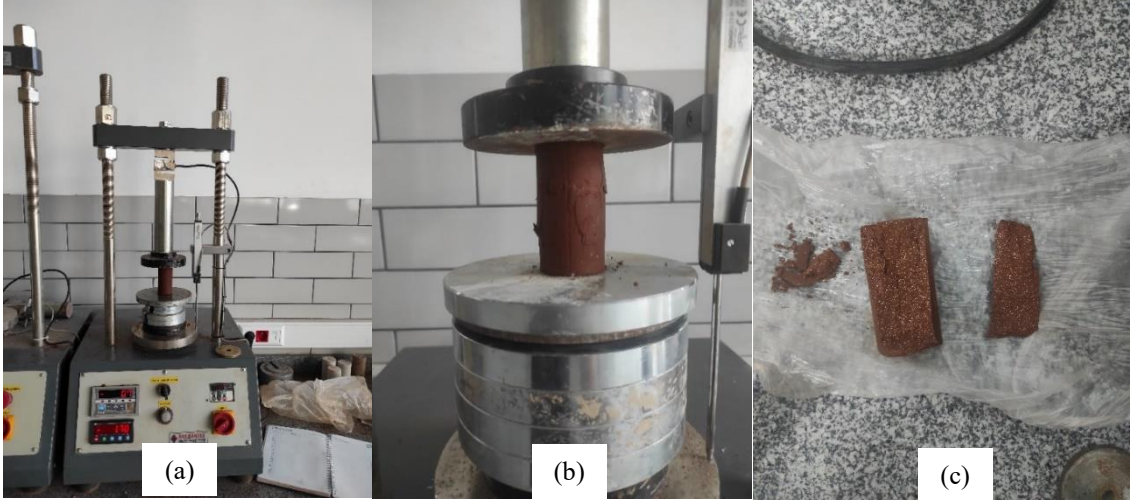
**Şekil 3.10. (a)** Karışıma su eklenmesi **(b)** Su eklenen karışımın spatula ile aşamalı karıştırılması



**Şekil 3.11. (a)** Karışımın toplardan arındırılması **(b)** Karışımın sıkıştırma işlemi için üç tabakaya bölünmesi



**Şekil 3.12. (a)** Karışımın sıkıştırılması **(b)** Tabakanın spatula ile üstünün çizilmesi **(c)** Numunenin hidrolik kriko yardımıyla kalıptan çıkarılması



**Şekil 3.13. (a)** Numunenin iki tabaka arasındaki hali **(b)** Numunenin yük hücresinde kırılmış hali **(c)** Kırılmış numune

### 3.3.2.2. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi

Filtre çamuru katkılı kırmızı çamur numuneleri yol dolgusunda kullanımı araştırıldığı için CBR deneyi yapılmıştır. CBR deneyi ASTM D1883 standartlarına göre yapılmıştır.

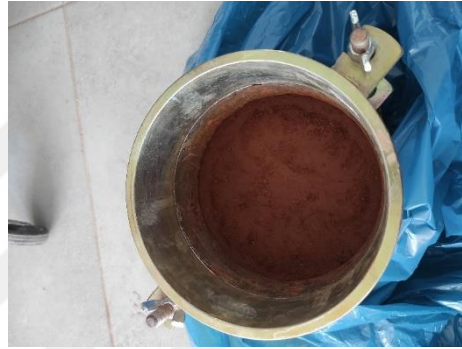
CBR kalıbına sıkıştırılan numune 15,24 cm çapında 12,70 cm yüksekliğinde hazırlanmıştır. CBR kalıbına sıkıştırılan numune, UCS deneyinde olduğu gibi kırmızı çamura ait maksimum kuru yoğunlukta ve optimum su içeriğinde hazırlanmıştır (Şekil 3.14.).

UCS deneyleri sonucunda elde edilen verilerde dayanım parametrelerinin değişimleri gözlemlendiği için CBR deneyi her numune için yapılmamıştır. CBR deneyi kırmızı çamur numunesi ve UCS deneyleri sonucunda en iyi sonucu veren numune üzerinde yapılmıştır.

Kırmızı çamur numunesinde hem kuru CBR hem de ıslak CBR deneyleri yapılmıştır. Filtre çamuru katkılı kırmızı çamur numuneler, çoğunlukla ince daneli zeminlerden oluştuğu için ıslak CBR deneyi yapılması uygun görülmüştür. Islak CBR deneyinin yapılmasının diğer bir nedeni ise CBR şişme değeri ölçülerek, Karayolları Teknik Şartnamesine uygun olup olmadığının araştırılmasıdır (KGM, 2013). CBR şişme değeri belirtilen değerlerin üstünde olduğunda yollarda oturma ve kabarmalara neden olmaktadır. Bu durum sürüş konforunu ve yolun servis ömrünü azalmaktadır.

Islak CBR deneyinde numuneler 4 gün boyunca suda bekletilmektedir. Bu süre içerisinde numunedeki hacim değişikliği gözlemlenmektedir. Kalıp içerisindeki CBR numunesi sadece düşey yönde hacim değiştirebileceği için, hacim değişikliği düşey yöndeki deformasyon saati ile ölçülmektedir.

CBR değeri, deneyde ölçülen yüklere karşılık yüksek kaliteli balast malzemesine ait referans yüke oranından hesaplanmaktadır. Bu oranlar, ASTM D1883' e göre, 2,5 mm penetrasyon derinliği için 13,34 kN ve 5,0 mm penetrasyon derinliği için 20,01 kN olarak belirlenmiştir. Bu hesaplanan oranlardan büyük olanı numuneye ait CBR değeri olarak belirlenmektedir.



Şekil 3.14. Kalıplanmış CBR numunesi

### 3.3.3. Mikrokimyasal analizler

UCS ve CBR deneyleri sonucunda elde edilen verilerin değişimlerinin açıklanabilmesi ve değerlendirilebilmesi için numuneler mikro boyutta incelenmiştir. Çalışmanın bu kısmında yapılan tüm analizler Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

#### 3.3.3.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Numunelerin mikroyapısal özellikleri olan taneciklerin dizilişi, gözenek yapısı ve bağlayıcı matrisin oluşumu görsel olarak incelenmiştir.

SEM analizinden önce kullanılan numuneler toz şekline getirilmiştir. SEM analizi esnasında numunelere yüksek vakum uygulandığından, numuneler 110°C sıcaklıkta kurutulmuştur. Kurutma işleminin diğer bir gerekçesi ise numune içerisindeki nemin

vakum altında buharlaşarak görüntü kalitesini bozması ve cihaza zarar vermesidir. Numunelerin kurutulmuş halleri Şekil 3.15’ te verilmiştir.

İnce daneli malzemeden oluşan analiz numuneleri altın-paladyum ile kaplanmıştır (Şekil 3.16.a.). Kaplama işleminin amacı, elektron demetlerinin yüzeyde birikmesini önleyerek net bir çözünürlük sağlamaktadır (Şekil 3.16.b.).

Çalışmada kullanılan taramalı elektron mikroskobu cihazı Şekil 3.17’ de verilmiştir.

### 3.3.3.2. Enerji dağılım spektroskopisi (EDX) analizi

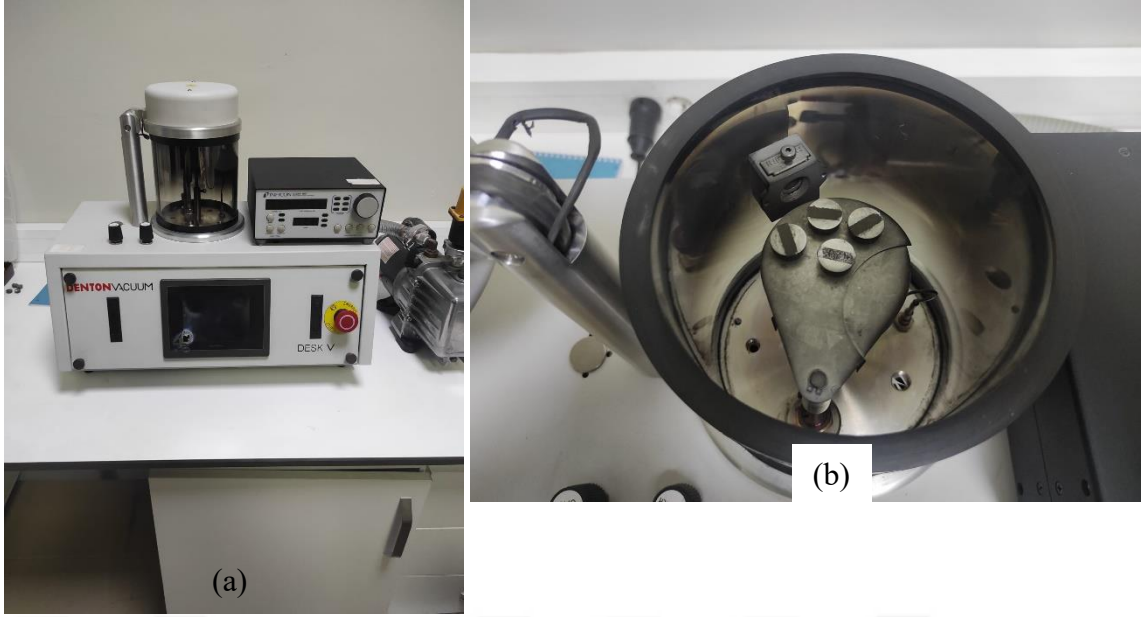
Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDX) analizi, SEM analizi ile birlikte yapılmıştır. EDX analizinde numunelerin bölgesel elementel bileşimi analiz edilmiştir. Böylece stabilizasyon reaksiyonlarının gerçekleştiğini gösteren kalsiyum, silisyum ve alüminyum gibi elementlerin dağılımı tespit edilmeye çalışılmıştır.

### 3.3.3.3. X-Işını kırınımı (XRD) analizi

Numunelerin kristal faz içeriğini belirlenerek, kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan CSH (Kalsiyum Silikat Hidrat) veya CASH (Kalsiyum Alüminat Silikat Hidrat) gibi bağlayıcı mineral fazların türünü ve miktarını tanımlamaya çalışılmıştır. Böylece kür süresince dayanım kazanımının kimyasal temelini ortaya koyulması amaçlanmıştır.



**Şekil 3.15.** Mikrokimyasal analizlerin yapılacağı numunelerin 110 °C’ de kurutulmuş halleri: **(a)** Opt. FÇ+UK-10 numunesi **(b)** Normal filtre çamuru **(c)** Yıkılmış filtre çamuru **(d)** Yakılmış filtre çamuru



Şekil 3.16. (a) Denton püskürtme kaplama cihazı (b) Numunelerin cihazda altın-paladyum kaplama işlemi



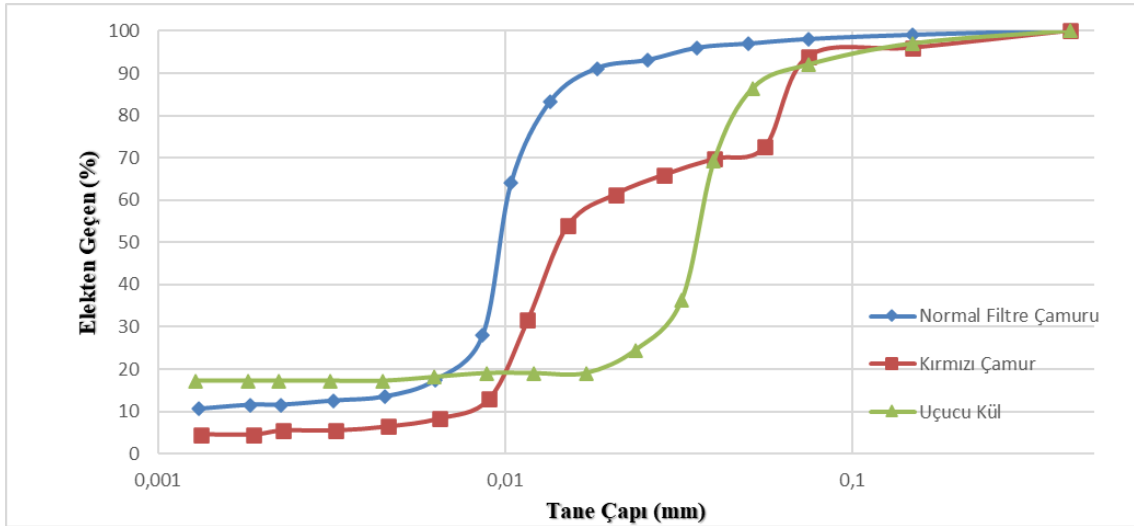
Şekil 3.17. Zeiss GeminiSEM 500 taramalı elektron mikroskobu cihazı

#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde çalışmada yapılan laboratuvar deneylerinin sonuçları paylaşılmıştır. Deneyde kullanılan malzemelerin hidrometre deneyiyle tane çapı dağılım eğrileri oluşturulmuştur. Kıvam limit deneyleri sonucunda plastisite indisi bulunmuş, USCS ve AASHTO sistemine göre zemin sınıfı belirlenmiştir. Serbest basınç deneyleri sonucunda gerilmeye karşılık gelen birim deformasyon grafikleri oluşturulmuş, buradan pik gerilmelerle serbest basınç direnci belirlenmiştir. Kırmızı çamura filtre çamurunun üç formu (saf halde, yakılmış, yıkanmış) ve uçucu kül katkısının kür etkileriyle birlikte serbest basınç direncinde ne gibi değişikliklere sebep olduğu belirlenmiştir. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) testi sonucunda bulunan CBR değeri ve şişme yüzdesi Karayolları Teknik Şartnamesi' nde bulunan standart değerlerle karşılaştırılmıştır. Mikroyapı testleriyle optimum sonuç veren numunelerin ve filtre çamurunun üç halinin de tane yapısı, faz dağılımı çökelti, kusurlar ve mikrokimyasal bileşimleri tespit edilmiştir. Filtre çamurunda yakma ve yıkama işlemlerinin tane yapısında ne tür değişikliklere sebep olduğu gözlemlenmiştir.

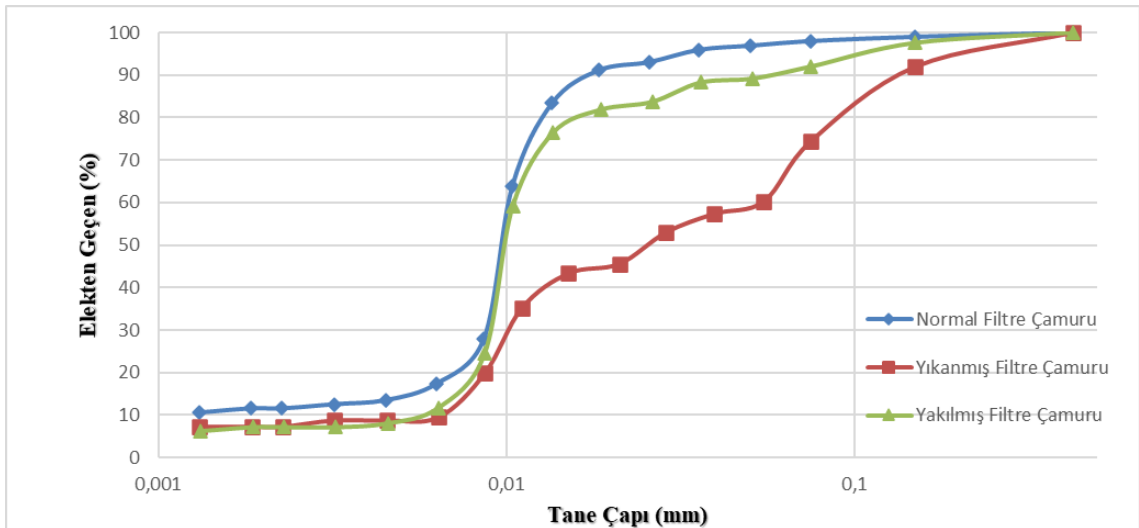
#### 4.1. Hidrometre Deneyi Sonuçları

Kırmızı çamur, normal filtre çamuru ve uçucu küle ait karşılaştırmalı elek analizi ve hidrometre deney sonuçları Şekil 4.1' de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Kırmızı çamur, normal filtre çamuru ve uçucu küle ait tane çapı dağılım eğrisi

Normal filtre çamuru yakılmış filtre çamuru ve yıkanmış filtre çamuruna ait karşılaştırmalı elek analizi ve hidrometre deney sonuçları Şekil 4.2' de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Normal filtre çamuru, yakılmış filtre çamuru ve yıkanmış filtre çamuruna ait tane çapı dağılım eğrisi

**Çizelge 4.1.** Malzemelerin zemin türüne göre oranları

Malzeme Adı	Malzeme Oranları (%)		
	Kum	Silt	Kil
Kırmızı Çamur	6	89,43	4,57
Normal Filtre Çamuru	2	86,44	11,56
Yakılmış Filtre Çamuru	8	84,79	7,21
Yıkanmış Filtre Çamuru	25,6	67,1	7,3
Uçucu Kül	8	74,77	17,23

Yapılan elek analizi ve hidrometre deneyi sonuçlarına göre (Çizelge 4.1.) kırmızı çamur ve uçucu külün silt ağırlıklı malzemeler olduğu tespit edilmiştir. Normal filtre çamurunu yakma ve yıkama işlemleriyle kum oranının artıp silt ve kil oranlarının azaldığı görülmüştür. Malzemeler silt ağırlıklı olma özelliğini kaybetmemiş ancak ince tane oranları büyük ölçüde azalmıştır.

#### 4.2. Atterberg Deneyleri Sonuçları

Normal filtre çamurunun kıvam limitlerinin ve USCS ve AASHTO sistemine göre zemin sınıfının tespiti amacıyla gerçekleştirilen likit limit ve plastik limit deney sonuçları Çizelge 4.2' de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Normal filtre çamuru kıvam limit deney sonuçları

Özellik	Değer
Likit limit (LL)	%55
Plastik limit (PL)	%50
Plastisite indisi (PI)	%5
Zemin sınıfı (USCS)	MH
Zemin sınıfı (AASHTO)	A-5(17)

Kırmızı çamurun kıvam limitlerinin ve USCS ve AASHTO sistemine göre zemin sınıfının tespiti amacıyla gerçekleştirilen likit limit ve plastik limit deney sonuçları Çizelge 4.3' te verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Kırmızı çamurun kıvam limit deney sonuçları

Özellik	Değer
Likit limit (LL)	%41,5
Plastik limit (PL)	%38
Plastisite indisi (PI)	%3,5
Zemin sınıfı (USCS)	ML
Zemin sınıfı (AASHTO)	A-5 (12)

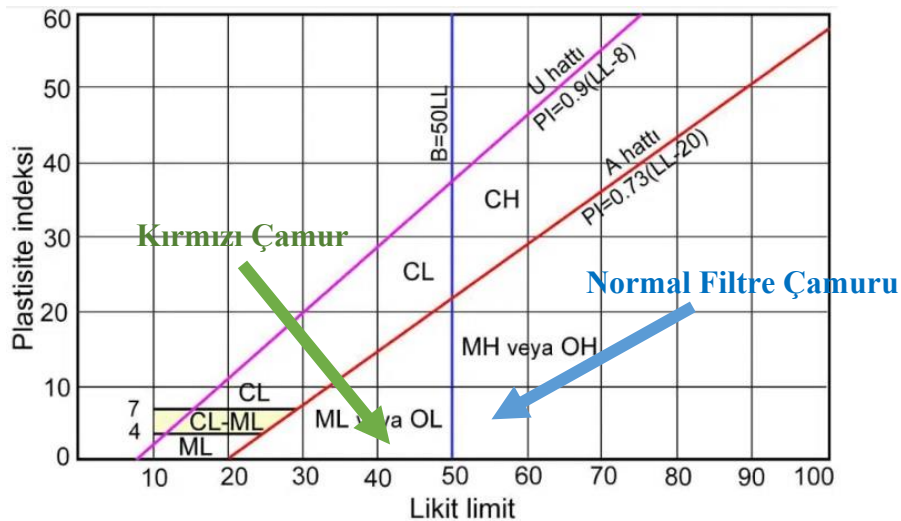
Uçucu kül cam fazından oluştuğu için ince taneli puzolanik malzemedir. Plastik malzeme özelliği olmayan (non-plastik) uçucu külün likit limit ve plastik limit değerleri bulunamamıştır.

Kırmızı çamur ve normal filtre çamurunun AASHTO zemin sınıflandırma tablosundaki yeri Şekil 4.3’ te gösterilmiştir. Atterberg deneylerinden elde edilen sonuçlara göre normal filtre çamurunun grup indisi 17, kırmızı çamurun grup indisi 12 olarak hesaplanmıştır.

Genel Sınıflandırma	Taneli Malzeme (200 No. Elekten geçen en çok %35)							Silt - Kil Malzemesi (200 No. Elekten geçen %35 den fazla)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Elek Analizi (Çeşen tanelerin % si) No. 10 Elek ..... No. 40 Elek ..... No.200 Elek .....	50 Max. 30 Max. 15 Max.	50 Max. 25 Max.	51 Max. 10 Max.	35 Max.	35 Max.	35 Max.	35 Max.	36 Min.	36 Min.	36 Min.	36 Min.
No. 40 elekten geçen kısmın karakteristiği Likit Limit % ..... Plastisite İndisi.....	6 Max.		N.P.	40 Max. 10 Max.	41 Min. 10 Max.	40 Max. 11 Min.	41 Min. 11 Min.	40 Max. 10 Max.	41 Min. 10 Max.	40 Max. 11 Min.	41 Min. (a) 11 Min.
Grup İndeksi .....	0		0	0		4 Max.		8 Max.	12 Max.	16 Max.	20 Max.
Başlıca bileşenlerinin isimleri .....	Taş parçaları Çakıl ve kum		İnce Kum	Siltli veya Killi Çakıl ve Kum				Siltli Zeminler	Killi Zeminler		
Temel zemini olarak genel hal .....	Çok iyi ile iyi					Orta ile Zayıf					

Şekil 4.3. Normal filtre çamuru ve kırmızı çamurun AASHTO zemin sınıflandırma tablosundaki yeri

Kırmızı çamur ve normal filtre çamurunun USCS plastisite grafiğindeki yeri Şekil 4.4’ te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Normal filtre çamuru ve kırmızı çamurun USCS plastisite grafiğindeki yeri

### 4.3. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

Kırmızı çamura katkı işlemi yapılmadan önce kırmızı çamurun katkısız halinden oluşan numune hazırlanıp serbest basınç deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda kırmızı çamurun serbest basınç direnci ( $q_u$ ) 220 kPa bulunmuştur.

Optimum su muhtevasında hazırlanıp sıkıştırılmış numunelere uygulanan serbest basınç deneyleri sonucunda karışım oranı ve kür süresine göre tespit edilen serbest basınç dirençleri ( $q_u$ ) Çizelge 4.4.-4.9' da gösterilmiştir.

#### 4.3.1. KÇ+Normal FÇ numuneler

Çizelge 4.4. KÇ+Normal FÇ numunelerin serbest basınç deney sonuçları

Numune Adı	Kür süresi (gün)	Serbest basınç direnci ( $q_u$ )(kPa)
FÇ-5	0	185,661
	7	190,860
	28	210,642
	56	351,745
FÇ-10	0	187,354
	7	203,440
	28	278,897
	56	376,129
FÇ-15	0	195,384
	7	251,102
	28	405,950
	56	594,772
FÇ-20	0	192,507
	7	245,943
	28	323,727
	56	554,006
FÇ-25	0	189,890
	7	234,675
	28	318,052
	56	520,822

KÇ+Normal FÇ numunelerin serbest basınç deney sonuçları Çizelge 4.4' te verilmiştir. Kırmızı çamura normal filtre çamuru katkısı sonucunda serbest basınç direncinde, aynı oran içerisinde kür süresi arttıkça artış sağlanmıştır. %5, %10, %15 normal filtre çamuru katkısı serbest basınç direncini kür süresinin de etkisiyle doğru orantılı olarak artırmıştır. En iyi sonucu 56 günlük kür süresinde %15 normal filtre çamuru katkılı numune vermiş, bu orandan sonra azalmaya başlamıştır. En iyi sonucu veren bu orana %2,5, %5, %7,5, %10 oranlarında uçucu kül katkısı yapılarak serbest basınç değerlerine etkisi araştırılmıştır.

### 4.3.2. KÇ+Normal FÇ+UK numuneler

Çizelge 4.5. KÇ+Normal FÇ+UK numunelerin serbest basınç deney sonuçları

Numune Adı	Kür süresi (gün)	Serbest basınç direnci (qu)(kPa)
Opt. FÇ+UK-2,5	0	218,112
	7	296,708
	28	385,718
	56	546,981
Opt. FÇ+UK-5	0	302,066
	7	394,330
	28	589,896
	56	722,698
Opt. FÇ+UK-7,5	0	348,872
	7	431,568
	28	870,763
	56	973,871
Opt. FÇ+UK-10	0	422,180
	7	608,477
	28	991,161
	56	1298,668

KÇ+Normal FÇ+UK numunelerin serbest basınç deney sonuçları Çizelge 4.5' te verilmiştir. %85 kırmızı çamur ve %15 normal filtre çamuru karışımına uçucu kül katkısı sonucunda serbest basınç direncinde, aynı oran içerisinde kür süresi arttıkça artış sağlanmıştır. Aynı kür süresinde ise uçucu kül oranı arttıkça serbest basınç direncinde artış görülmektedir. En iyi sonucu 56 günlük kür süresinde %10 uçucu kül katkılı numune vermiştir.

### 4.3.3. KÇ+Yakılmış FÇ numuneler

**Çizelge 4.6.** KÇ+Yakılmış FÇ numunelerin serbest basınç deney sonuçları

Numune Adı	Kür süresi (gün)	Serbest basınç direnci (qu)(kPa)
Yak. FÇ-5	0	136,073
	7	147,077
	28	152,638
	56	177,919
Yak. FÇ-10	0	143,808
	7	160,708
	28	177,318
	56	192,749
Yak. FÇ-15	0	147,397
	7	207,743
	28	220,859
	56	245,744
Yak. FÇ-20	0	160,777
	7	213,318
	28	237,476
	56	263,444
Yak. FÇ-25	0	188,972
	7	238,524
	28	254,595
	56	280,052

KÇ+Yakılmış FÇ numunelerin serbest basınç deney sonuçları Çizelge 4.6' da verilmiştir. Kırmızı çamura yakılmış filtre çamuru katkısı sonucunda serbest basınç direncinde, aynı oran içerisinde kür süresi arttıkça artış sağlanmıştır. Yakılmış filtre çamuru katkısı oranının artması serbest basınç direncini kür süresinin de etkisiyle doğru orantılı olarak artırmıştır. En iyi sonucu 56 günlük kür süresinde %25 yakılmış filtre çamuru katkılı numune vermiştir. En iyi sonucu veren bu orana %2,5, %5, %7,5, %10 oranlarında uçucu kül katkısı yapılarak serbest basınç değerlerine etkisi araştırılmıştır.

#### 4.3.4. KÇ+Yakılmış FÇ+UK numuneler

Çizelge 4.7. KÇ+Yakılmış FÇ+UK numunelerin serbest basınç deney sonuçları

Numune Adı	Kür süresi (gün)	Serbest basınç direnci (qu)(kPa)
Opt. Yak. FÇ+UK-2,5	0	214,980
	7	221,630
	28	227,535
	56	265,159
Opt. Yak. FÇ+UK-5	0	265,389
	7	273,478
	28	290,910
	56	310,770
Opt. Yak. FÇ+UK-7,5	0	289,032
	7	318,720
	28	373,351
	56	406,364
Opt. Yak. FÇ+UK-10	0	404,308
	7	407,125
	28	470,715
	56	499,996

KÇ+Yakılmış FÇ+UK numunelerin serbest basınç deney sonuçları Çizelge 4.7’ de verilmiştir. %75 kırmızı çamur ve %25 yakılmış filtre çamuru karışımına uçucu kül katkısı sonucunda serbest basınç direncinde, aynı oran içerisinde kür süresi arttıkça artış sağlanmıştır. Aynı kür süresinde ise uçucu kül oranı arttıkça serbest basınç direncinde artış görülmektedir. En iyi sonucu 56 günlük kür süresinde %10 uçucu kül katkılı numune vermiştir.

#### 4.3.5. KÇ+Yıkanmış FÇ numuneler

Çizelge 4.8. KÇ+Yıkanmış FÇ numunelerin serbest basınç deney sonuçları

Numune Adı	Kür süresi (gün)	Serbest basınç direnci (qu)(kPa)
Yık. FÇ-5	0	155,291
	7	164,960
	28	219,215
	56	268,530
Yık. FÇ-10	0	178,201
	7	203,739
	28	254,153
	56	319,367
Yık. FÇ-15	0	200,813
	7	229,295
	28	369,370
	56	396,052
Yık. FÇ-20	0	174,263
	7	203,162
	28	300,481
	56	337,904
Yık. FÇ-25	0	140,954
	7	196,720
	28	281,710
	56	323,437

KÇ+Yıkanmış FÇ numunelerin serbest basınç deney sonuçları Çizelge 4.8' de verilmiştir. Kırmızı çamura yıkanmış filtre çamuru katkısı sonucunda serbest basınç direncinde, aynı oran içerisinde kür süresi arttıkça artış sağlanmıştır. %5, %10, %15 yıkanmış filtre çamuru katkısı serbest basınç direncini kür süresinin de etkisiyle doğru orantılı olarak artırmıştır. En iyi sonucu 56 günlük kür süresinde %15 normal filtre çamuru katkılı numune vermiş, bu orandan sonra azalmaya başlamıştır. En iyi sonucu veren bu orana %2,5, %5, %7,5, %10 oranlarında uçucu kül katkısı yapılarak serbest basınç değerlerine etkisi araştırılmıştır.

#### 4.3.6. KÇ+Yıkanmış FÇ+UK numuneler

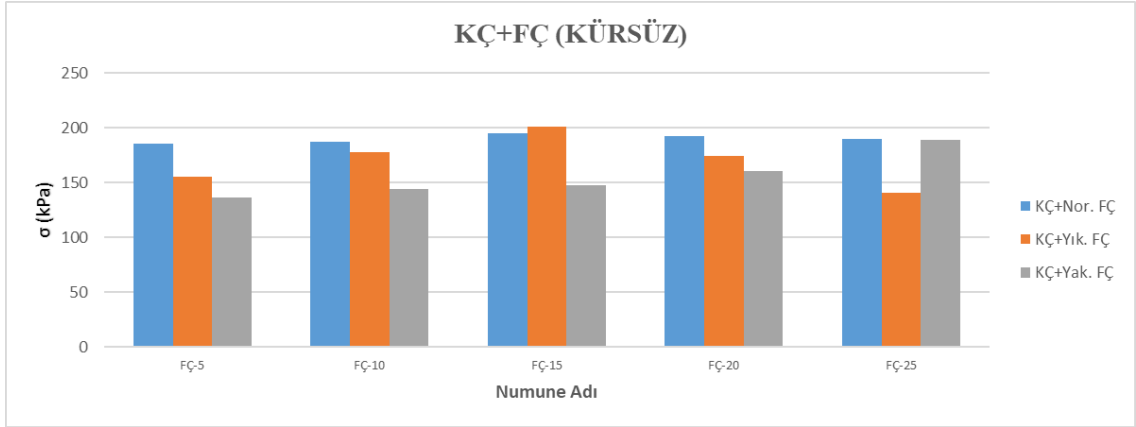
**Çizelge 4.9.** KÇ+Yıkanmış FÇ+UK numunelerin serbest basınç deney sonuçları

Numune Adı	Kür süresi (gün)	Serbest basınç direnci (qu)(kPa)
Opt. Yık. FÇ+UK-2,5	0	202,659
	7	302,251
	28	333,158
	56	355,786
Opt. Yık. FÇ+UK-5	0	220,174
	7	364,322
	28	377,862
	56	399,031
Opt. Yık. FÇ+UK-7,5	0	241,189
	7	400,925
	28	438,178
	56	474,343
Opt. Yık. FÇ+UK-10	0	338,116
	7	498,167
	28	576,944
	56	591,174

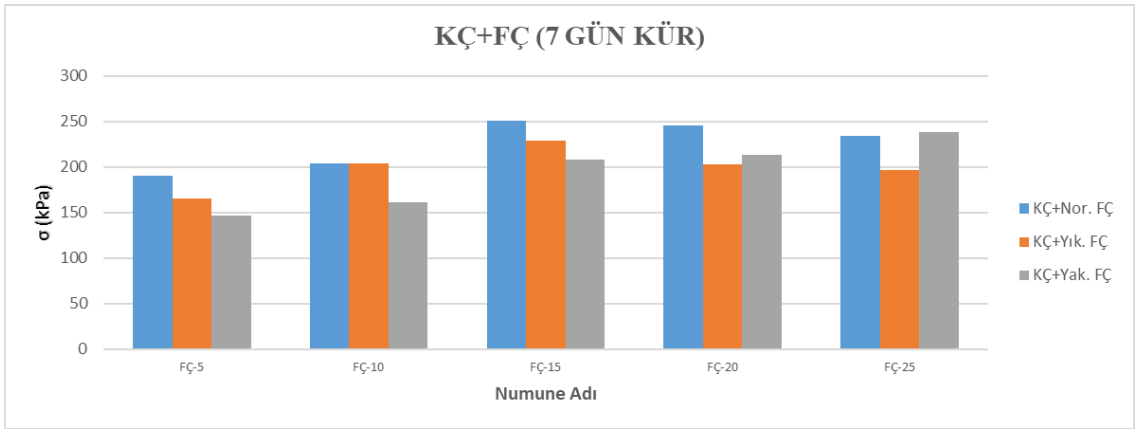
KÇ+Yıkanmış FÇ+UK numunelerin serbest basınç deney sonuçları Çizelge 4.9’ da verilmiştir. %85 kırmızı çamur ve %15 yıkanmış filtre çamuru karışımına uçucu kül katkısı sonucunda serbest basınç direncinde, aynı oran içerisinde kür süresi arttıkça artış sağlanmıştır. Aynı kür süresinde ise uçucu kül oranı arttıkça serbest basınç direncinde artış görülmektedir. En iyi sonucu 56 günlük kür süresinde %10 uçucu kül katkılı numune vermiştir.

#### 4.3.7. Genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

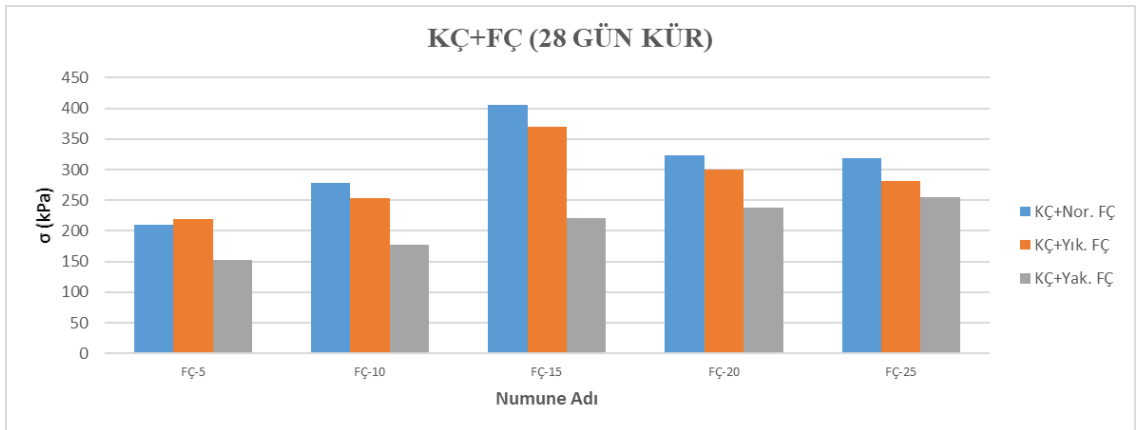
Kırmızı çamur, filtre çamuru ve uçucu külün karışım oranları, filtre çamurunun türü ve kür süresine göre serbest basınç değerlerinin genel karşılaştırmalı sütun grafikleri Şekil 4.5. - 4.22’ de verilmiştir.



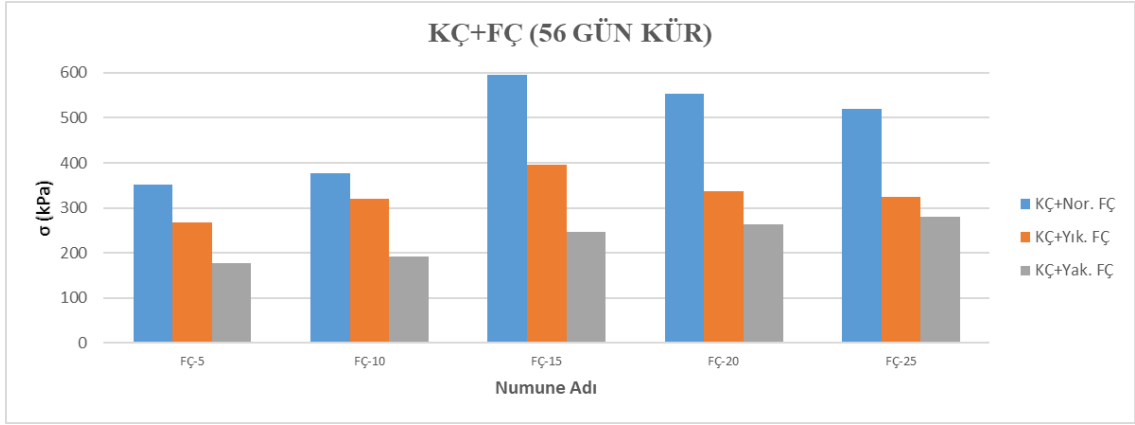
**Şekil 4.5.** KÇ+FÇ kürsüz numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



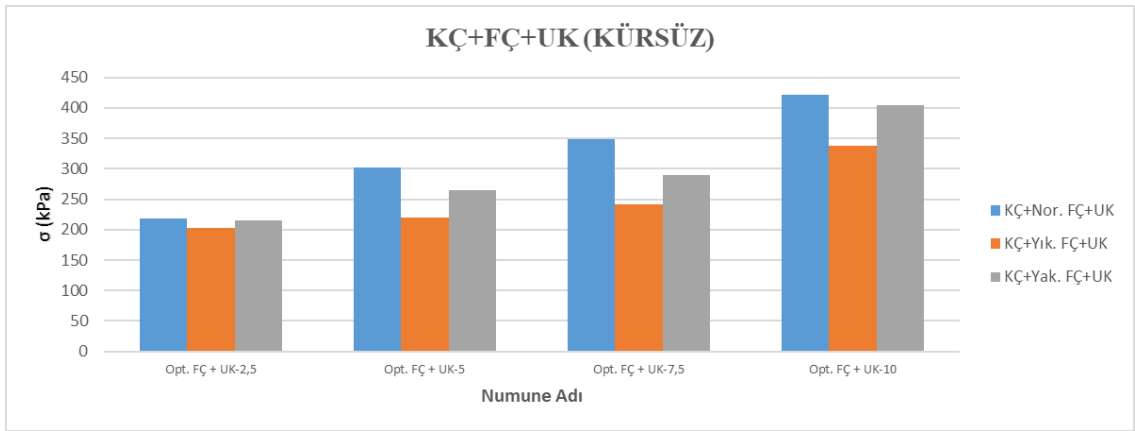
**Şekil 4.6.** KÇ+FÇ 7 günlük numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



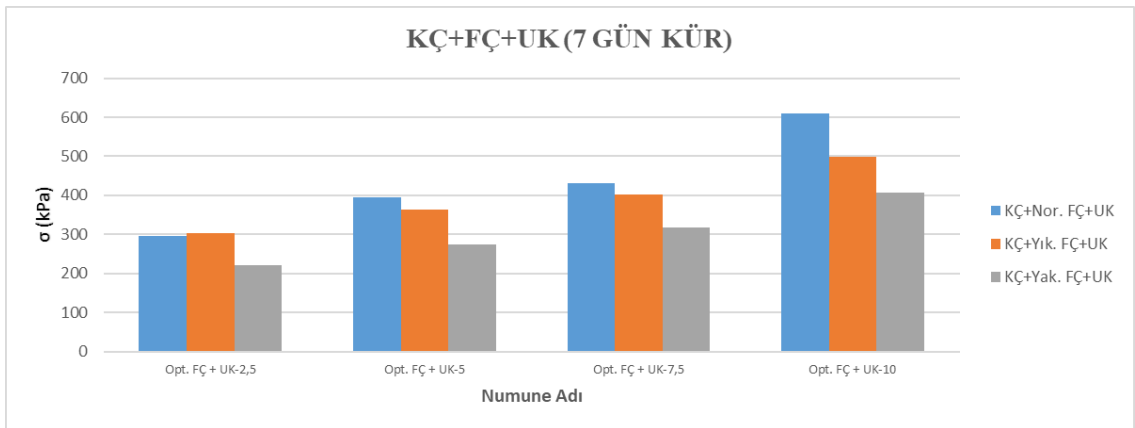
**Şekil 4.7.** KÇ+FÇ 28 günlük numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



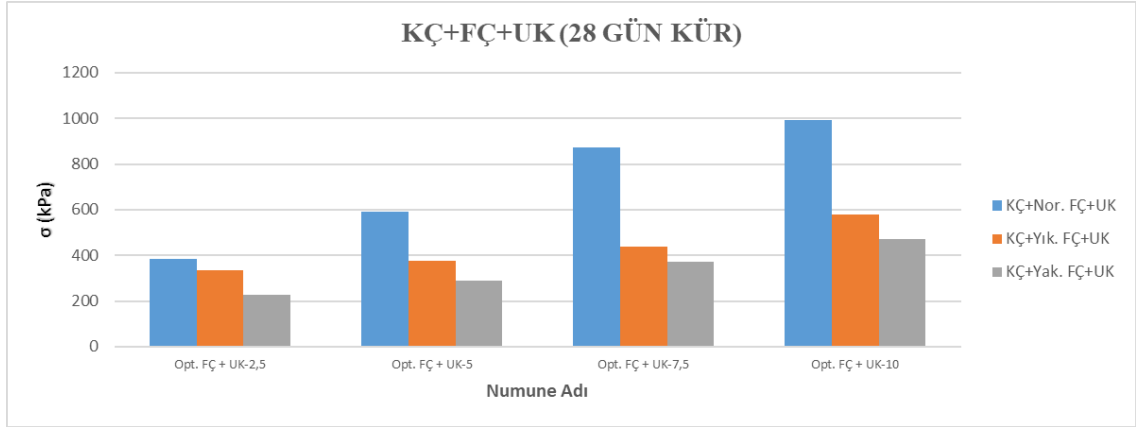
**Şekil 4.8.** KÇ+FÇ 56 günlük numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



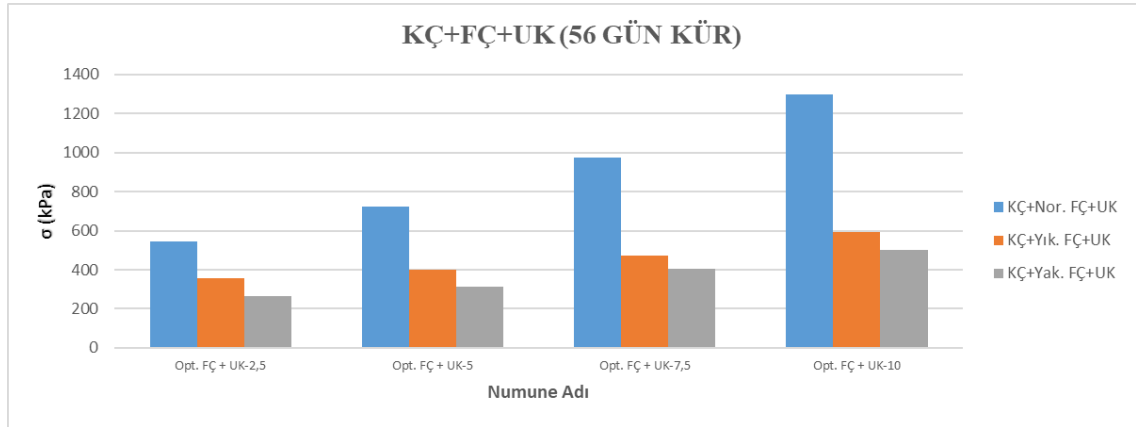
**Şekil 4.9.** KÇ+FÇ+UK kürsüz numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



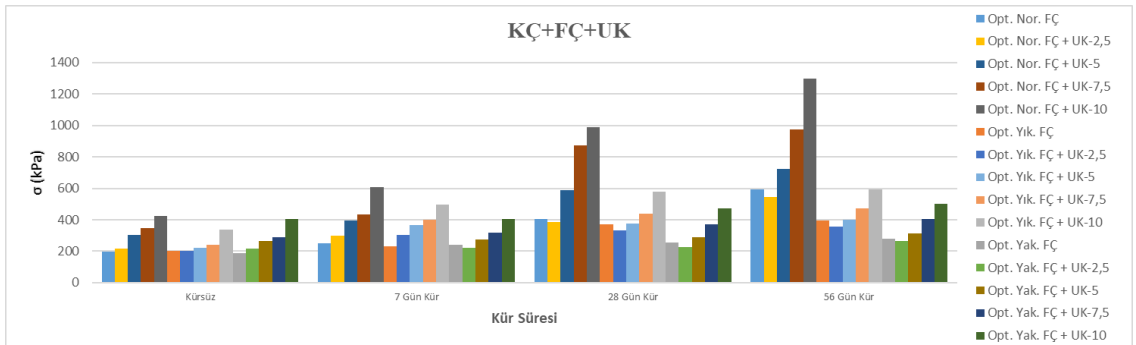
**Şekil 4.10.** KÇ+FÇ+UK 7 günlük numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



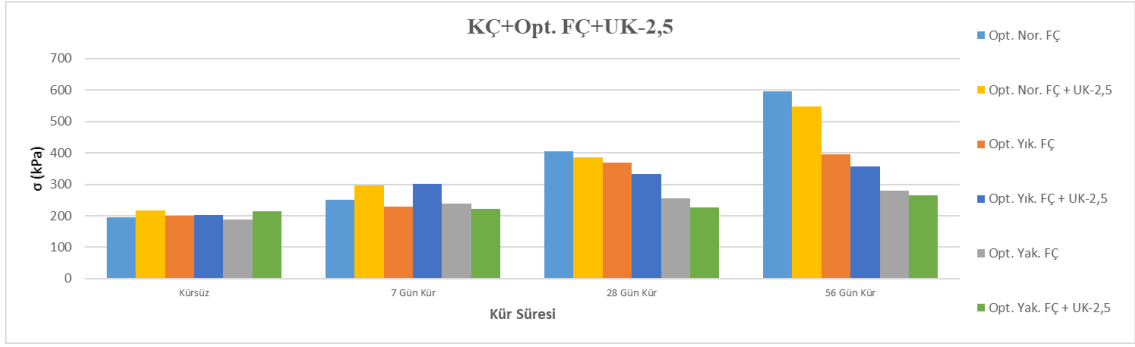
**Şekil 4.11.** KÇ+FÇ+UK 28 günlük numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



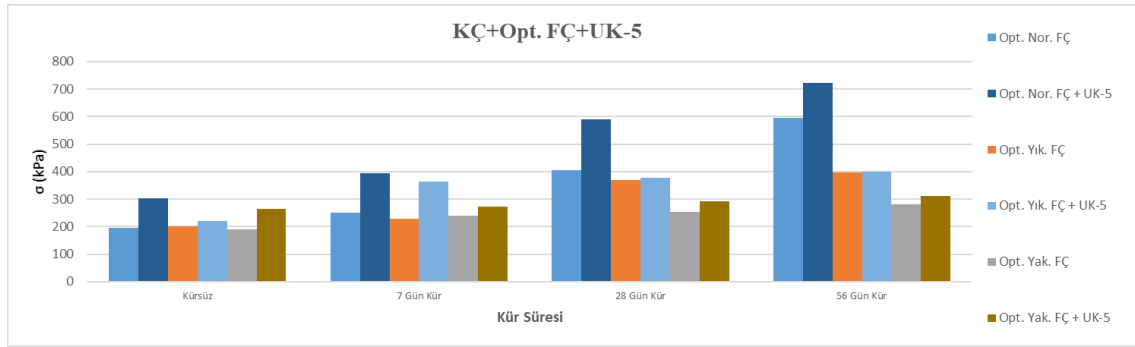
**Şekil 4.12.** KÇ+FÇ+UK 56 günlük numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



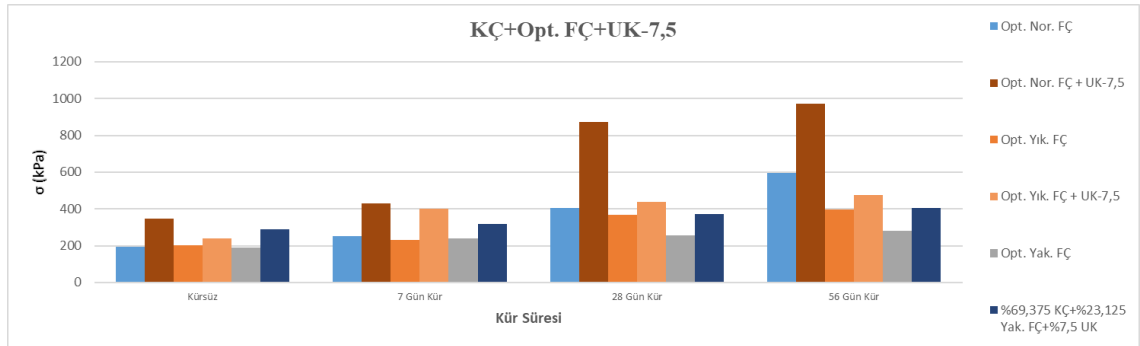
**Şekil 4.13.** KÇ+FÇ+UK numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



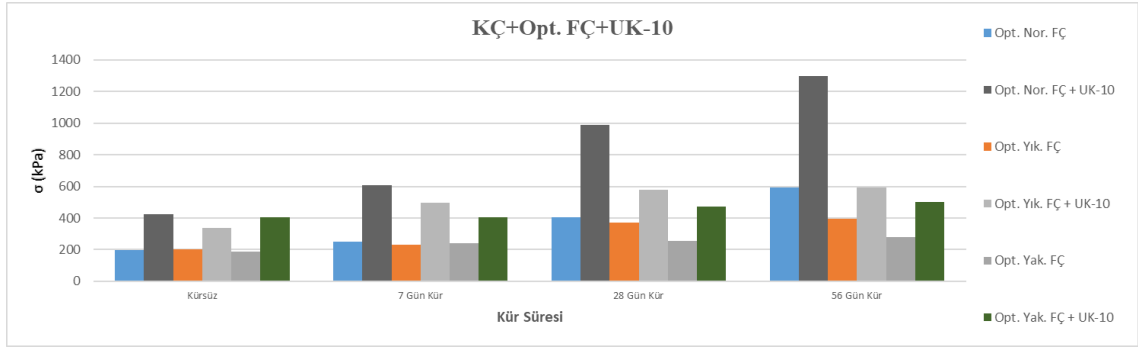
**Şekil 4.14.** KÇ+FÇ+%2,5 UK numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



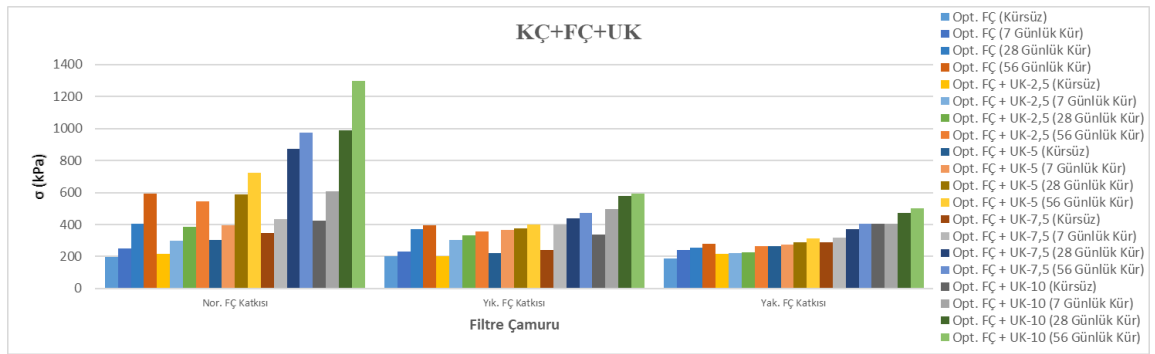
**Şekil 4.15.** KÇ+FÇ+%5 UK numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



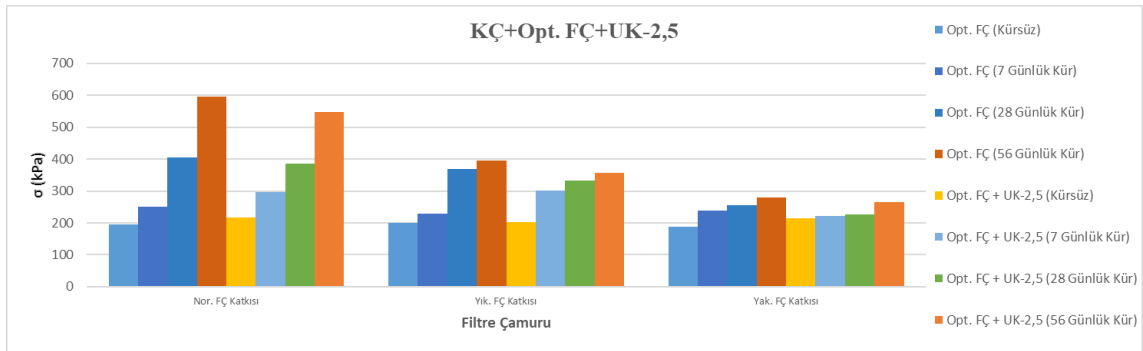
**Şekil 4.16.** KÇ+FÇ+%7,5 UK numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



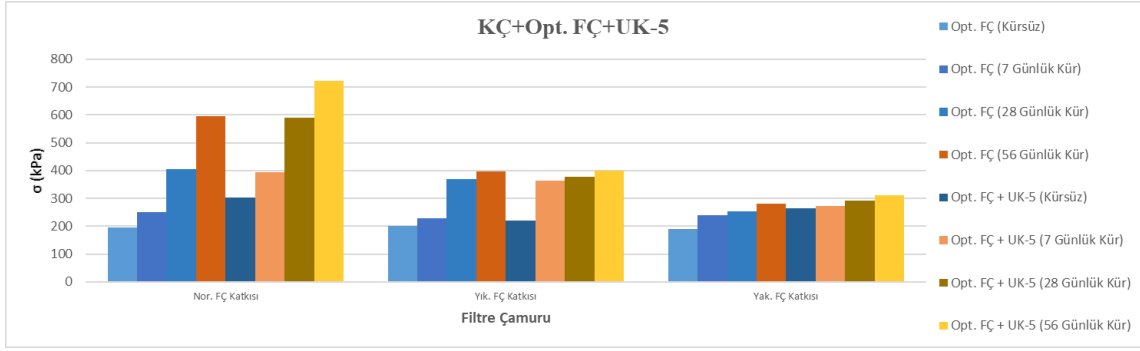
Şekil 4.17. KÇ+FÇ+%10 UK numunelerin genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



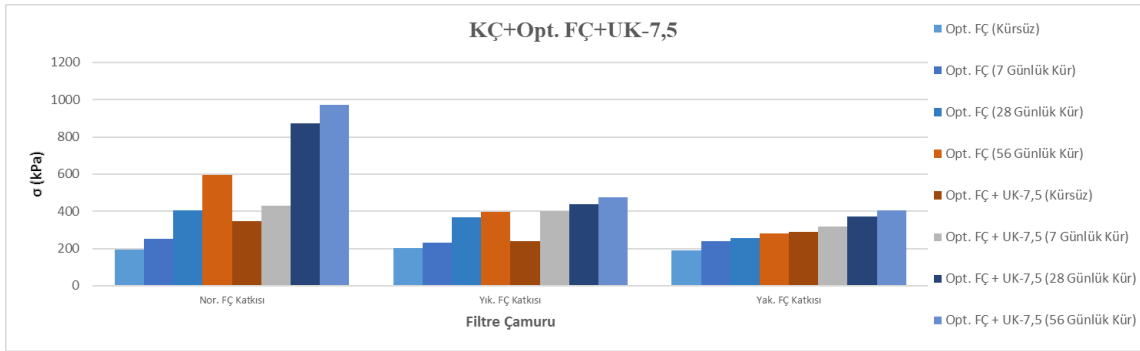
Şekil 4.18. KÇ+FÇ+UK numunelerin filtre çamurunun türüne genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



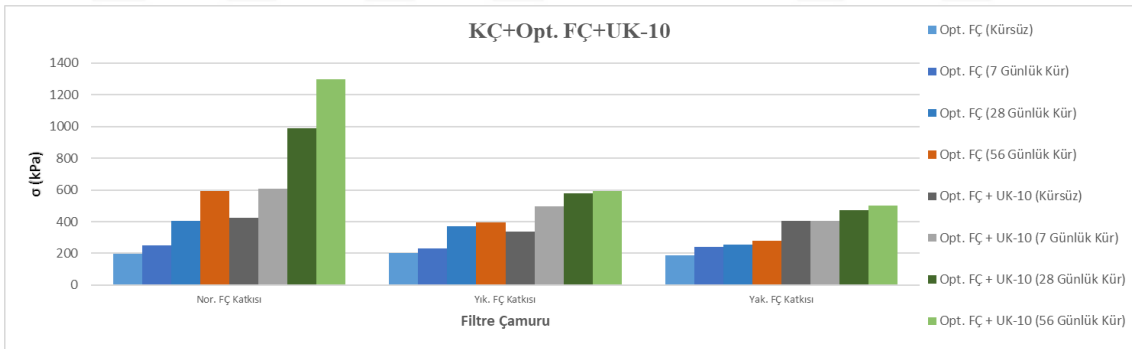
Şekil 4.19. KÇ+FÇ+%2,5 UK numunelerin filtre çamurunun türüne genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



Şekil 4.20. KÇ+FÇ+%5 UK numunelerin filtre çamurunun türüne genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



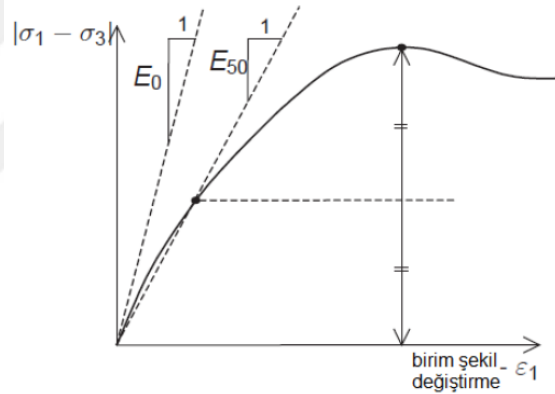
Şekil 4.21. KÇ+FÇ+%7,5 UK numunelerin filtre çamurunun türüne genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



Şekil 4.22. KÇ+FÇ+%10 UK numunelerin filtre çamurunun türüne genel karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

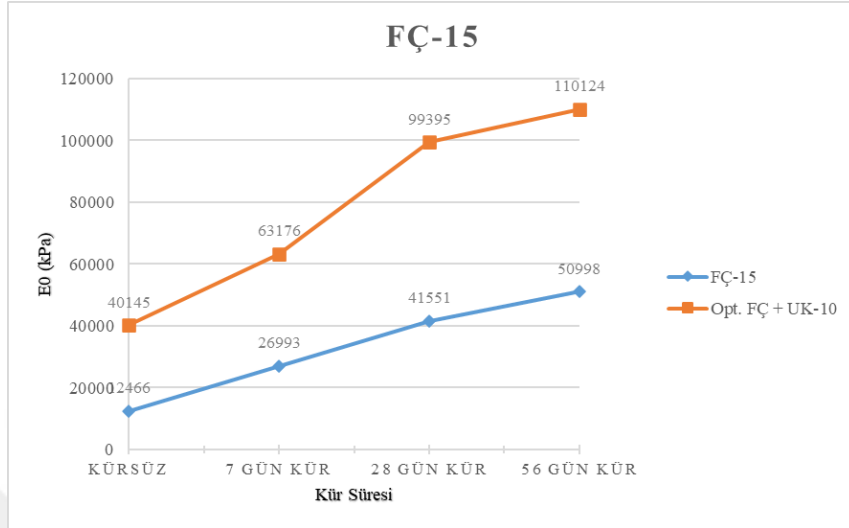
#### 4.3.8. Tanjant modülü ( $E_0$ ) ve sekant modülü ( $E_{50}$ ) değerleri

Zemin modelinde rijitliğin belirlenmesi için kullanılan başlangıç teğet deformasyon modülü (tanjant modülü ( $E_0$ )) ve %50 pik gerilme mertebesindeki sekant deformasyon modülü ( $E_{50}$ ) kullanılmaktadır. Bu değerler serbest basınç deney grafiklerinden alınabilmektedir. Tanjant modülü, gerilme-deformasyon eğrisinin başlangıcındaki teğetin eğimidir. Çok küçük şekil değiştirmelerde zeminin ilk rijitliğini gösterir. Zeminin yapısını henüz bozmadığı için genellikle en büyük modül değeridir. Oturma gibi küçük deformasyon analizlerinde önemlidir. Sekant deformasyon modülü ise zeminin maksimum gerilmesinin %50' sine ulaştığı noktanın başlangıç noktasına göre eğimidir. Sonlu elemanlar gibi sayısal analizlerde zeminin gerçek davranışını temsil etmek için tercih edilir. Zemine ait örnek gerilme deformasyon grafiğinde tanjant ve sekant modülleri Şekil 4.23' te verilmiştir. Grafiğe göre tanjant modülü, sekant modülünden daha yüksek çıkmaktadır.

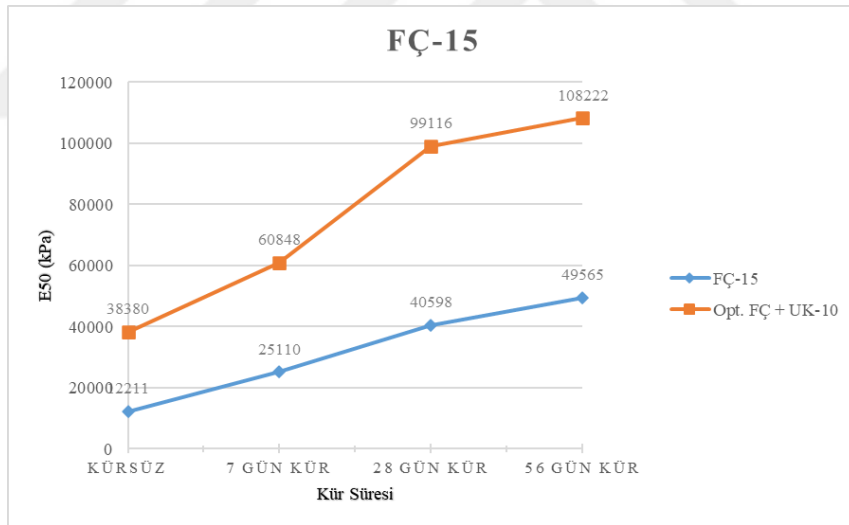


Şekil 4.23. Örnek gerilme-deformasyon grafiği ve  $E_0 - E_{50}$  eğimleri

Serbest basınç deneyinde optimum sonuçları veren FÇ-15 ve Opt. FÇ+UK-10 karışım numunelerine ait tespit edilen  $E_0$  ve  $E_{50}$  değerleri Şekil 4.24 ve 4.25’ te verilmiştir.



Şekil 4.24. FÇ-15 ve Opt. FÇ+UK-10 numunelerinin kır süresine göre  $E_0$  değişimi



Şekil 4.25. FÇ-15 ve Opt. FÇ+UK-10 numunelerinin kır süresine göre  $E_{50}$  değişimi

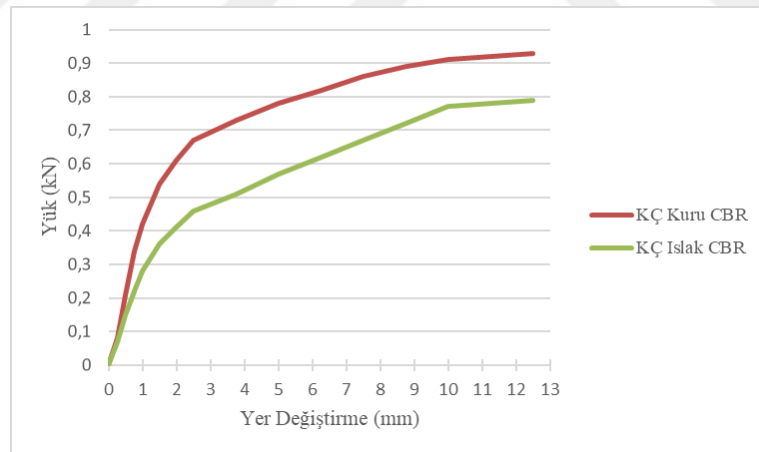
Şekil 4.24 ve 4.25’ e göre Opt. FÇ+UK-10 numunesindeki  $E_0$  ve  $E_{50}$  değerleri FÇ-15 numunesine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kır süresinin etkisiyle her iki numunede de  $E_0$  ve  $E_{50}$  değerlerinde artış yaşanmıştır.

#### 4.4. CBR Testi Sonuçları

CBR deneyi sonucunda belirlenen yük-şekil değiştirme grafiğine göre CBR değeri, 2,5 mm ve 5 mm yer değiştirmelere karşılık gelen yük değerleri alınarak Eşitlik 4.1' deki gibi hesaplanmıştır. ASTM D1883' ten referans yüklerin de alınmasıyla 2,5 mm ve 5 mm yer değiştirme için belirlenen CBR değerlerinden büyük olanı numuneye ait CBR değeri olarak belirlenmiştir.

$$CBR (\%) = \frac{\text{Ölçülen yük (kN)}}{\text{Referans yük (kN)}} \times 100 \quad (4.1)$$

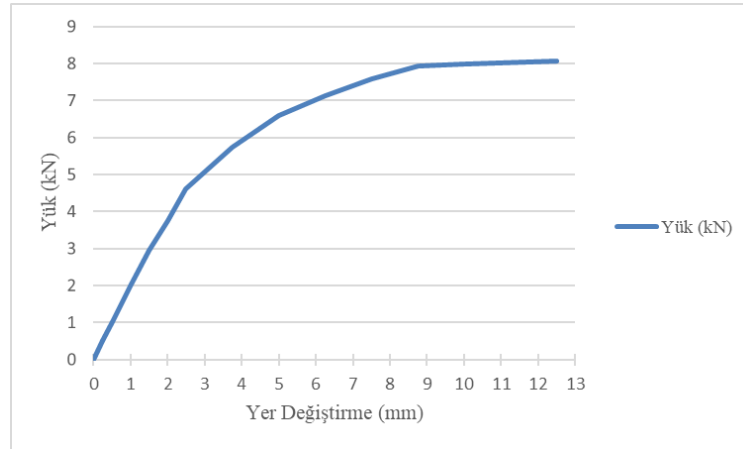
Kırmızı çamur numunesi üzerinde hem kuru hem de ıslak CBR deneyleri yapılmıştır. Hem kuru hem de ıslak CBR deneylerinden elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 4.26' da verilmiştir. Kuru CBR deneyi sonucunda kuru CBR değeri %5,02 bulunmuştur. CBR numunesinin 4 gün suda bekletilmesiyle şişme değeri %5,5 olarak ölçülmüştür. Islak CBR deneyi sonucunda CBR değeri %3,9 bulunmuştur. Islak CBR deneyinde bir miktar şişme, dayanımda ise azalma meydana gelmiştir. Bu sebeple stabilize edilmiş numunede ıslak CBR deneyi yapmak daha uygun olacaktır.



Şekil 4.26. Kırmızı çamura ait ıslak-kuru CBR değerleri için yük-yer değiştirme grafiği

Serbest basınç deneyleri sonucunda optimum sonucu veren Opt. FÇ+UK-10 numunesi üzerinde CBR deneyi yapılmıştır. 56 günlük kür süresi sonrasında numune 4 gün suda bekletildi ve bu işlem sırasında numunede herhangi bir şişme gözlemlenmedi. Bu durumun sebebi olarak kırmızı çamurun katkı maddelerinin eklenmesiyle kür süresine bağlı olarak mukavemet kazanması gösterilebilir.

CBR numunesine yapılan yükleme aşamasında oluşan yük-yer değıştirme grafiği Şekil 4.27' de verilmiştir.



Şekil 4.27. Opt. FÇ+UK-10 numunesinin 56 günlük kür sonrasında yük-yer değıştirme grafiği

Kırmızı çamura saf halde filtre çamuru ve uçucu kül eklenmesi sonucunda numunede en fazla 12,5 mm yer değıştirme gözlemlenmiştir. Ayrıca numunenin CBR değeri %34,63 olarak hesaplanmıştır. KGM Karayolu Teknik Şartnamesi' ne göre iyileştirilmiş dolgu toprakları için kuru CBR değeri %15' ten büyük, CBR şişme değeri ise %2' den küçük olmalıdır. Numunede hesaplanan CBR değerinin bu standartın üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Numunede şişme meydana gelmediği için standartta belirtilen şişme sınırının altında kalmaktadır. Opt. FÇ+UK-10 numunesi, KGM Karayolu Teknik Şartnamesi' ne göre uygun bir dolgu malzemesidir (Çizelge 4.10.).

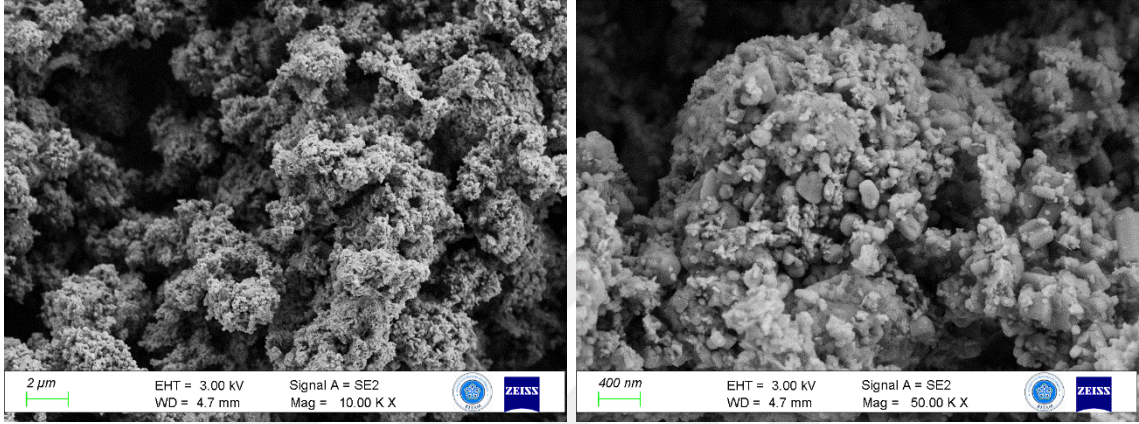
Çizelge 4.10. CBR ve şişme değerleri için özet tablo

Oran	Malzeme	Değer (%)	KGM Teknik Şartname Sınırları
CBR şişme oranı (%)	Kırmızı çamur	5,5	<%2
	Opt. FÇ+UK-10	0	
Kuru CBR (%)	Kırmızı çamur	5,02	>%15
	Opt. FÇ+UK-10	-	
Islak CBR (%)	Kırmızı çamur	3,9	>%15
	Opt. FÇ+UK-10	34,63	

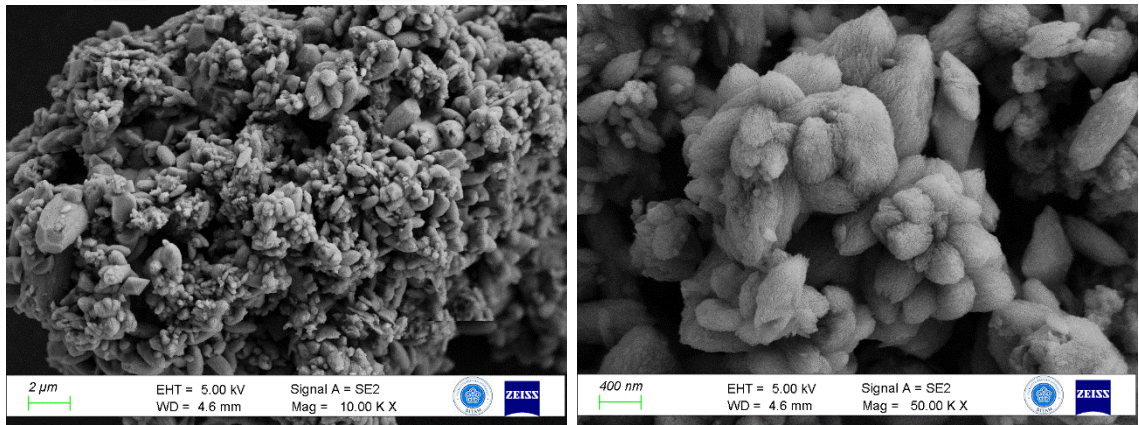
## 4.5. Mikroyapı Test Sonuçları

### 4.5.1. SEM analizi sonuçları

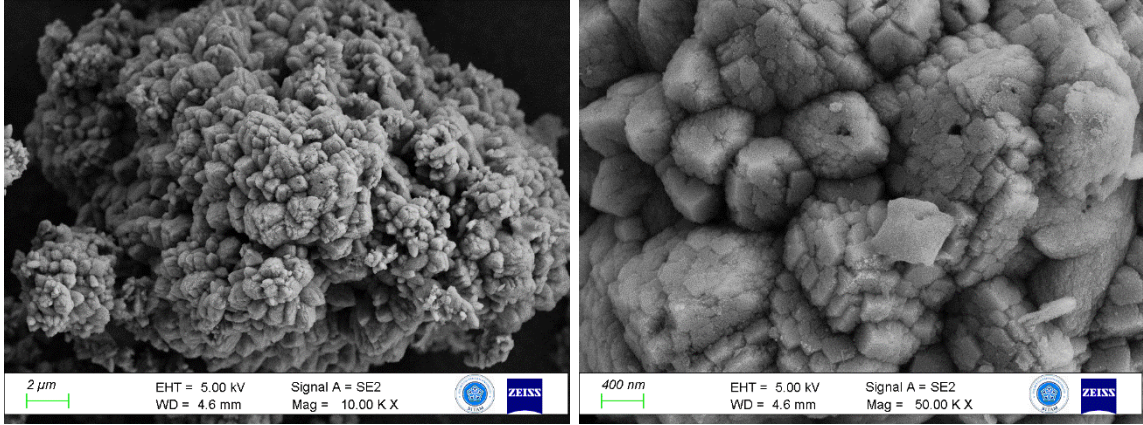
SEM analizi sonucunda kırmızı çamur, normal filtre çamuru, yakılmış filtre çamuru ve yıkanmış filtre çamuru numunelerine ait 10.000 ve 50.000 kat büyütülmüş olarak elde edilen görüntüler Şekil 4.28, 4.29, 4.30 ve 4.31' de verilmiştir.



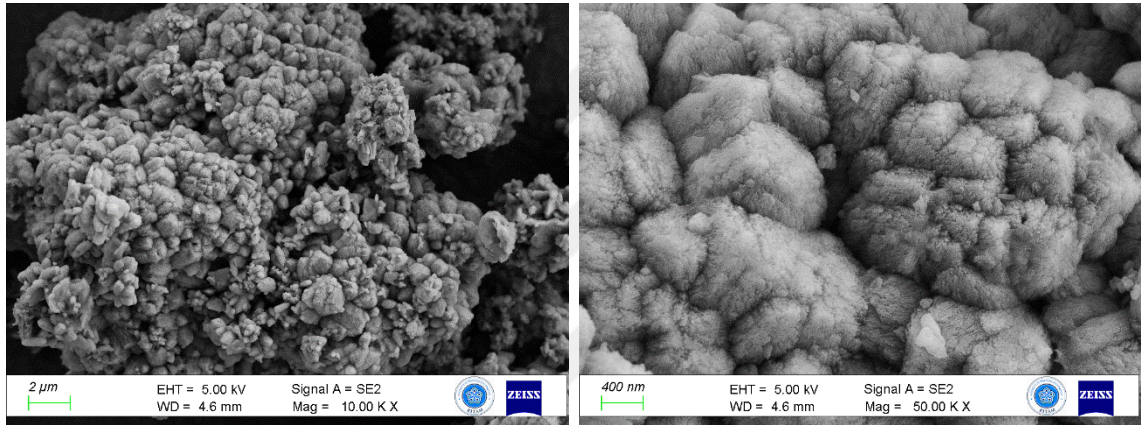
Şekil 4.28. Kırmızı çamur 10.000 kat (solda) ve 50.000 kat (sağda) büyütülmüş SEM görüntüleri



Şekil 4.29. Normal filtre çamuru 10.000 kat (solda) ve 50.000 kat (sağda) büyütülmüş SEM görüntüleri



**Şekil 4.30.** Yakılmış filtre çamuru 10.000 kat (solda) ve 50.000 kat (sağda) büyütülmüş SEM görüntüleri



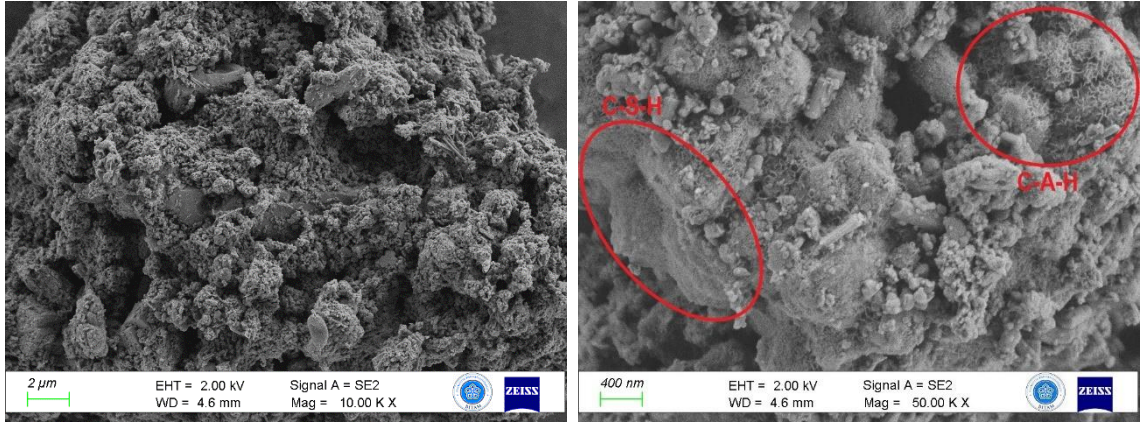
**Şekil 4.31.** Yıkanmış filtre çamuru 10.000 kat (solda) ve 50.000 kat (sağda) büyütülmüş SEM görüntüleri

Şekil 4.28' e göre kırmızı çamur numunesi genellikle küçük, düzensiz şekilli ve kümelenmiş taneciklerden oluşmaktadır. Filtre çamurunun üç formu ise pürüzlü, düzensiz ve bol gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ancak normal filtre çamurunda görünen tüylü yapı yıkama işlemi yapılmasıyla az, yakma işleminin yapılmasıyla ise büyük oranda kaybolduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.29, 4.30 ve 4.31)

Filtre çamuru ve uçucu kül ile stabilize edilmiş kırmızı çamur (Opt. FÇ+UK-10) numunesine ait 10.000 ve 50.000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri Şekil 4.32' de verilmiştir.

Kırmızı çamurun filtre çamuru ve uçucu kül ile stabilizasyonu sırasında, kalsiyum silikat hidrat (CSH) ve kalsiyum alüminat hidrat (CAH) fazlarının oluşumu beklenmektedir. Bu kapsamda CaO'nun silika ve suyla reaksiyonu sonucunda CSH meydana gelirken, alümin ve suyla girdiği tepkime sonucunda ortaya çıkan CAH fazları

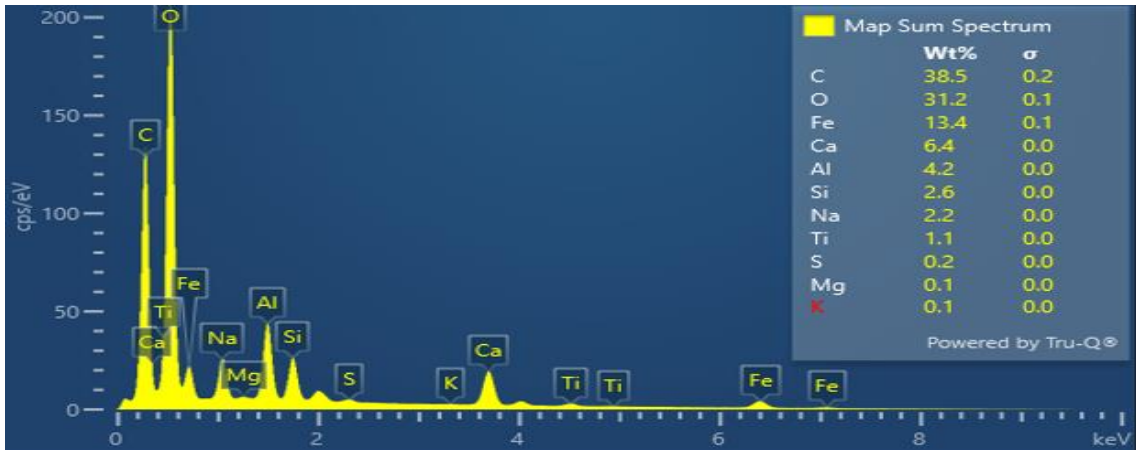
SEM analizlerinde şerit benzeri, levhamsı veya ince uzun prizmatik morfolojik yapılar sergilemektedir.



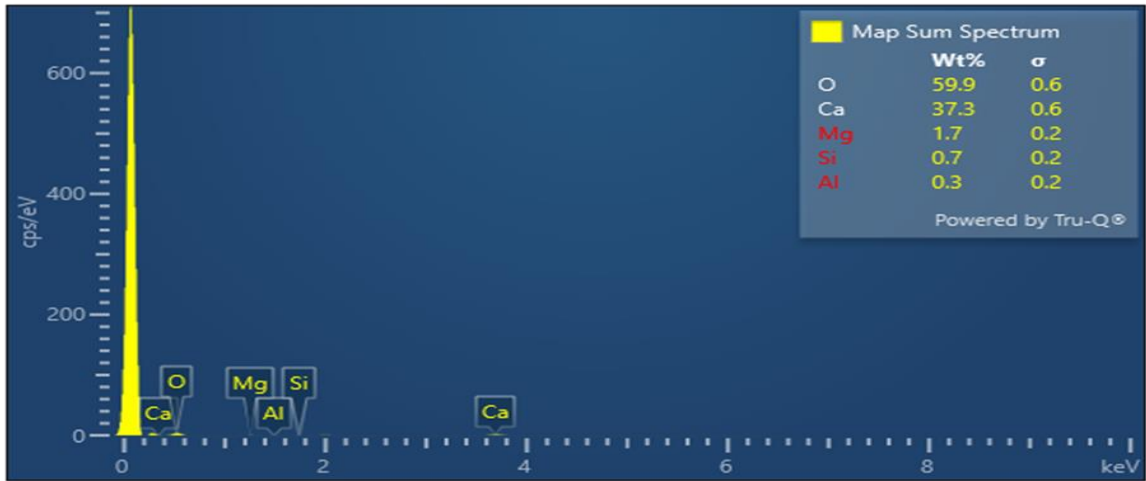
Şekil 4.32. Stabilize edilmiş kırmızı çamura (Opt. FÇ+UK-10) ait 10.000 kat (solda) ve 50.000 kat (sağda) büyütülmüş SEM görüntüleri

#### 4.5.2. EDX analizi sonuçları

EDX analizi sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.33, 4.34, 4.35, 4.36 ve 4.37' de verilmiştir.



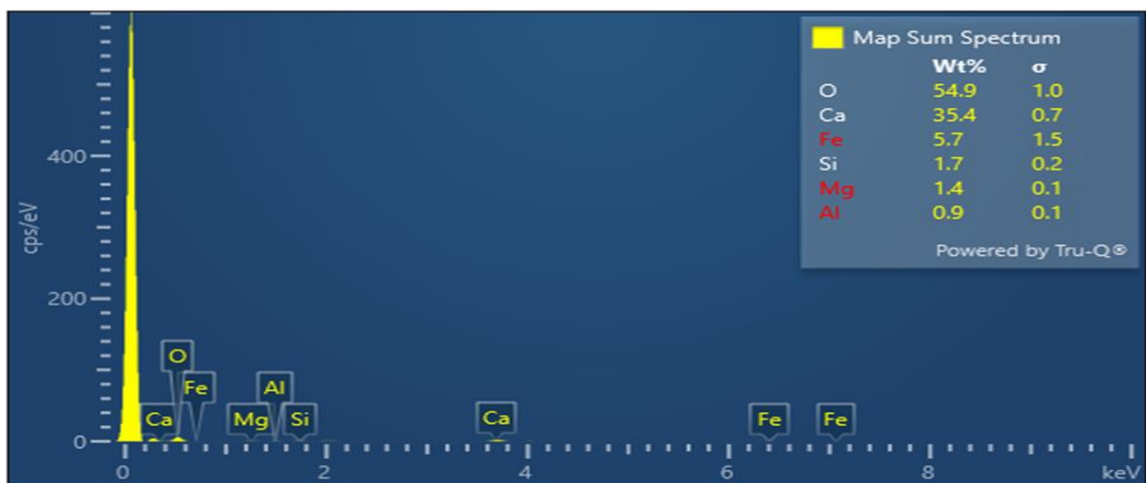
Şekil 4.33. Kırmızı çamur EDX grafiği



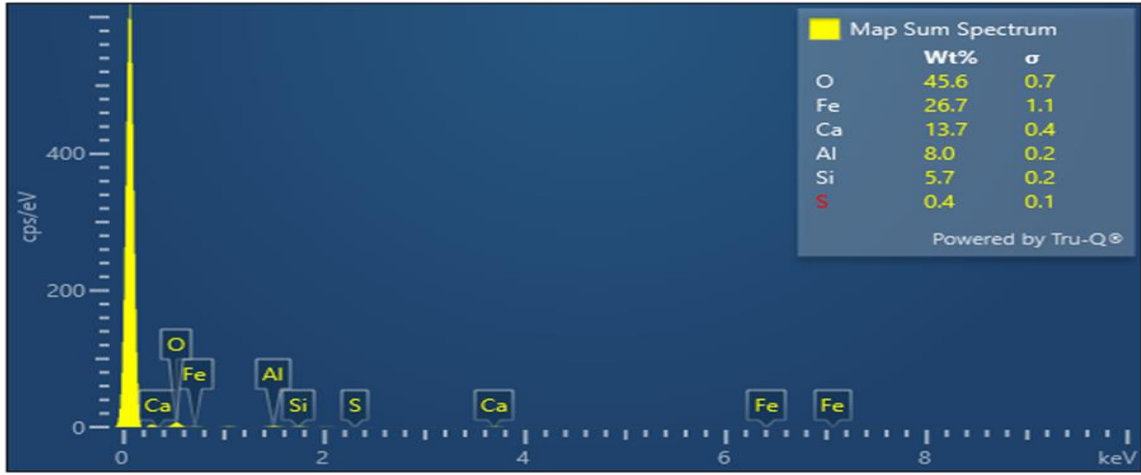
Şekil 4.34. Normal filtre çamuru EDX grafiği



Şekil 4.35. Yakılmış filtre çamuru EDX grafiği



Şekil 4.36. Yıkılmış filtre çamuru EDX grafiği

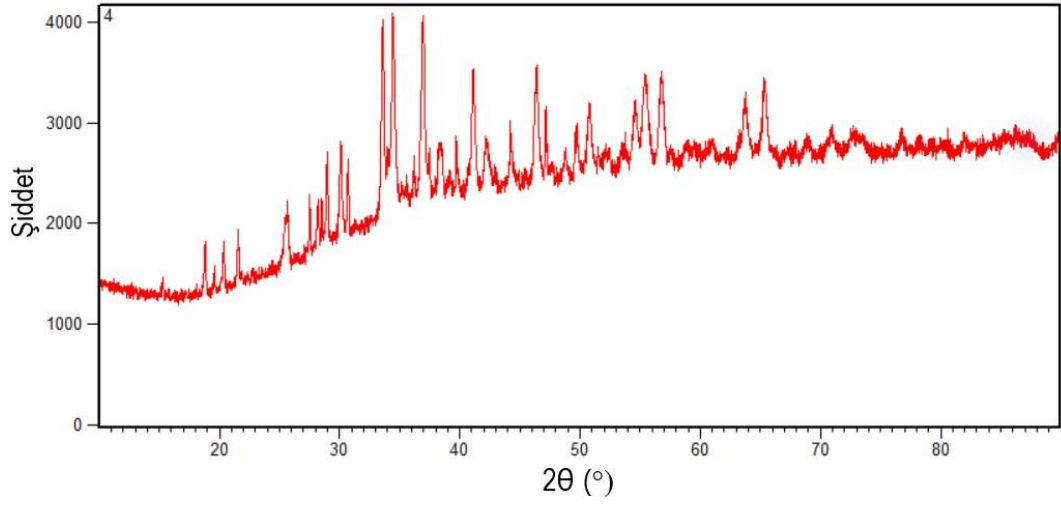


Şekil 4.37. Stabilize edilmiş kırmızı çamur (Opt. FÇ+UK-10) EDX grafiği

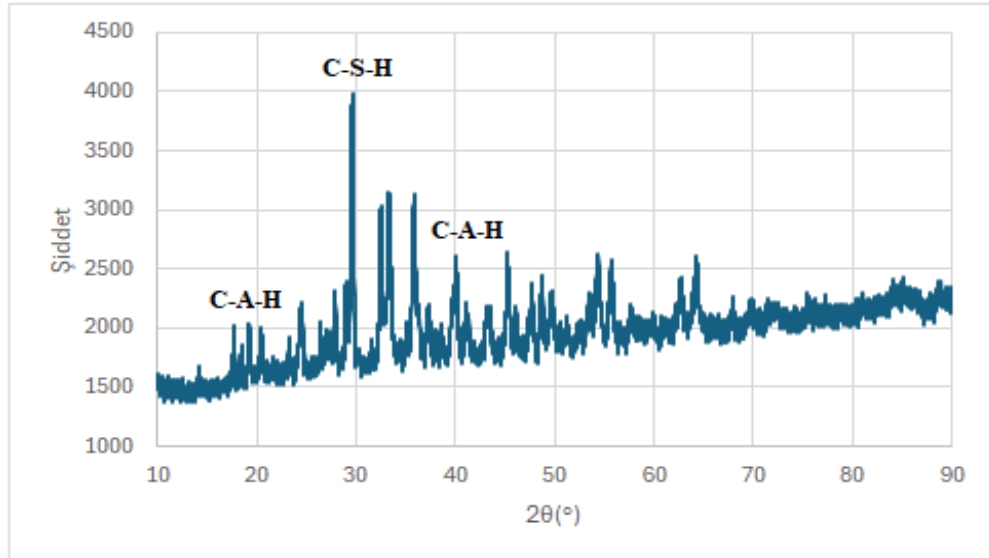
EDX analiz sonuçları ile filtre çamuru ve uçucu kül ile stabilize edilmiş kırmızı çamurun (Opt. FÇ+UK-10) kimyasal kompozisyonu incelenmiştir. Ham kırmızı çamurda yüksek demir (%13,4 Fe) ve düşük kalsiyum (%6,4 Ca) içeriği baskınken, stabilize edilen kırmızı çamur numunesinde kalsiyum oranının %10,76' ya yükselmesi ve oksijen miktarında artış gözlemlenmiştir. Bu durum puzolanik reaksiyonların gerçekleştiğinin kanıtlarından biri olarak gösterilebilir. Bu kimyasal değişim, kalsiyumun silika ve alümina ile birleşerek SEM görüntüsünde gözlemlenen şerit veya levhamsı yapıdaki C-S-H ve C-A-H bağlayıcı jellerini oluşturmasını sağlamıştır. Böylece malzemenin mikroyapısal stabilitesi artırılmıştır. Filtre çamurunun üç formunda da oksijen, kalsiyum, silisyum, magnezyum ve alüminyum elementleri baskınken yakma ve yıkama işlemleriyle bu elementlerin oranlarında gözle görülür bir değişim gözlemlenmemiştir.

#### 4.5.3. XRD analizi sonuçları

Filtre çamuru ve uçucu kül ile stabilize edilmiş kırmızı çamurun kristal yapısını incelemek için XRD analizi yapılmıştır. Bu analizde, malzemeye X-ışınları yönlendirilmiş ve kristal yapıya özgü bir kırınım deseni elde edilmiştir. Bu desen, malzemenin yapısal özelliklerinin belirlenmesine olanak tanır. Bu ham kırmızı çamur ve stabilize edilmiş kırmızı çamurun XRD deseni Şekil 4.38 ve 4.39' da gösterilmiştir. XRD analizinde, puzolanik reaksiyon sonucunda oluşan C-S-H (Kalsiyum Silika Hidrat) ve C-A-H (Kalsiyum Alümina Hidrat) gibi ürünler gözlemlenmiştir.



Şekil 4.38. Kırmızı çamur XRD grafiği



Şekil 4.39. Stabilize edilmiş kırmızı çamur (Opt. FÇ+UK-10) XRD grafiği

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Endüstriyel atıklarda meydana gelen artış; endüstriyel atıklarla ilgili taşıma, depolama maliyetleri, çevre kirliliği gibi sorunlar ortaya çıkarmaya başlamıştır. Bunun için endüstride üretim atıkları incelenerek güvenli, sağlıklı ve ekonomik bir şekilde geri dönüştürülmesi veya kullanılması gerekmektedir. Atık malzemelerin yeniden değerlendirilmesi konusu son zamanlarda büyük ilgi görmektedir. Atıkların geri dönüştürülmesi veya kullanılması ile ilgili yapılan çalışmalara göre, atıklar tek başlarına ya da ana malzemeye kısmen karıştırılarak kullanılabilir. Ayrıca atık malzemeler başka atıklar ile beraber kullanılarak mühendislik problemlerine çözüm bulunabilmektedir. Atık malzemeler bu yollarla farklı sektörlerde değerlendirilerek hem atık malzemelerin oluşturduğu problemlerin önüne geçilebileceği hem de birçok alanda problemlere çözüm olabileceği yapılan araştırmalarla görülmektedir.

Kırmızı çamur, yüksek baziklik özelliği nedeniyle çevresel açıdan zararlı olup kullanım alanı kısıtlıdır. Filtre çamuru ise bünyesinde bulunan organik maddeler nedeniyle zamanla lokal çürümelere ve küf oluşumuna neden olduğundan yol dolgusu için uygun bir dolgu malzeme değildir. Kırmızı çamurun dezavantajları, uygun malzeme ile stabilize edilerek giderilebilir. Bu yüzden yapılan çalışmayla her iki atığın dezavantajlarını dengelemek ve birlikte değerlendirilerek kullanımlarını mümkün kılmak amaçlanmıştır. Ana malzemeye filtre çamuru katkısıyla yapılan iyileştirme çalışmaları oldukça sınırlıdır ve bu çalışma, filtre çamuruyla ilgili yapılacak başka çalışmalara da yol gösterecektir.

Kırmızı çamur atığına filtre çamuru ve uçucu kül eklenmesiyle zeminin yol dolgusunun kullanılabilirliğinin araştırılmasıyla ilgili yapılan bu çalışmada kapsamlı deneyler yapılmıştır. Öncelikle çalışmada kullanılacak malzemelerin tane boyutları ve kıvam limitlerini bulmak için ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Ardından kırmızı çamura ilave edilecek filtre çamurunun maksimum oranının bulunması için ön çalışmalar yapılmıştır. Filtre çamurunun saf, yıkanmış ve yakılmış halleri, kırmızı çamura belli oranlarda karıştırılmıştır. En uygun serbest basınç direnci sonuçlarını veren karışımlara uçucu kül katkısıyla iyileştirme yapılmıştır. Bütün numuneler için 0-7-28-56 günlük kürler uygulanmıştır. Her karışım ve kür süreleri için en az üçer numune hazırlanmıştır. Böylece çalışma boyunca toplamda 324 adet serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir.

En uygun serbest basınç direnç değerinin veren numune üzerinde CBR ve mikrokimyasal analizler yapılmıştır. Deneylerin sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

### 5.1. Sonuçlar

1. İndeks deneyleri sonucunda filtre çamuruna ait likit limit değeri %55, plastik limit değeri %50 bulunarak plastisite indis değeri %5 olarak tespit edilmiştir. Zemin sınıfı USCS sistemine göre MH (yüksek plastisiteli silt), AASHTO sistemine göre A-5 (17) (siltli zemin) olarak tespit edilmiştir. Ayrıca kırmızı çamura ait likit limit değeri %41,5, plastik limit değeri %38 bulunarak plastisite indis değeri %3,5 olarak tespit edilmiştir. Zemin sınıfı USCS sistemine göre ML (düşük plastisiteli silt), AASHTO sistemine göre A-5 (12) (siltli zemin) olarak tespit edilmiştir.
2. Kırmızı çamura yapılan standart kompaksiyon deneyi sonucunda maksimum kuru yoğunluk  $1,41 \text{ g/cm}^3$  ve optimum su içeriği %34 olarak tespit edilmiştir.
3. Yapılan elek analizi ve hidrometre deneyi sonuçlarına göre normal filtre çamuru numunesinin %2' si kum, %86,44' ü silt, %11,56' sı kil; yakılmış filtre çamuru numunesinin %8' i kum, %84,79' u silt, %7,21' i kil; yıkanmış filtre çamuru numunesinin %25,6' sı kum, %67,1' i silt, %7,3' ü kil; kırmızı çamur numunesinin %6' sı kum, %89,43' ü silt, %4,57' si kil; uçucu kül numunesinin %8' i kum, %74,77' si silt, %17,23' ü kil olarak tespit edilmiştir.
4. Serbest basınç deney sonuçlarına göre:
  - Kırmızı çamura filtre çamurunun saf, yıkanmış ve yakılmış halleri ilave edildiğinde kür uygulanmamış durumda, serbest basınç dirençlerinde kırmızı çamurun saf haline göre artış sağlanamamıştır. Filtre çamuruyla birlikte uçucu kül ilave edildiğinde ise filtre çamurunun üç halinde de %5 uçucu kül katkısı ve sonrasında ancak artış sağlanabilmiştir.
  - Kırmızı çamura saf halde filtre çamuru ilave edilmesiyle 7 günlük kür süresine kadar filtre çamuru oranlarının değişimi serbest basınç dirençlerinde yeterince değişikliğe sebep olmamıştır. 7 günlük kür sonrasında %15 filtre çamuru katkılı numune optimum değeri vermiş, 56 günlük kür süresinde en yüksek serbest basınç direnci değerleri tespit edilmiştir. 56 günlük kür sonucunda serbest basınç değerinde %204,5 artış gerçekleşmiştir.

- Kırmızı çamur ve saf filtre çamuru karışımından optimum sonucu veren %85 KÇ+%15 FÇ karışımına uçucu kül ilave edilmesiyle kür süresi ve uçucu kül oranı arttıkça serbest basınç değerlerinde de artış gözlenmiştir. Böylece en yüksek serbest basınç direnci değerini 56 günlük kür süresinde %10 uçucu kül katkılı numune vermiştir. %85 KÇ+%15 FÇ karışımına %10 uçucu kül ilavesiyle 56 günlük dayanımda %118,4 artış gerçekleşmiştir.

- Kırmızı çamura yakılmış filtre çamuru ilave edilmesiyle kür süresi ve filtre çamuru oranı arttıkça serbest basınç direnci değerinde artış gözlenmiştir. Böylece %25 yakılmış filtre çamuru katkılı karışım 56 günlük kür süresinde en yüksek serbest basınç direnci değerleri göstermiştir. 56 günlük kür sonucunda serbest basınç değerinde %48,2 artış gerçekleşmiştir.

- Kırmızı çamur ve yakılmış filtre çamuru karışımından optimum sonucu veren %75 KÇ+%25 FÇ karışımına uçucu kül ilave edilmesiyle kür süresi ve uçucu kül oranı arttıkça serbest basınç değerlerinde de artış gözlenmiştir. Böylece en yüksek serbest basınç direnci değerini 56 günlük kür süresinde %10 uçucu kül katkılı numune vermiştir. %85 KÇ+%25 FÇ karışımına %10 uçucu kül ilavesiyle 56 günlük dayanımda %78,6 artış gerçekleşmiştir.

- Kırmızı çamura yıkanmış filtre çamuru ilave edilmesiyle 7 günlük kür süresine kadar filtre çamuru oranlarının değişimi serbest basınç dirençlerinde yeterince değişikliğe sebep olmamıştır. 7 günlük kür sonrasında %15 filtre çamuru katkılı numune optimum değeri vermiş, 56 günlük kür süresinde en yüksek serbest basınç direnci değerleri tespit edilmiştir. 56 günlük kür sonucunda serbest basınç değerinde %97,3 artış gerçekleşmiştir.

- Kırmızı çamur ve yıkanmış filtre çamuru karışımından optimum sonucu veren %85 KÇ+%15 FÇ karışımına uçucu kül ilave edilmesiyle kür süresi ve uçucu kül oranı arttıkça serbest basınç direnci değerlerinde de artış gözlenmiştir. Böylece en yüksek serbest basınç direnci değerini 56 günlük kür süresinde %10 uçucu kül katkılı numune vermiştir. %85 KÇ+%15 FÇ karışımına %10 uçucu kül ilavesiyle 56 günlük dayanımda %49,3 artış gerçekleşmiştir.

- Yakılmış filtre çamuru katkılı numunelerin en yüksek serbest basınç dayanımı gösterdiği oran, saf haldeki filtre çamuru katkılı numunelere göre artış göstermiştir. Ancak optimum sonuçlara bakıldığında filtre çamurunun yakılması sonucu elde edilen

numunelerdeki 56 günlük serbest basınç direnci değerlerin, saf haldeki filtre çamuru katkılı numunelere göre %53 azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca uçucu kül katkılı numuneler kıyaslandığında yakılmış filtre çamuru katkılı numunelerdeki 56 günlük serbest basınç direnci değerlerin, saf haldeki filtre çamuru katkılı numunelere göre %61,5 azaldığı belirlenmiştir.

- Yıkanmış filtre çamuru katkılı numunelerin en yüksek serbest basınç dayanımı gösterdiği oran, saf haldeki filtre çamuru katkılı numunelere göre değişmemiştir. Ancak optimum sonuçlara bakıldığında filtre çamurunun yıkanması sonucu elde edilen numunelerdeki 56 günlük serbest basınç direnci değerlerin, saf haldeki filtre çamuru katkılı numunelere göre %33,4 azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca uçucu kül katkılı numuneler kıyaslandığında yıkanmış filtre çamuru katkılı numunelerdeki 56 günlük serbest basınç direnci değerlerin, saf haldeki filtre çamuru katkılı numunelere göre %54,5 azaldığı belirlenmiştir.

5. Kırmızı çamura yapılan CBR deneyi sonucunda %5,5 şişme, %5,02 kuru CBR ve %3,9 ıslak CBR değeri gözlemlenmiştir. Kırmızı çamura saf halde filtre çamuru ve uçucu kül eklenmesiyle Opt. FÇ+UK-10 numunesine yapılan CBR deneyinde en fazla 12,5 mm yer değiştirme gözlemlenmiştir. Ayrıca numunenin CBR değeri %34,63 olarak hesaplanmıştır. Suda bekletme sonucunda herhangi bir şişme gözlemlenmemiştir. Kırmızı çamura göre şişme değerleri azalmış ve CBR değeri artmıştır. Opt. FÇ+UK-10 numunesinde hesaplanan CBR değeri ve şişme değeri KGM Karayolu Teknik Şartnamesi' ndeki sınırları karşılamaktadır. Opt. FÇ+UK-10 numunesi, KGM Karayolu Teknik Şartnamesi' ne göre uygun bir dolgu malzemesidir.

6. Mikrokimyasal deneyler sonucunda filtre çamuru ve uçucu kül ile stabilize edilen kırmızı çamur numunesinde puzolanik reaksiyonların kür etkisi ile gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Puzolanik reaksiyonlar sırasında meydana gelen C-A-H ve C-S-H mineralleri SEM, EDX analizi ve XRD analizi ile gözlemlenmiştir.

## 5.2. Öneriler

Filtre çamurunun yakılması sonucu serbest basınç direnci değerlerinde düşüş yaşanmıştır. Bunun sebepleri olarak fűrüzle yanma sonucu ani ve lokal ısınmalar, termal şok sonucu mikro çatlaklar, bağlayıcı fazların oluşamaması, CaO düzgün söndürülememesi sonucu homojen Ca(HO<sub>2</sub>) oluşamaması gibi maddeler sıralanabilir. Bu durumun nedeninin kesin olarak tespit edilebilmesi için ayrıntılı XRD ve SEM analizleri ve yoğunluk-porozite ölçümleri yapılmalıdır. Ayrıca yakma konusunda kontrollü sıcaklık artırımı ve kontrollü söndürme yapılmalıdır.

Filtre çamurunun yıkanması sonucu serbest basınç direnci değerlerinde düşüş yaşanmıştır. Bunun sebepleri olarak bağlayıcı kalsiyum fazların çözünerek uzaklaşması, iyonik ortamın bozulması sonucu daha gevşek iç yapı, puzolanik reaksiyonların yavaşlaması, yıkamayla birlikte kendiliğinden bağlanma özelliğini yitirmesi, bağlayıcı ürün oluşumunu desteklemeye yarayan alkali pH' ın düşmesi gibi maddeler sıralanabilir. Bu durumun nedeninin kesin olarak tespit edilebilmesi için ayrıntılı XRD ve SEM analizleri, yoğunluk-porozite ve pH-alkalinite ölçümleri yapılmalıdır.

Filtre çamuru katkılı kırmızı çamur malzemesinin ulaşım yapılarında kullanılabilirliğinin ayrıntılı olarak incelenmesi gerekir. Bunun için yapılan çalışmalara; permeabilite katsayısının belirlenmesi, donma-çözülme direncinin tespiti, karışımlar üzerinde sıkıştırılabilirlik tespiti için Proctor testleri gibi çalışmalar eklenebilir. Ayrıca filtre çamurundan organik maddenin uzaklaştırılması için daha modern yöntemler uygulanabilir.

Filtre çamuru katkılı kırmızı çamur malzemesinin optimum serbest basınç direnci değeri veren oran üzerinde doymuş ve doymamış birim hacim ağırlığı, yatay ve düşey permeabilite katsayısı, Young modülü, Poisson oranı, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve genişleme açısı değerleri tespit edilip Plaxis programında yol dolgusu modellenmesi yapılarak belirli değişkenler altında (yeraltı su seviyesi, yatay deprem ivmesi vb.) aşamalı inşaat senaryosunda kısa ve uzun dönem konsolidasyon analizleri yapılabilir. Analizler sonucunda zamana bağlı yatay ve düşey deplasmanlar, aşırı gözenek suyu basıncı, güvenlik katsayısı değerleri grafiksel olarak karşılaştırılabilir.

### 5.2.1. Yol dolgularında C sınıfı uçucu külün kullanımıyla ilgili öneriler

Yol dolguları, arazi şartları gereği ıslanma-kuruma ve donma çözülme etkilerine maruz kalmaktadır. Yol dolgularında C sınıfı uçucu küllerin kullanılması ıslanma-kuruma ve donma-çözülme durumlarında birtakım dezavantajlar getirebilir. C sınıfı uçucu külün CaO içeriği yüksek olduğu için suyla reaksiyona girip C-S-H ve C-A-H bağları oluşturur. Bu bağlar yol dolgusundaki dayanımı arttırabilir ancak dolgunun gevrek davranış sergilemesine sebep olabilir. Islanma-kuruma çevrimlerinde şişme-büzülmeler meydana gelip makro ve mikro çatlaklar oluşabilir. Nem ve termal değişimlerde ise tolerans düşer. Donma-çözülme durumlarında ise genişleyen su hacmi C sınıfı uçucu kül karışımlarında iç gerilmeler oluşturup mikro çatlaklara neden olabilir. İnce taneli dolgularda drenaj zayıf olup suya doymun olma durumu vardır. Bu durumlarda buz mercikleri oluşup don kabarması meydana gelebilir. Çözölmeye geçince oturma ve çatlaklar oluşabilir.

Yol dolgularında C sınıfı uçucu külün oluşturacağı zararları minimize etmek için karışımda kullanılacak uçucu kül oranı optimize edilebilir, uçucu kül granüler malzemeler ile karıştırılabilir, suyu uzaklaştırmak için iyi bir drenaj sistemi kurulabilir, yeraltı suyu etkisi azaltılabilir, kapiler su yükselmesi sınırlandırılabilir, karışım optimum su muhtevasında sıkıştırılabilir, karışımda daha düşük boşluk oranı sağlanabilir, dolgu yerleştirme sonrasında kür uygulanabilir, dolgu don derinliği altında konumlandırılabilir, don koruma tabakası kullanılabilir, kireç veya çimento malzemeleri ile stabilize edilebilir ve lif katkıları ile çatlak kontrolü sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

- Abu Yosef, S. A. S. (2024). *Sustainable stabilization of expansive soil using fly ash, olive cake ash, and zeolite mixtures: a comparative experimental study with plaxis modeling*, [MSc dissertation]. Istanbul Technical University Graduate School, İstanbul.
- Agacayak, T., ve Agca, O. (2021). Cleaning of Beyşehir(Bayavşar) coal in Turkey with hydrophobic flocculation using waste motor oil, *ACTA Chemica*, 29(1), 65-80.
- Ahmad, S., Ghazi, M. S. A., Syed, M., ve Al-Osta, M. A. (2024). Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: a review, *Results in Engineering*, 22.
- Akbay Arama, Z., Dalyan, İ., ve Akın, M. S. (2023). Konut binalarının enkazından ortaya çıkan plastik atıkların yol dolgularının iyileştirilmesinde kullanımı, *9. Geoteknik Sempozyumu*, 16.
- Alameri, İ. (2017). *Atık kırmızı çamur ve nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı betonların yüksek sıcaklık sonrası fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*, [Yüksek Lisans Tezi]. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Alaryan, M. (2022). *Konya şeker fabrikası atık kireç çamuru (PKF) ' nin geoteknik mühendisliğinde kullanımının araştırılması*, [Yüksek Lisans Tezi]. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Alkaya, D. (2009). Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanılmasının incelenmesi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(1), 61-72.
- Anuk, O. (2004). *Cem I 42.5 çimentolu düşük dozajlı betonlarda F tipi uçucu külün etkinliği*, [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arslan, S. (2016). *Eti alüminyum A.Ş. kırmızı çamurunun susuzlandırma performansının artırılması*, [Yüksek Lisans Tezi]. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Avcu, S. (2019). *Seydişehir eti alüminyum tesisinde enerji verimliliği iyileştirilmesinin araştırılması*, [Yüksek Lisans Tezi]. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Avrupa Komisyonu (2006). Büyük yakma tesisleri için mevcut en iyi tekniklere yönelik başvuru belgesi.
- Bacanak, N. (2001). *Termik santral uçucu külünden üretilen cam-seramiğin karakterizasyonu*, [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Baydilli, E. (2018). *Kayseri çinko-kurşun üretim tesisleri atıklarının yol dolgu ve üstyapı tabakalarında kullanımı*, [Yüksek Lisans Tezi]. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

- Bayram, E. (2017). *The use of dredged materials for road fill and the characteristical analysis of treated materials*, [MSc dissertation]. İstanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology, İstanbul.
- Bentli, İ., Uyanık, A. O., Demir, U., Şahbaz, O., ve Çelik, M. S. (2005). Seyitömer termik santrali uçucu küllerinin tuğla katkı hammaddesi olarak kullanımı, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, İzmir*, 385-389.
- Büyükoğuz, M. (2023). *Atık lastik parçalarının, kireç ve uçucu kül ile stabilize edilen yüksek plastisiteli kil zemin üzerindeki etkisi*, [Yüksek Lisans Tezi]. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Central Electricity Generating Board (CEGB) (1972). *Utilisation P.F.A*, UK Gibbons of Wolverhampton.
- Cultrone, G., ve Sebastian, E. (2009). Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks, *Construction and Building Materials*, 23, 1178-1184.
- Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİB) (2020). *Şeker üretimi sektörel uygulama kılavuzu*, Sanayiden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Belirlenmesi ve Azaltılmasına Yönelik Uygulamanın Kolaylaştırılmasının Sağlanması Projesi.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİB) (2016). *Birincil ve ikincil alüminyum üretimi sektörel atık kılavuzu*, Endüstriyel Atıkların Sektörel Yönetimi Kapsamında Atık Üretim Faktörlerinin Belirlenmesi ve Sektör Kılavuzlarının Hazırlanması Projesi.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİB) (2016). *Termik Santraller Sektörel Atık Kılavuzu*, Endüstriyel Atıkların Sektörel Yönetimi Kapsamında Atık Üretim Faktörlerinin Belirlenmesi ve Sektör Kılavuzlarının Hazırlanması Projesi.
- Çiçek, E. (2020). Farklı malzemeler ve geosentetiklerin yol dolgusu güvenliğine ve davranışına etkileri, *Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4(2), 334-344.
- Deelwal, K., Dharavath, K., ve Kulshreshtha, M. (2014). Evaluation of characteristic properties of red mud for possible use as a geotechnical material in civil construction, *International Journal of Advances in Engineering and Technology*, 7(3), 1053-1059.
- Dereli, M. (2019). *Sürdürülebilir yapı malzemesi üretimine yönelik kırmızı çamura mikronize edilmiş piroklastik kayaç ilavesinin etkilerinin analizi*, [Doktora Tezi]. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Dodoo-Arhin, D., Konadu, D. S., Annan, E., Buabeng, F. P., Yaya, A., ve Agyei-Tuffour, B. (2013). Fabrication and characterisation of ghanaiian bauxite red mud-clay composite bricks for construction applications, *American Journal of Materials Science*, 3(5), 110-119.
- Durgun, M. Y. (2019). Investigating the utilization of waste glass powder, colemanite ore waste and sugar factory filter cake in gypsum-lime based mortars, *European Journal of Technique*, 9(2), 241-252.

- Eray, S. (2019). Kırmızı çamurdan değerli elementlerin geri kazanımına yönelik yapılan araştırmaların derlenmesi, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 8(1), 70-78.
- Eroğlu, H. (2003). *Orman yollarında kağıt fabrikası atığının (kireç çamuru) stabilizasyon amaçlı kullanımı üzerine bir araştırma*, [Doktora Tezi]. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Erol, M. (1999). *Uçucu küllerin cam-seramik yapımında kullanımı*, [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S., ve Demir, İ. (2009). Uçucu kül bölüm II: kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikler, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(2), 33-42.
- Günaydın, H. İ. (2024). *Atık kırmızı çamurun geoteknik özellikleri ve polisülfon esaslı farklı kompozit malzemelerin hazırlanarak geosentetik bariyer olarak kullanımının araştırılması*, [Doktora Tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Havanagi, V. G., Mathur, S., ve Sinha A. (2012). Waste materials for construction of road embankment and pavement layers, *International Journal of Environmental Engineering Research*, 1(2), 51-59.
- İstanbul Maden İhracatçıları Birliği (İMİB) (2021). Boksit yataklarının durumu, işletmeciliği ve geleceği.
- Jha, K. A., Kumar, D., ve Sivapullaiah, P. V. (2020). Influence of fly ash on geotechnical behaviour of red mud: a micro-mechanistic study, *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 6157-6176.
- Kalkan, E. (2006). Utilization of red mud as a stabilization material for the preparation of clay liners, *Engineering Geology*, 87, 220-229.
- Karagül Başak, Ç. (2007). *Yol dolgularının geogrid kullanılarak iyileştirilmesi*, [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karami, H., Pooni, J., Robert, D., Susanga, C., Li, J., ve Setunge, S. (2021). Use of secondary additives in fly ash based soil stabilization for soft subgrades, *Transportation Geotechnics*, 29.
- Kaya, İ. A. (2010). *A study on blended bottom ash cements*, [MSc dissertation]. The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.
- Kearsley, E. P., ve Wainwright, P. J. (2001). The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete, *Cement and Concrete Research*, 31(1), 105-112.
- Kim, B., Prezzi, M., ve Salgado, R. (2005). Geotechnical properties of fly ash and bottom ash mixtures for use in highway embankments, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131, 914-924.

- Krishnan, A. K., Wong, Y. C., Zhang, Z., ve Arulrajah, A. (2024). A transition towards circular economy with the utilisation of recycled fly ash and waste materials in clay, concrete and fly ash bricks: a review, *Journal of Building Engineering*, 98.
- Kula, I., Olgun, A., Erdoğan, Y., ve Sevinc, V. (2001). Effects of colemanite waste, cool bottom ash, and fly ash on the properties of cement, *Cement and Concrete Research*, 31, 491-494.
- Levent, M. (2012). *Kırmızı çamur katkılı tuğla üretiminin araştırılması*, [Yüksek Lisans Tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Li, H., Xu, W., Yang, X., ve Wu, J. (2014). Preparation of Portland cement with sugar filter mud as lime-based raw material, *Journal of Cleaner Production*, 66, 107-112.
- Li, W. D. (2006). *New seperation technology research of iron from bayer progress red mud*, Central South University Library: Changsha.
- Li, Y., Min, X., Ke, Y., Liu, D., ve Tang, C. (2019). Preparation of red mud-based geopolymer materials from MSWI fly ash and red mud by mechanical activation, *Waste Management*, 83, 202-208.
- Man, J., Gao, W., Yan, S., Liu, G., ve Hao, H. (2017). Preparation of porous brick from diatomite and sugar filter mud at lower temperature, *Construction and Building Materials*, 156, 1035-1042.
- Mukherji, S. K., Machhoya, B. B., Savsani, R. M., Vyas, D. R., ve Kumar, D. T. (1993). The utilisation of fly ash in the preparation of ceramic tableware and artware, *British Ceramic Transactions*, 92(6), 254-257.
- Mukiza, E., Liu, X., Zhang, L., ve Zhang, N. (2019). Preparation and characterization of a red mud-based road base material: strength formation mechanism and leaching characteristics, *Construction and Building Materials*, 220, 297-307.
- Muş, S. (2015). *Seydişehir eti alüminyum işletmesi kırmızı çamur atık barajı mühendislik ve çevre jeolojisi*, [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Naganathan, S., Mohamed, A. Y. O., ve Mustapha, K. N. (2015). Performance of bricks made using fly ash and bottom ash, *Construction and Building Materials*, 96, 576-580.
- Nambiar, E. K. K., ve Ramamurthy, K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete, *Cement and Concrete Composites*, 28(5), 475-480.
- Nambiar, E. K. K., ve Ramamurthy, K. (2007). Air-void characterisation of foam concrete, *Cement and Concrete Research*, 37(2), 221-230.
- Özbek, S. (2025). *Deprem etkisi altında yol dolgularının analizi*, [Yüksek Lisans Tezi], Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Özkan, İ., ve Yenginar, Y. (2023). Improvement of high plasticity clay by using filter sludge, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 11(4), 973-985.

- Qiu, X. R., ve Qi, Y. Y. (2011). Reasonable utilization of red mud in the cement industry, *Cem. Technol*, 6, 103-105.
- Rafieizonooz, M., Mirza, J., Salim, M. R., Hussin, M. W., ve Khankhaje, E. (2016). Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement, *Construction and Building Materials*, 116, 15-24.
- Rao Hanumanth, CH. V., Naidu, G. P., Satyanayarana, P. V. V., ve Adishesu, S. (2012). Application of GGBS stabilized redmud in road construction, *IOSR Journal of Engineering*, 2(8), 14-20.
- Sabat, A. K., ve Mohanta, S. (2015). Efficacy of dolime fine stabilized red mud-fly ash mixes as subgrade material, *APRN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(14), 5918-5923.
- Sahoo, S., ve Mohanty, C. R. (2016). Construction of road sub-base by using industrial waste, *International Journal of Engineering Sciences and Management Research*, 3(1), 77-83.
- Sarath Chandra, K., ve Krishnaiah, S. (2022). Strength and leaching characteristics of red mud (bauxite residue) as a geomaterial in synergy with fly ash and gypsum, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 13.
- Satapathy, B. K., Patnaik, S. C., ve Vidyasagar, P. (1991). Utilisation of red mud for making red oxide paint INCAL-91, *International Conference and Exhibition on Aluminium at Bangalore*, 1, 159-161.
- Satayanarayana, P. V. V., Ganapati Naidu, P., Adishesu, S., ve Rao Hanumanth, CH. V. (2012). Characterization of lime stabilized redmud mix for feasibility in road construction, *International Journal of Engineering Research and Development*, 3(7), 20-26.
- Shoira, M. (2006). *Application of defecation lime from sugar industry in Uzbekistan*, [MSc dissertation]. KTH Chemical Engineering and Technology, Stockholm.
- Soğancı, A. S., Yenginar, Y., Özkan, İ., Güzel, Y., ve Özdemir, A. (2024). Waste management of red mud and fly ash to utilize in road subgrade material, *Sustainability*, 16.
- Sun, Y. F., Dong, F. Z., Liu, J. T., ve Wang, S. H. (2009). Technology for recovering iron from red mud by bayer process, *Met. Mine*, 9, 176-178.
- Tang, W. C., Wang, Z., Liu, Y., ve Cui, H. Z. (2018). Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 178, 288-300.
- Tastan, O. E., Edil, T. B., Benson, C. H., ve Aydilek, A. H. (2011). Stabilization of organic soils with fly ash, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(9), 819-833.

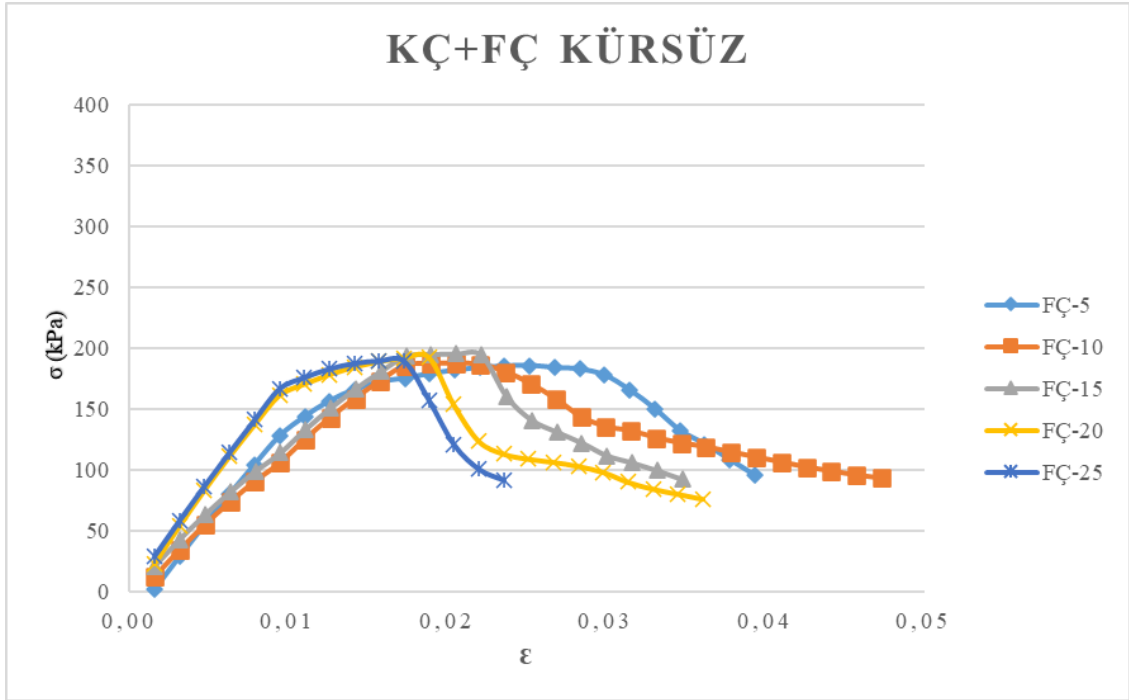
- Taştan, Ş. (2023). *Geri dönüştürülebilir atık malzemelerin yol dolgusunda kullanılabilirliğinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi*, [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Topal, M., Arslan Topal, E. I., Aslan., S., ve Kılıç, M. (2011). Termik santral uçucu külü, cürufu ve arıtma çamurundan ağır metallerin liçlenebilirliği, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 15(2), 97-104.
- Topçu, İ., B., ve Sofuoğlu, T. (2018). Properties of mortars produced with PKF press filter waste, *Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017)*, 7, 347-360.
- Tosun, İ. (2024). *Uçucu kül katkısının kohezyonlu zeminlerin mühendislik özelliklerine etkisi*, [Yüksek Lisans Tezi]. Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muş.
- Tunçez, F. D. (2007). *Şeker fabrikası atık çamuru ve pomzanın toprak iyileştirici olarak kullanılması*, [Doktora Tezi]. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) (2025). 2024 yılı elektrik üretim-tüketim raporu.
- Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİK) (2025). Dünya ve Türkiye kömür kaynak ve rezerv durumu, *Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı*.
- Türkşeker (2024). Sektör raporu.
- URL- 3: (2020). [https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN312380336&\\_cid=P12-MHKFCO-62878-1](https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN312380336&_cid=P12-MHKFCO-62878-1), [Ziyaret Tarihi: 02.11.2025].
- URL-1: (2004). <http://www.sibpatent.ru/default.asp?khid=55643&code683331&sort=2>, [Ziyaret Tarihi: 02.11.2025].
- URL-2: (2020). [https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN311651960&\\_cid=P12-MHKFCO-62878-1](https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN311651960&_cid=P12-MHKFCO-62878-1), [Ziyaret Tarihi: 02.11.2025].
- URL-4: (2015). [https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN151984059&\\_cid=P12-MHKFCO-62878-1](https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN151984059&_cid=P12-MHKFCO-62878-1), [Ziyaret Tarihi: 02.11.2025].
- URL-5: (1991). [https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN87532652&\\_cid=P12-MHKKFV-98653-2](https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN87532652&_cid=P12-MHKKFV-98653-2), [Ziyaret Tarihi: 02.11.2025].
- URL-6: (2025). <https://www.wikiwand.com>, [Ziyaret Tarihi: 12.11.2025].
- URL-7: (2025). <https://www.izdemirenerji.com>, [Ziyaret Tarihi: 12.11.2025].
- URL-8: (2025). <https://www.caejun.com>, [Ziyaret Tarihi: 12.11.2025].

- Volkan, S. (2006). *Afşin-Elbistan termik santrali uçucu küllerinden yanmamış karbonun geri kazanımı*, [Yüksek Lisans Tezi]. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Wang, H. M. (2011). The comprehensive of red mud, *Shanxi Energy Conserv.*, 11, 58-61.
- Yang, J. K., Chen, F., Xiao, B., ve Liu, W. (2006). Engineering application of basic level materials of red mud high level pavement, *China Munic. Eng.*, 5, 7-9.
- Zha, F., Liu, S., Du, Y., ve Cui, K. (2008). Behavior of expansive soils stabilized with fly ash, *Nat Hazards*, 47, 509-523.

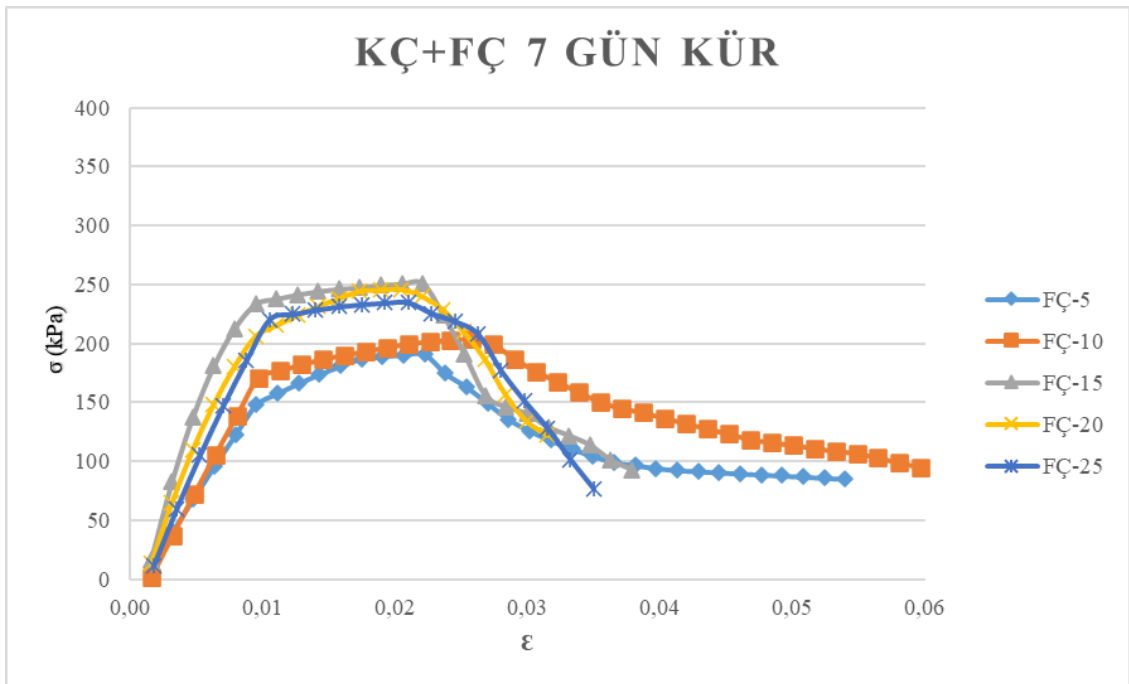


## EKLER

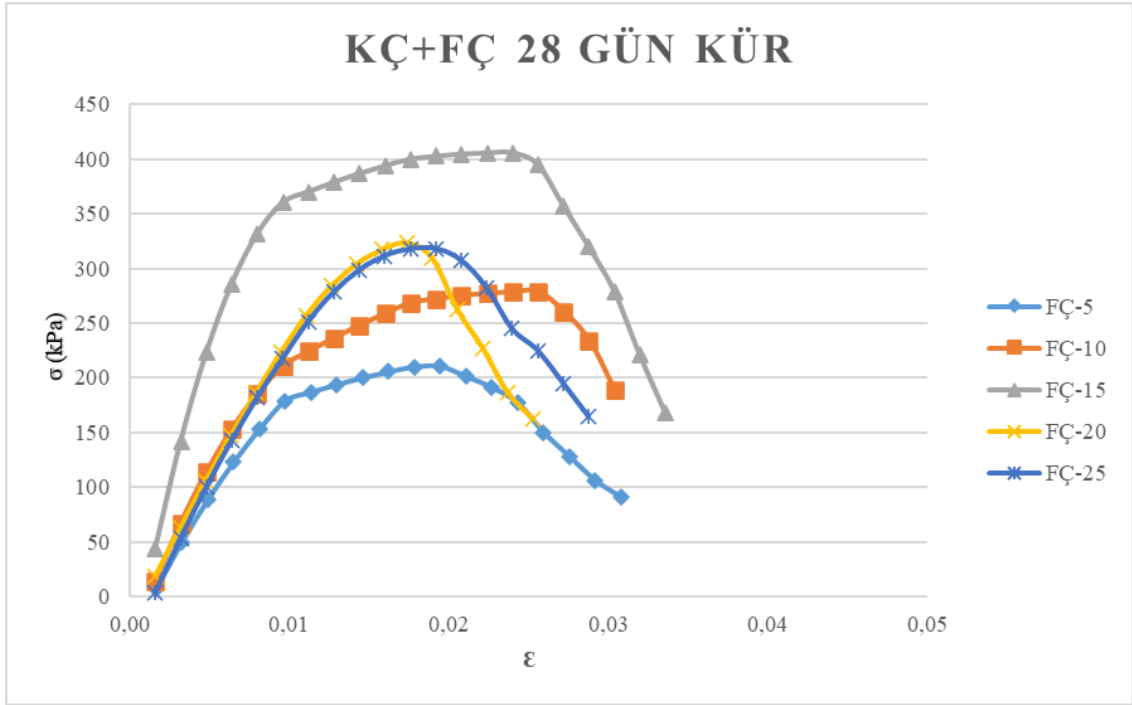
## EK-1 KÇ+Normal FÇ Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları



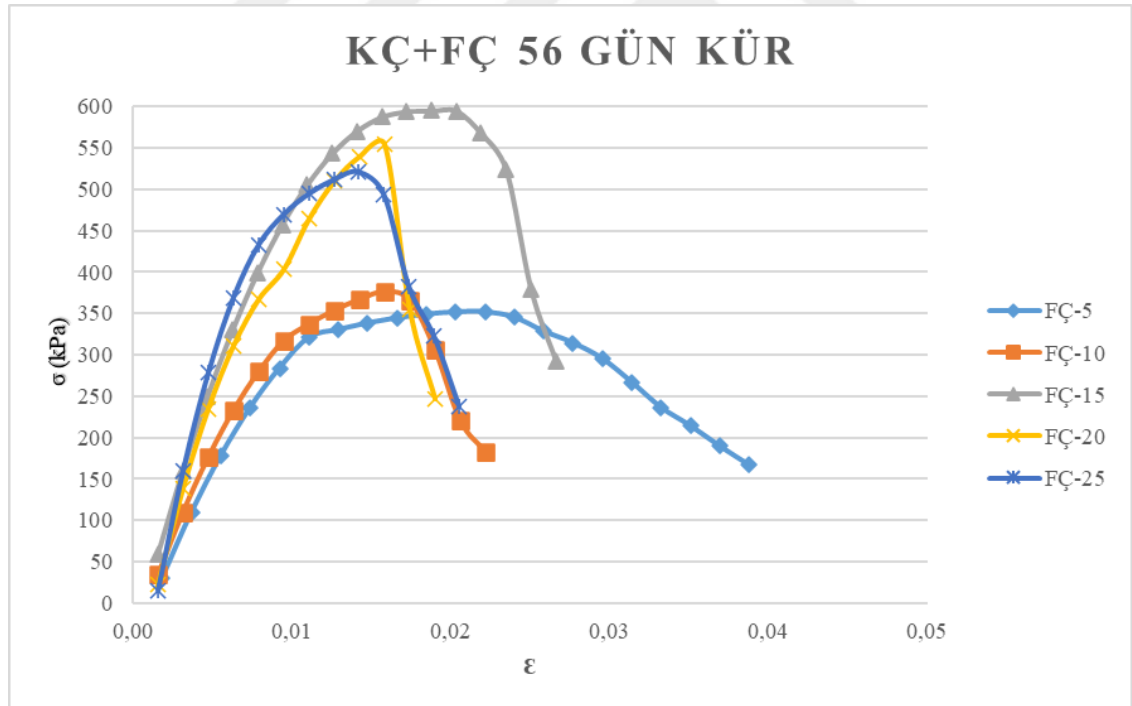
Şekil Ek-1.1. KÇ+Normal FÇ kürsüz numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



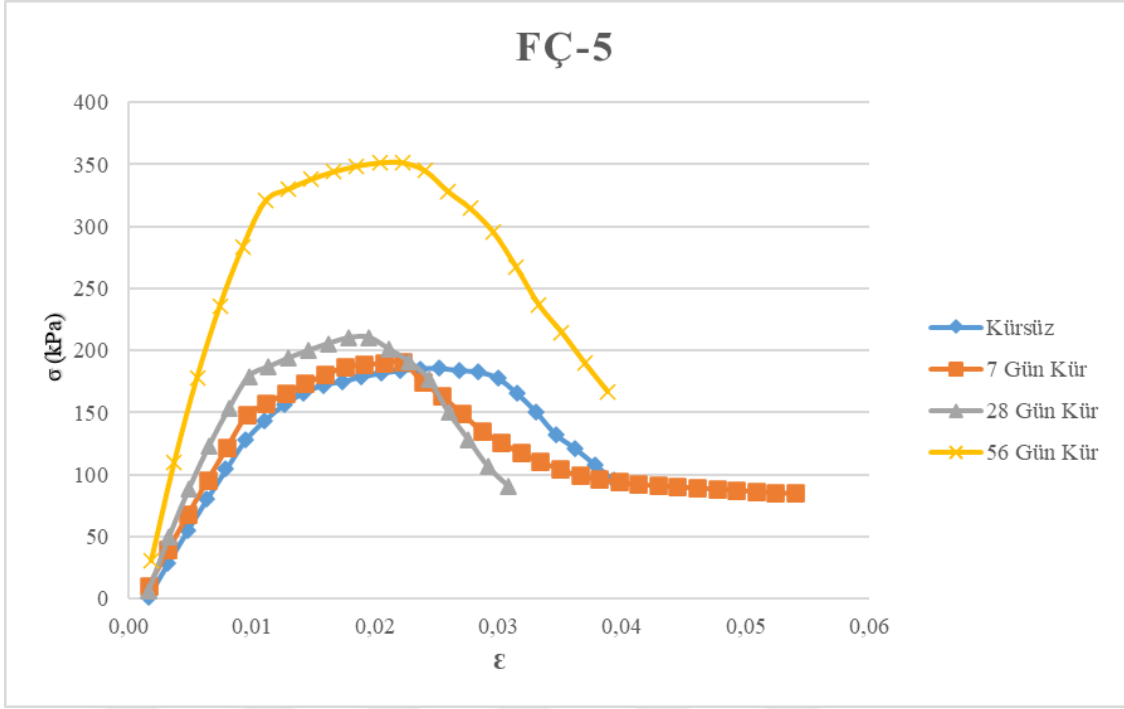
Şekil Ek-1.2. KÇ+Normal FÇ 7 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



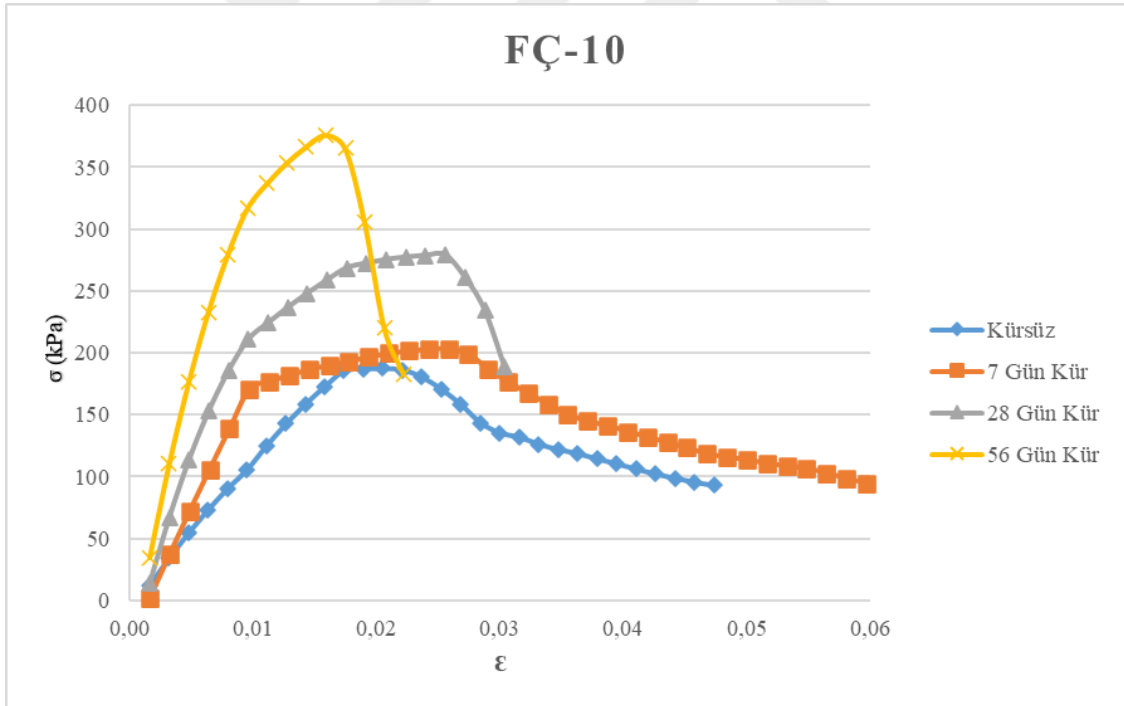
Şekil Ek-1.3. KÇ+Normal FÇ 28 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



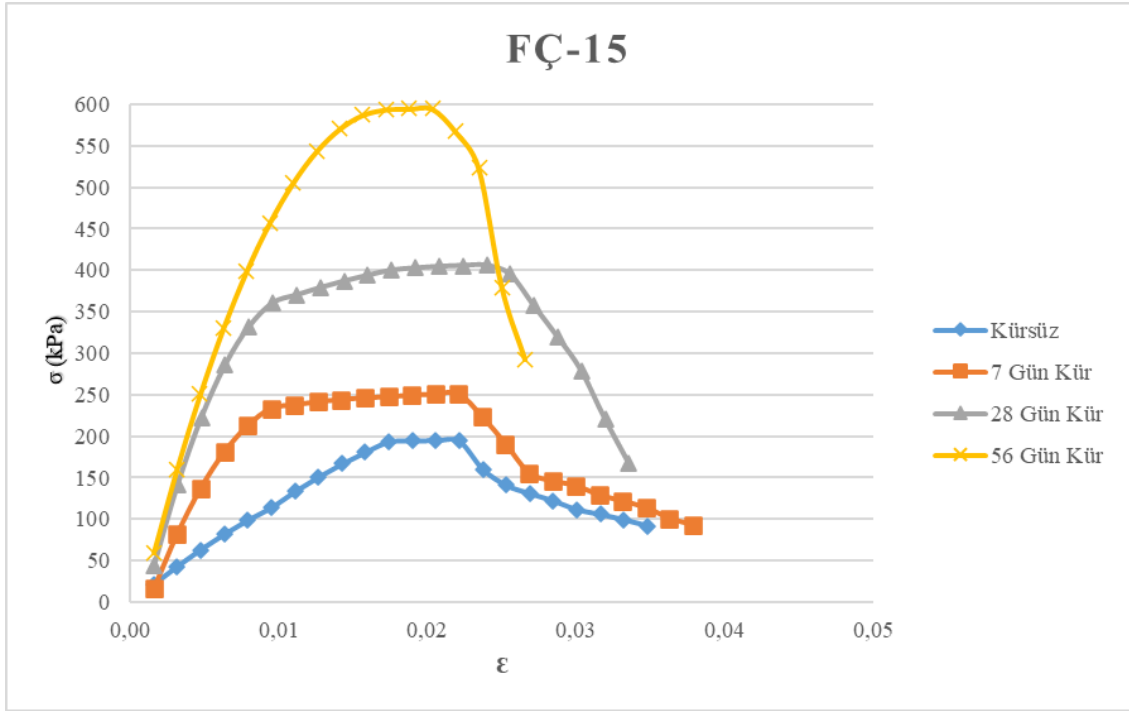
Şekil Ek-1.4. KÇ+Normal FÇ 56 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



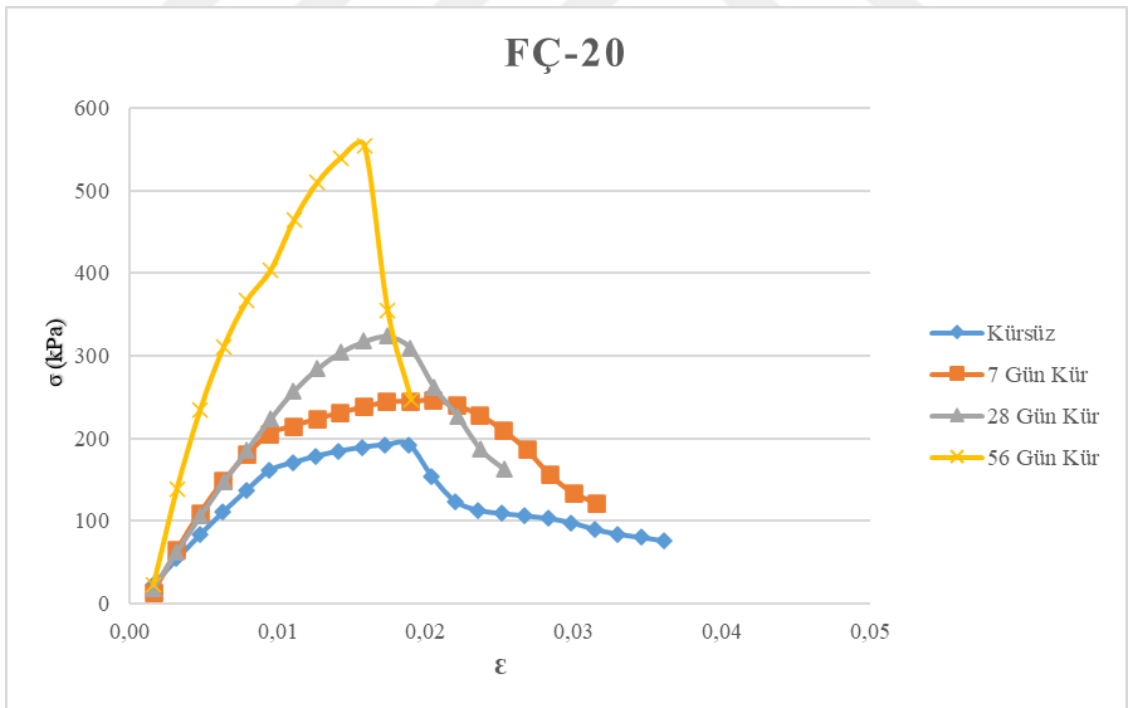
Şekil Ek-1.5. %95 KÇ+ %5 Normal FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



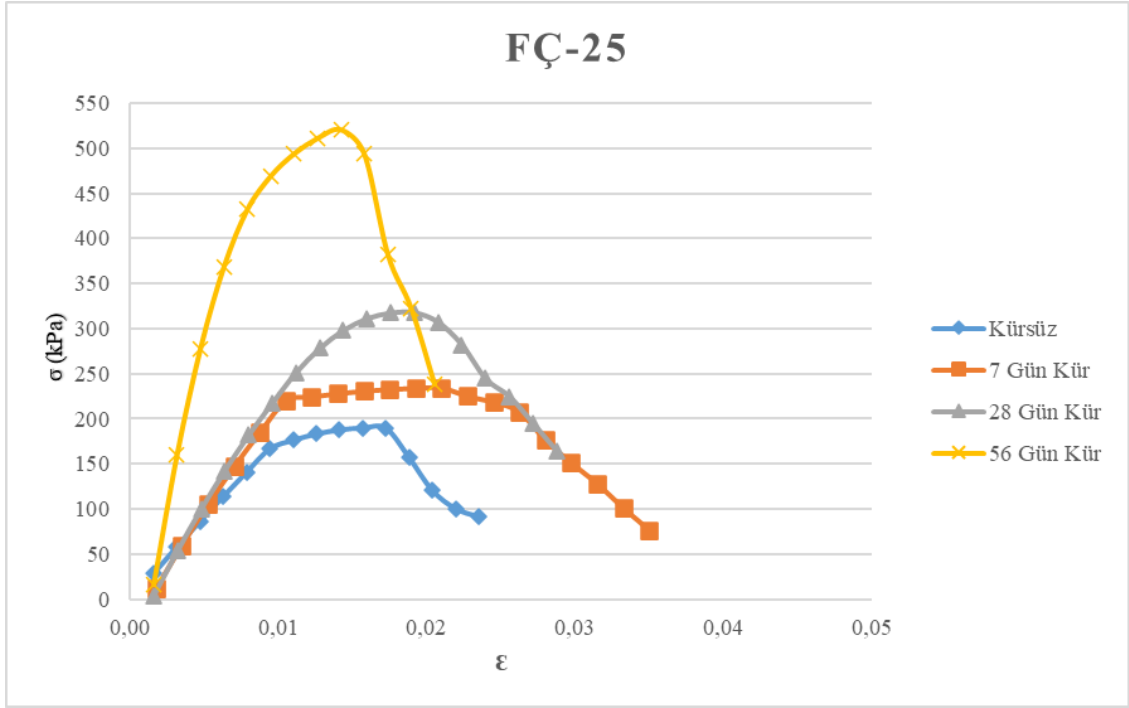
Şekil Ek-1.6. %90 KÇ+ %10 Normal FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



Şekil Ek-1.7. %85 KÇ+ %15 Normal FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

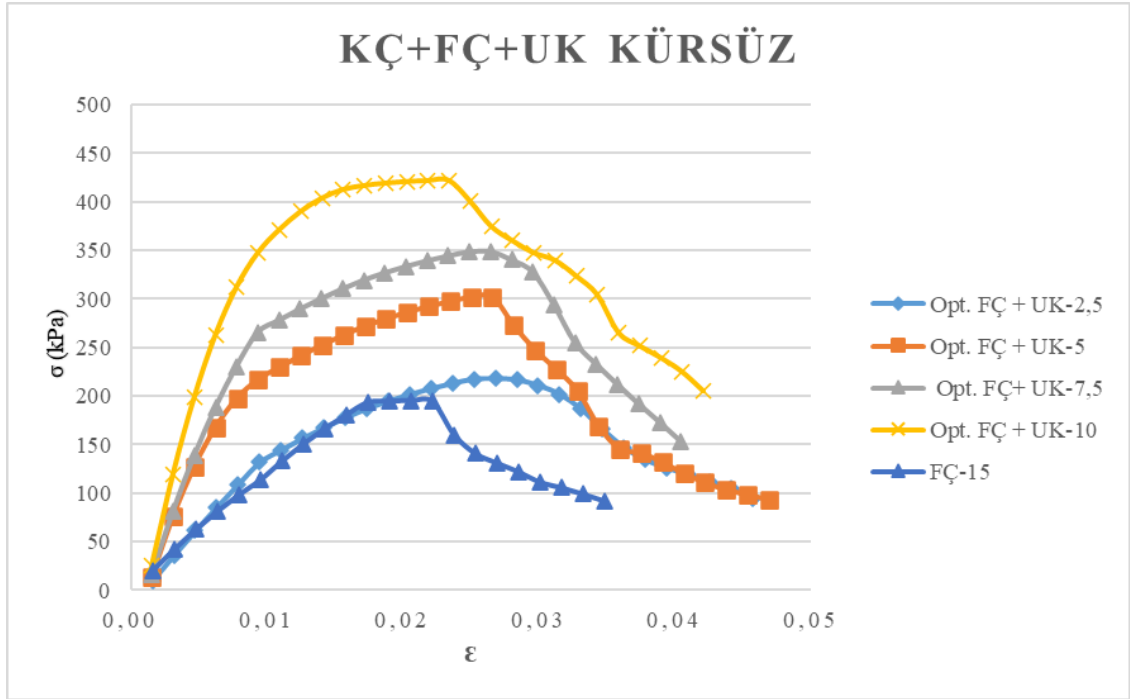


Şekil Ek-1.8. %80 KÇ+ %20 Normal FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

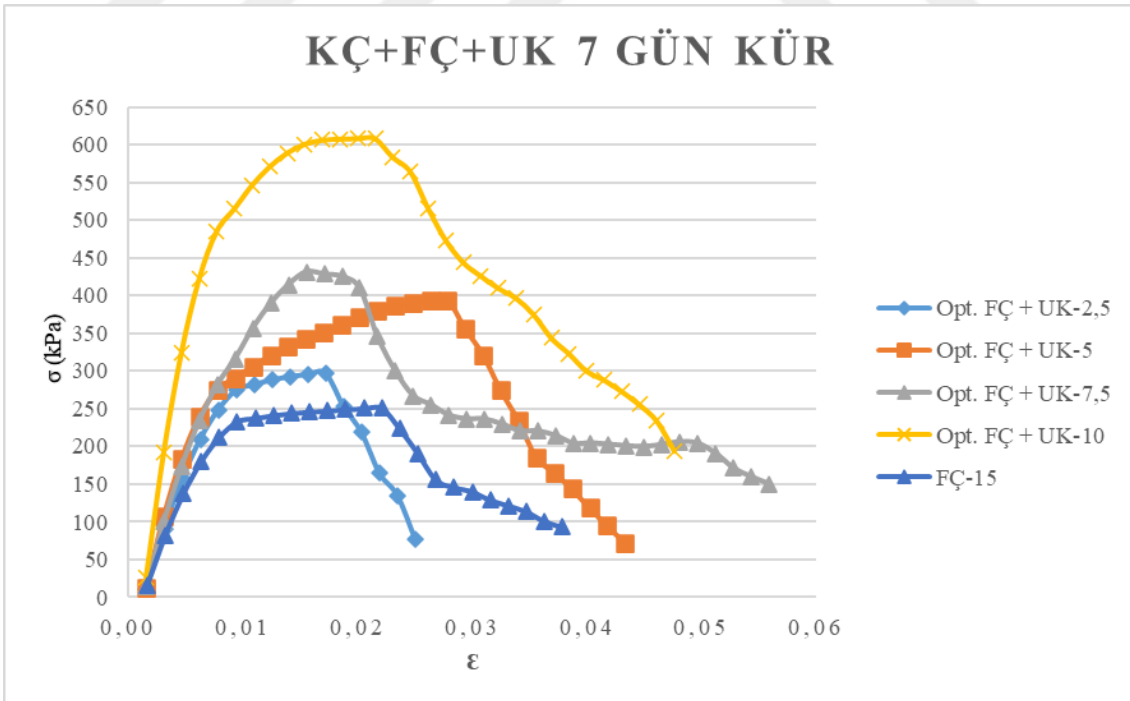


Şekil Ek-1.9. %75 KÇ+ %25 Normal FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

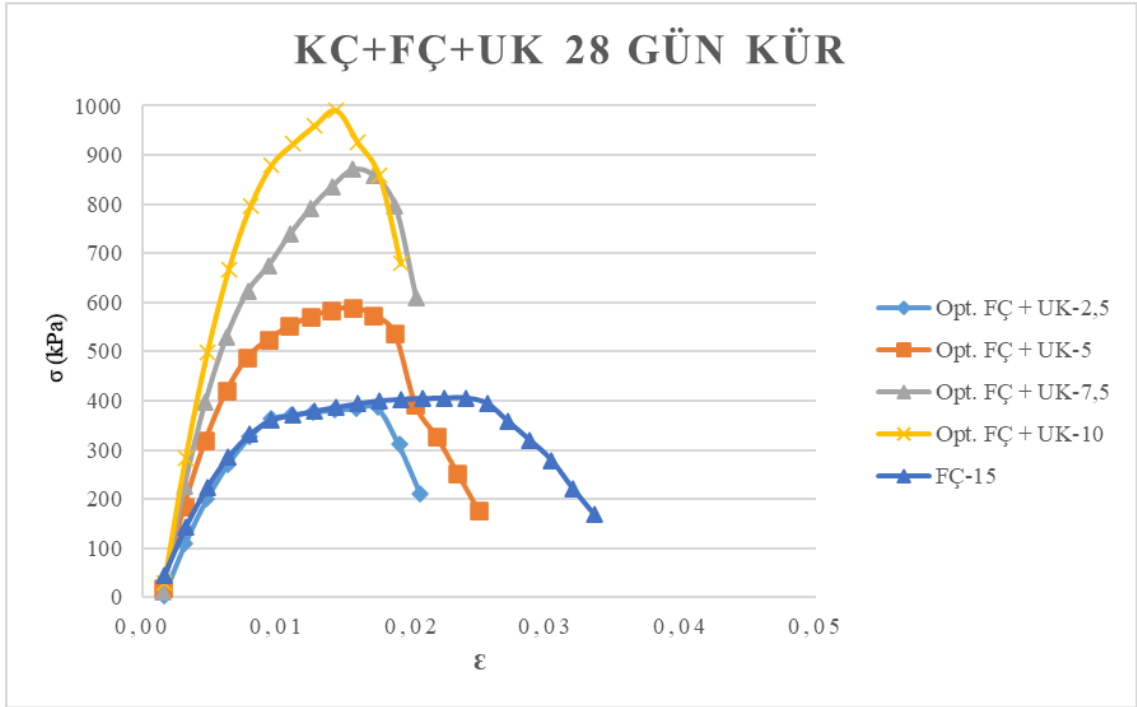
## EK-2 KÇ+Normal FÇ+UK Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları



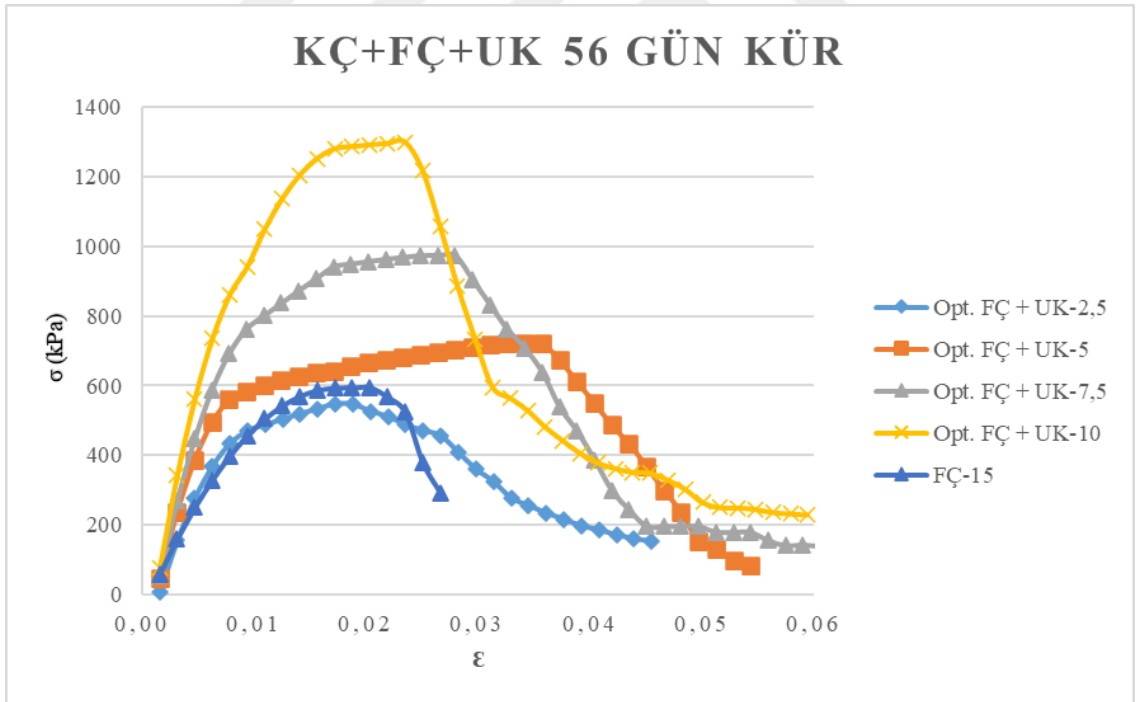
Şekil Ek-2.1. KÇ+Normal FÇ+UK kürsüz numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



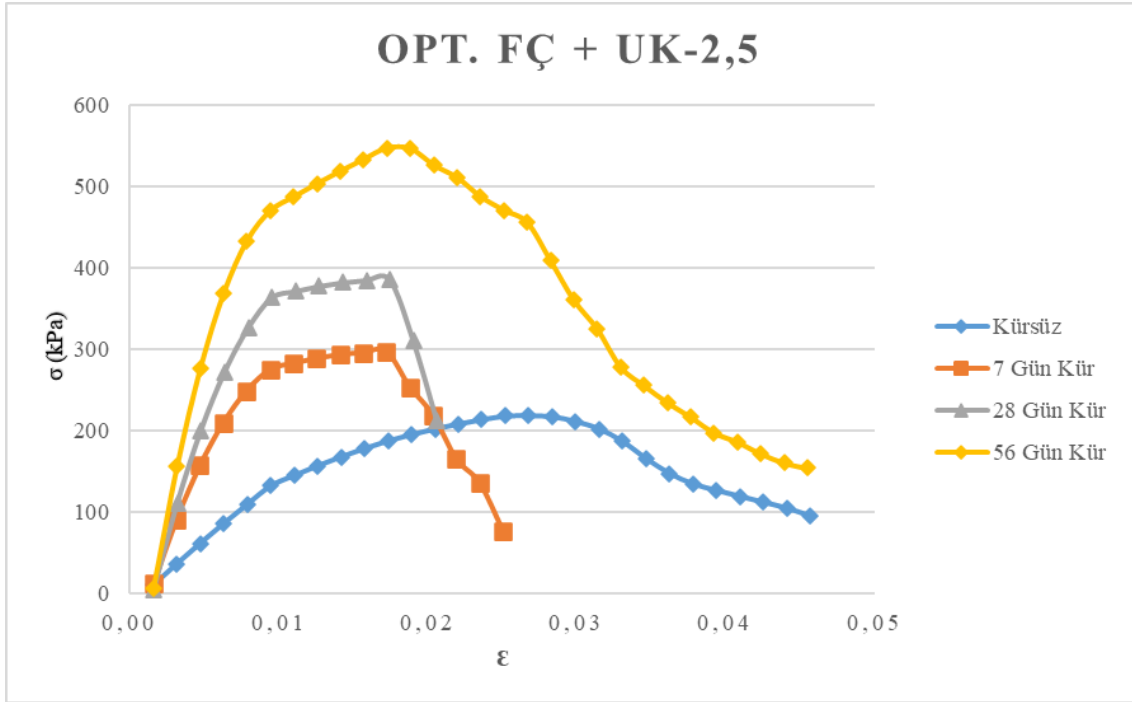
Şekil Ek-2.2. KÇ+Normal FÇ+UK 7 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



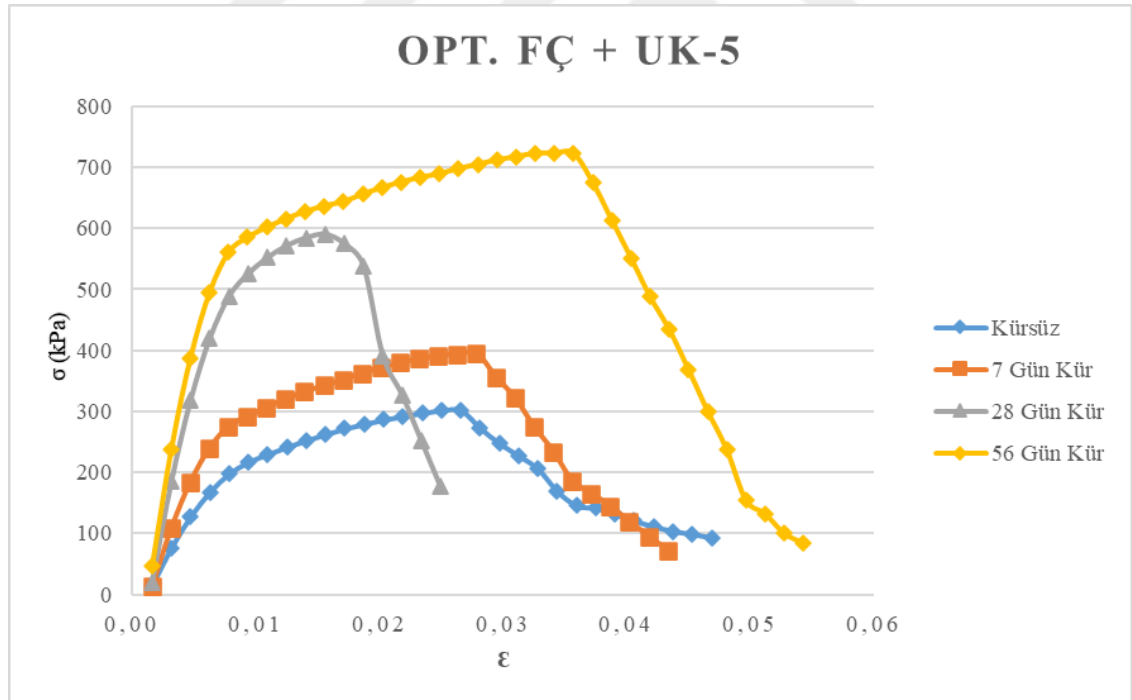
Şekil Ek-2.3. KÇ+Normal FÇ+UK 28 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



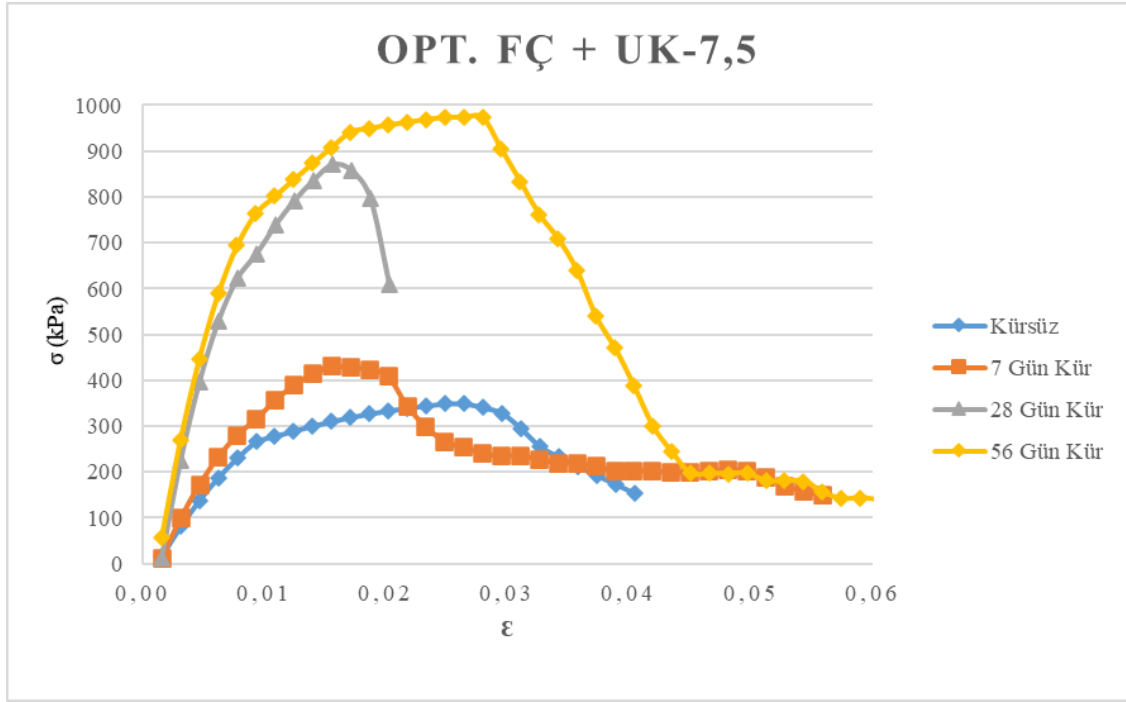
Şekil Ek-2.4. KÇ+Normal FÇ+UK 56 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



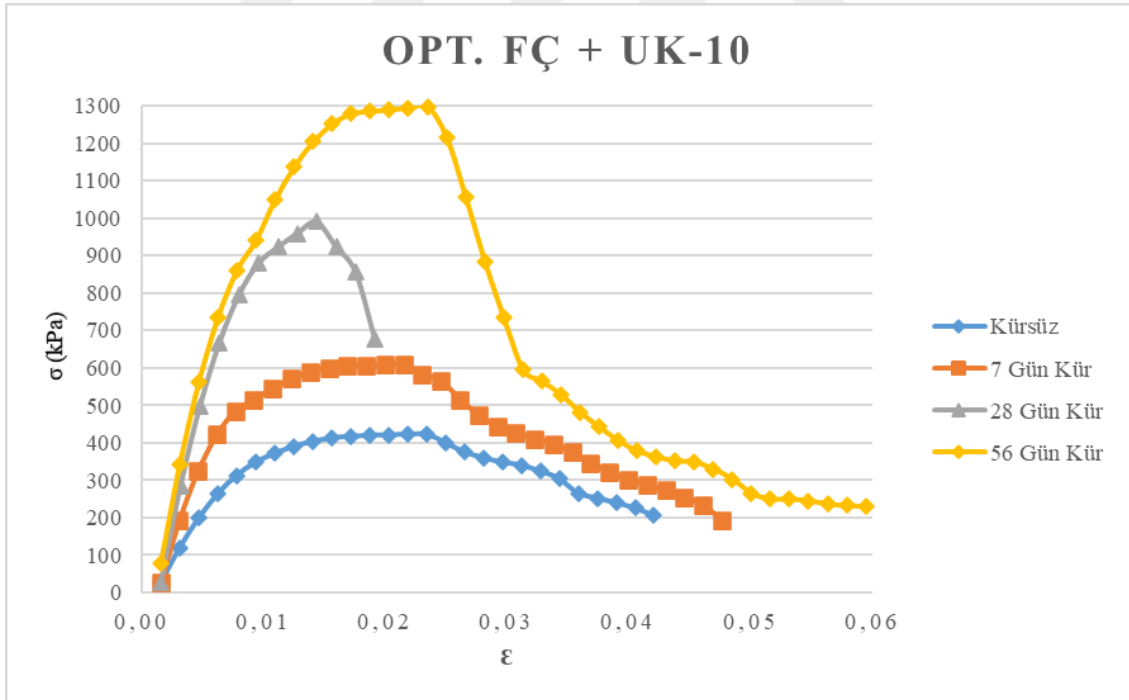
Şekil Ek-2.5. KÇ+Normal FÇ+%2,5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



Şekil Ek-2.6. KÇ+Normal FÇ+%5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

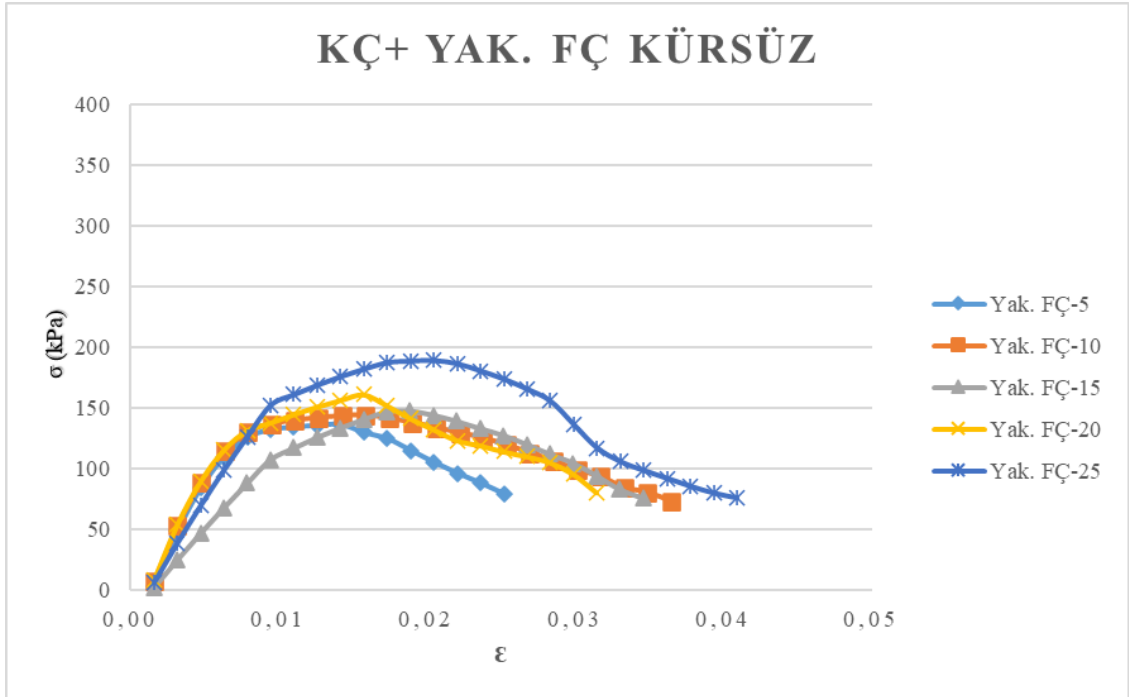


Şekil Ek-2.7. KÇ+Normal FÇ+%7,5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

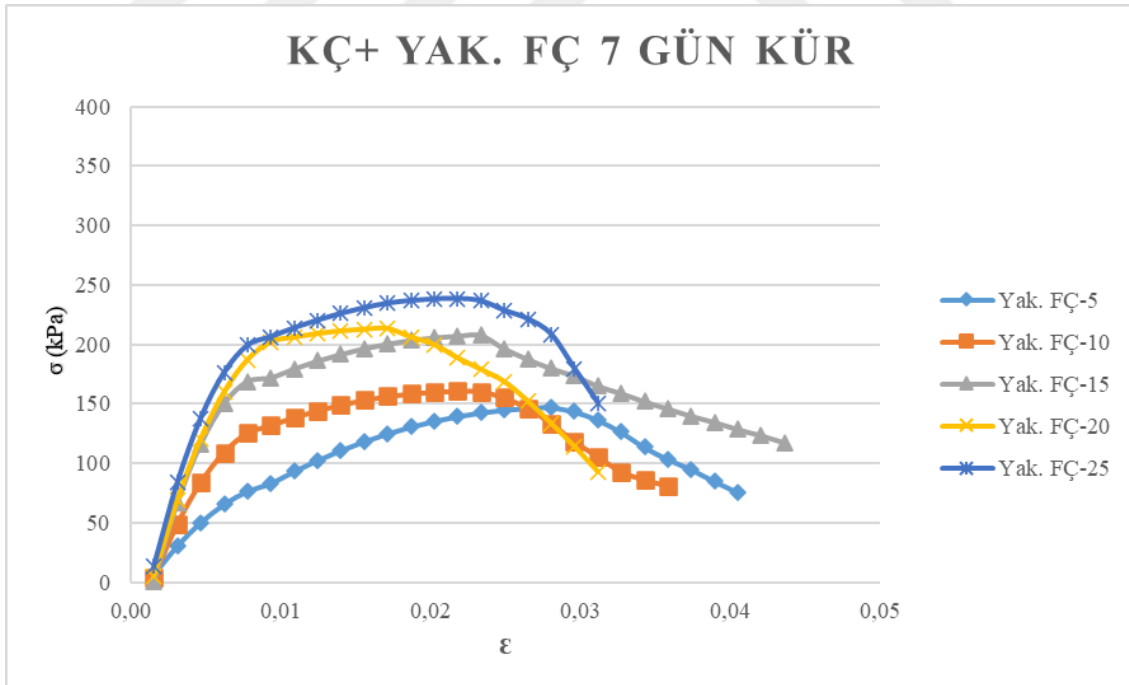


Şekil Ek-2.8. KÇ+Normal FÇ+%10 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

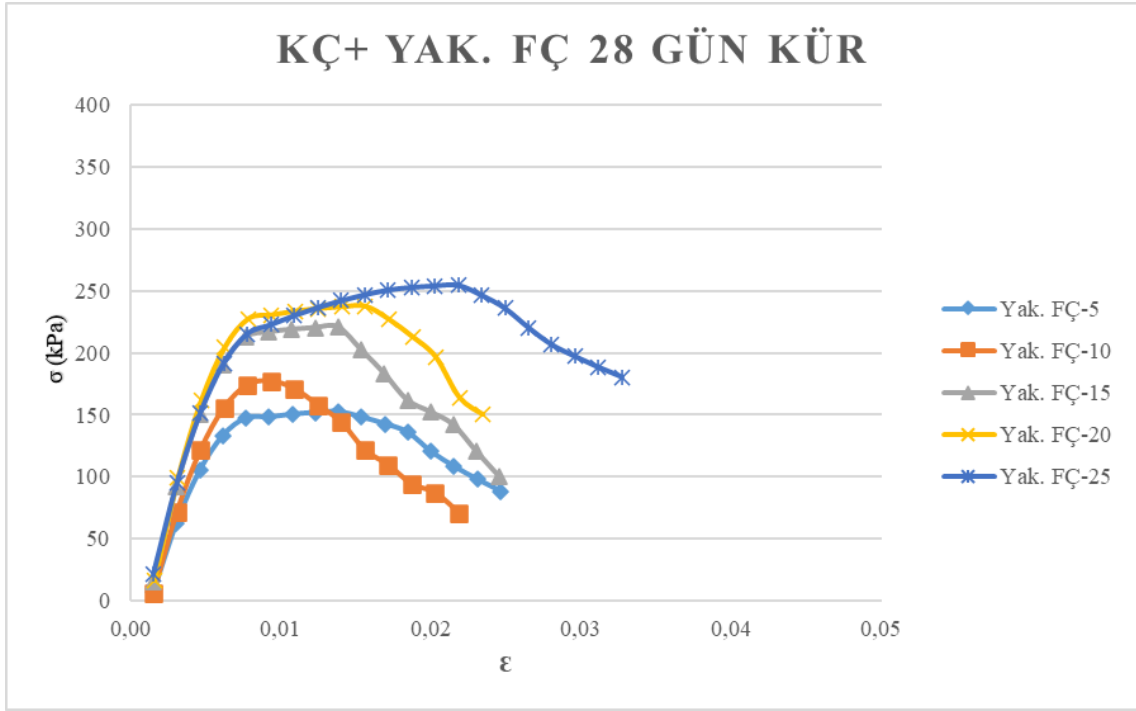
### EK-3 KÇ+Yakılmış FÇ Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları



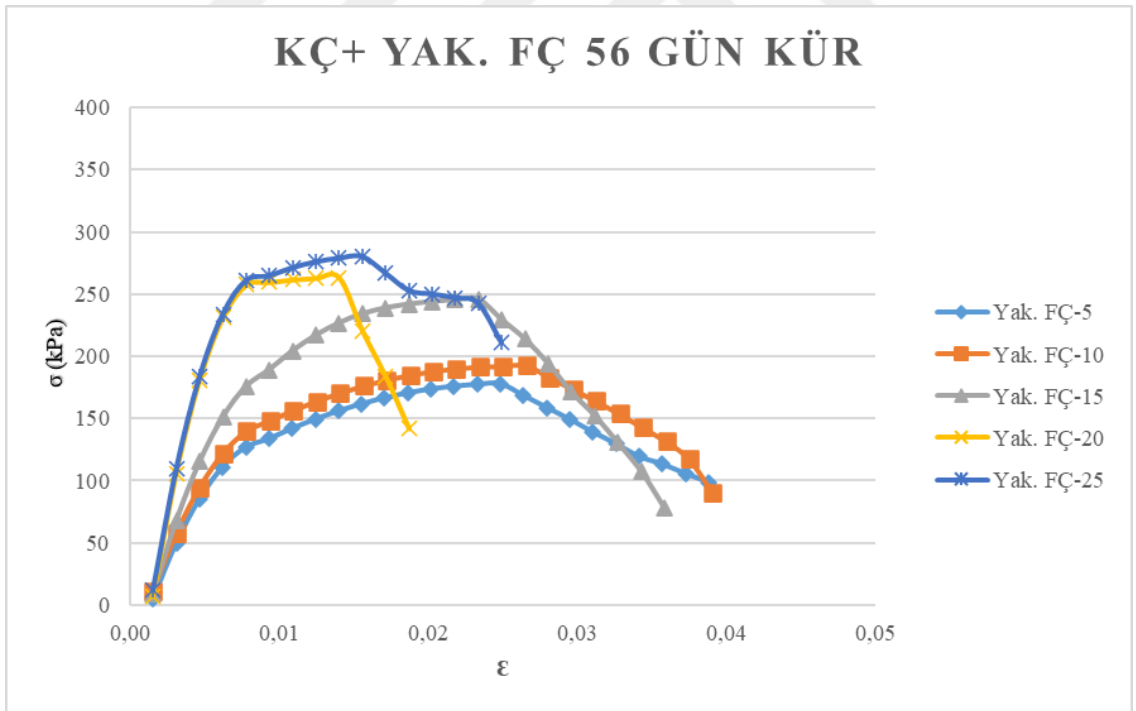
Şekil Ek-3.1. KÇ+Yakılmış FÇ kürsüz numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



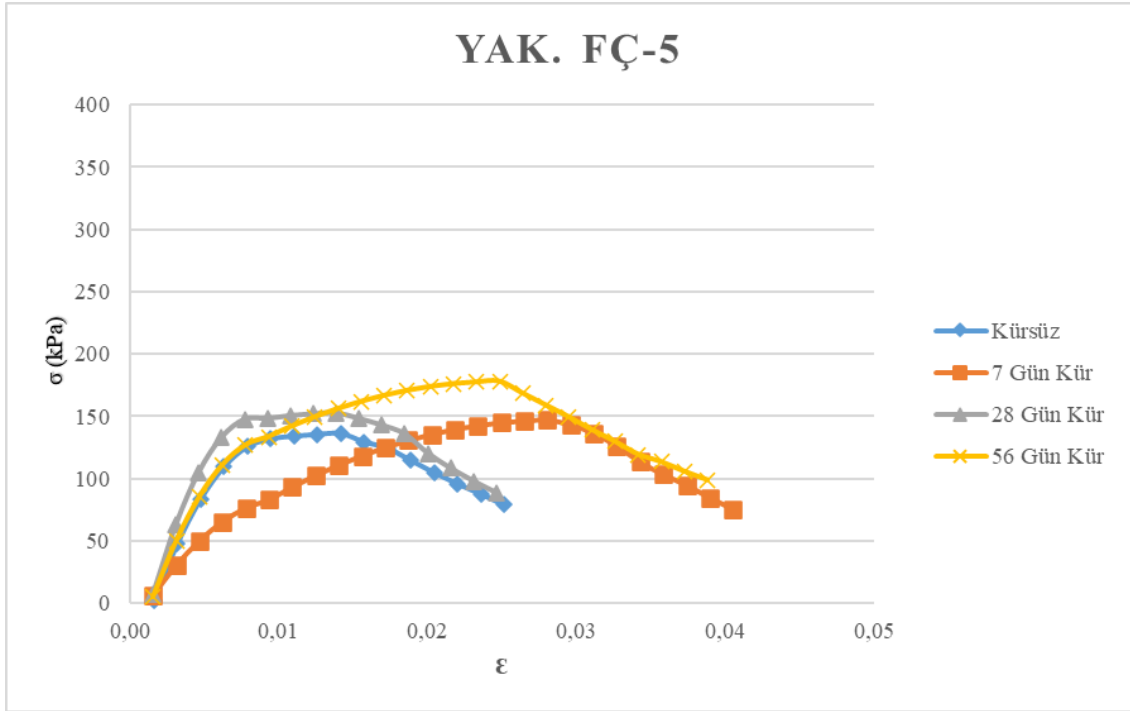
Şekil Ek-3.2. KÇ+Yakılmış FÇ 7 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



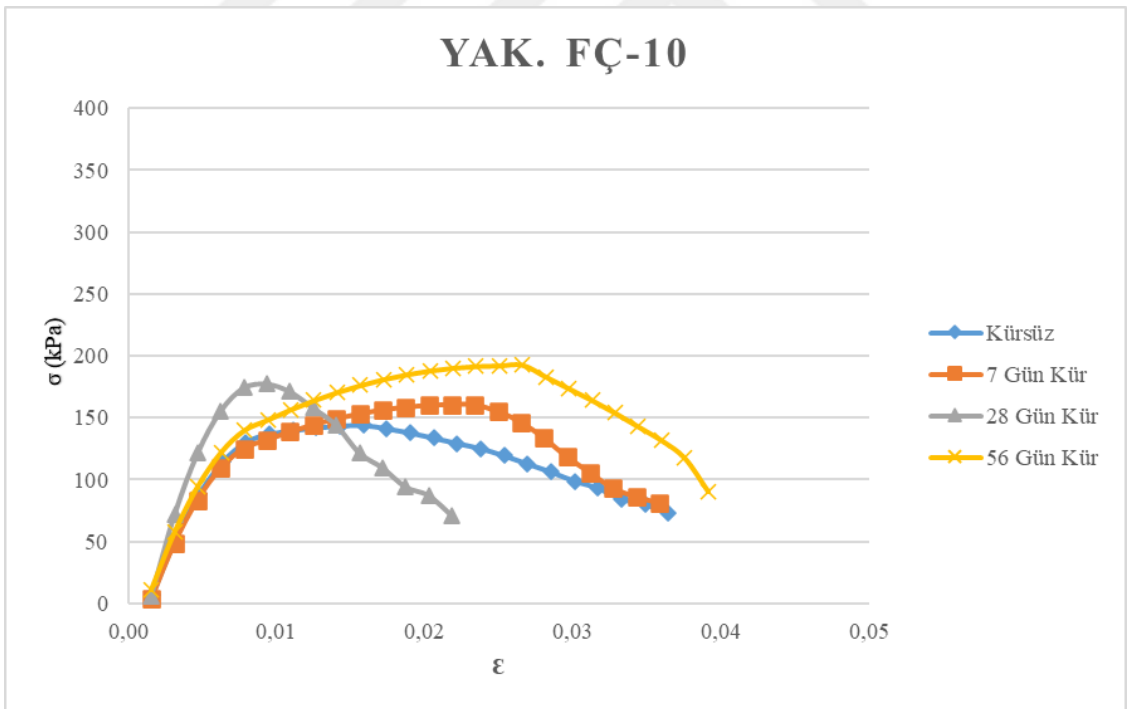
Şekil Ek-3.3. KÇ+Yakılmış FÇ 28 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



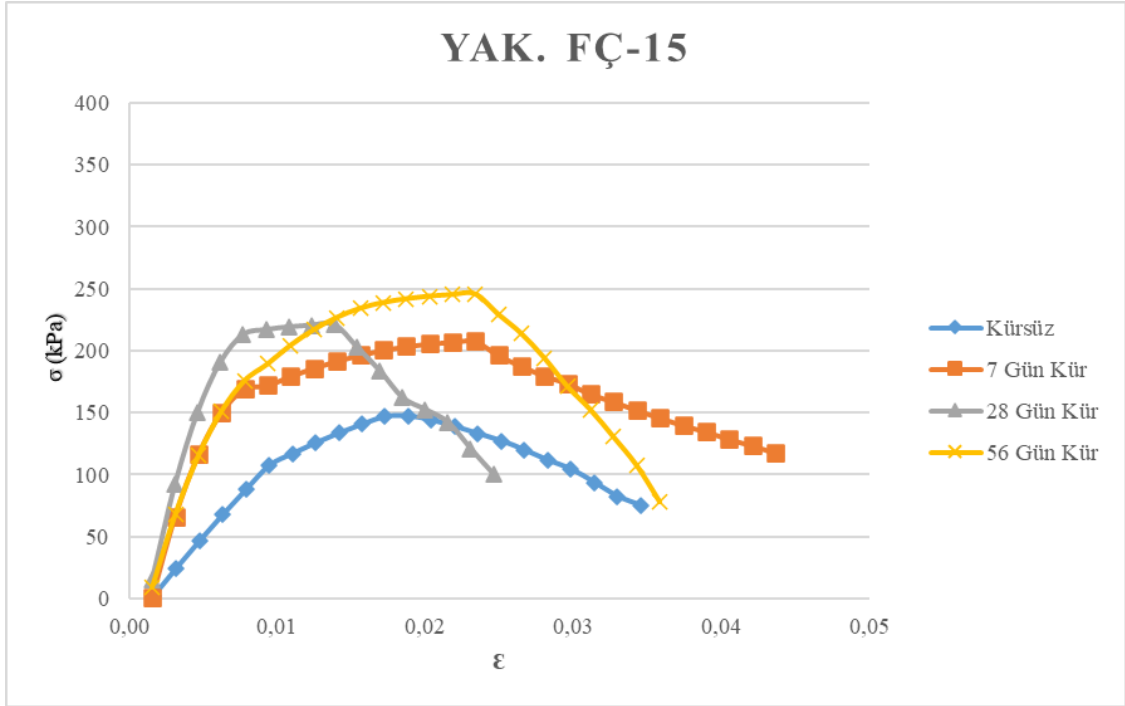
Şekil Ek-3.4. KÇ+Yakılmış FÇ 56 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



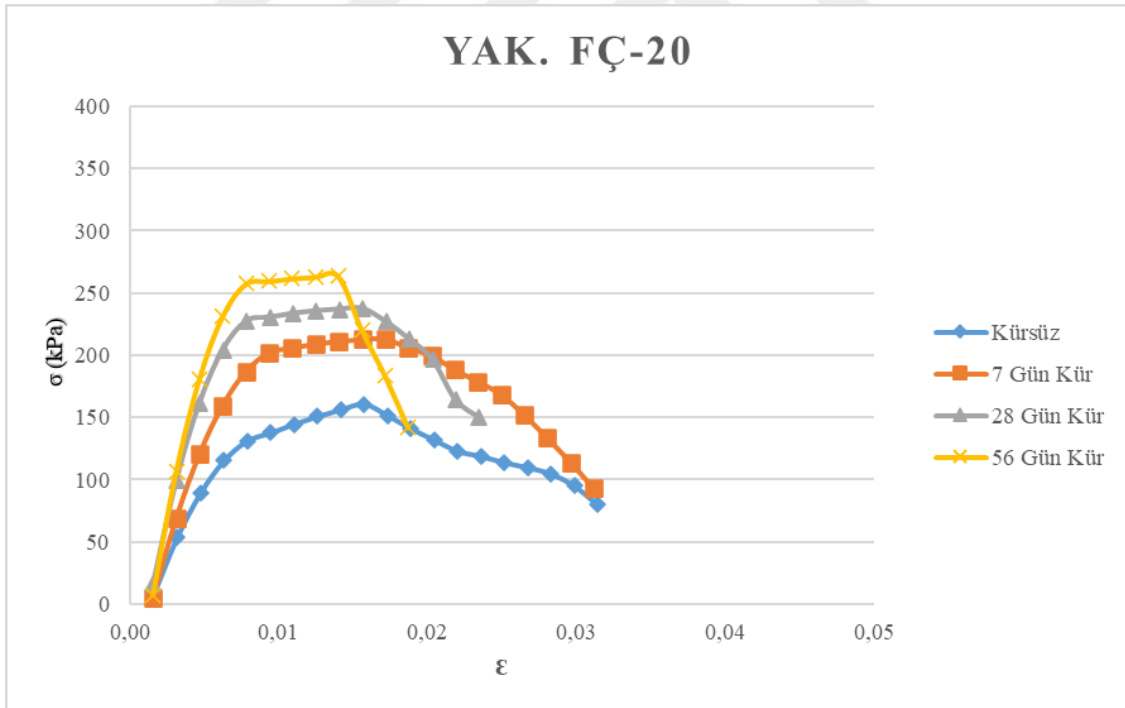
**Şekil Ek-3.5.** %95 KÇ+ %5 Yakılmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



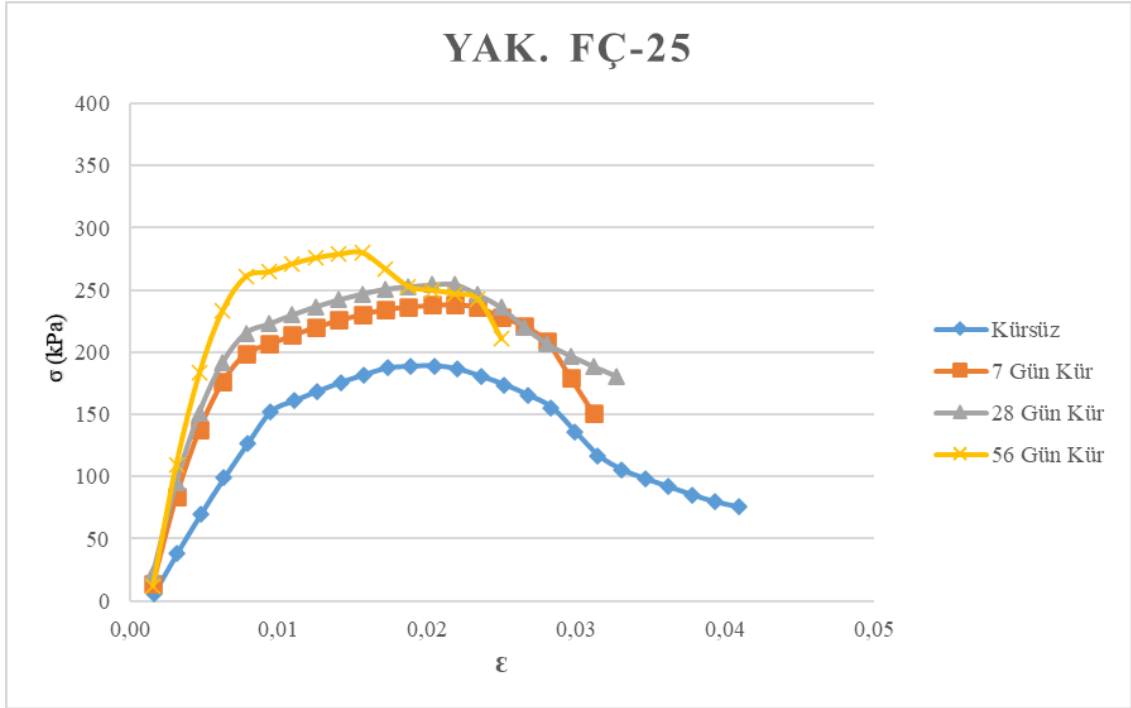
**Şekil Ek-3.6.** %90 KÇ+ %10 Yakılmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



Şekil Ek-3.7. %85 KÇ+ %15 Yakılmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

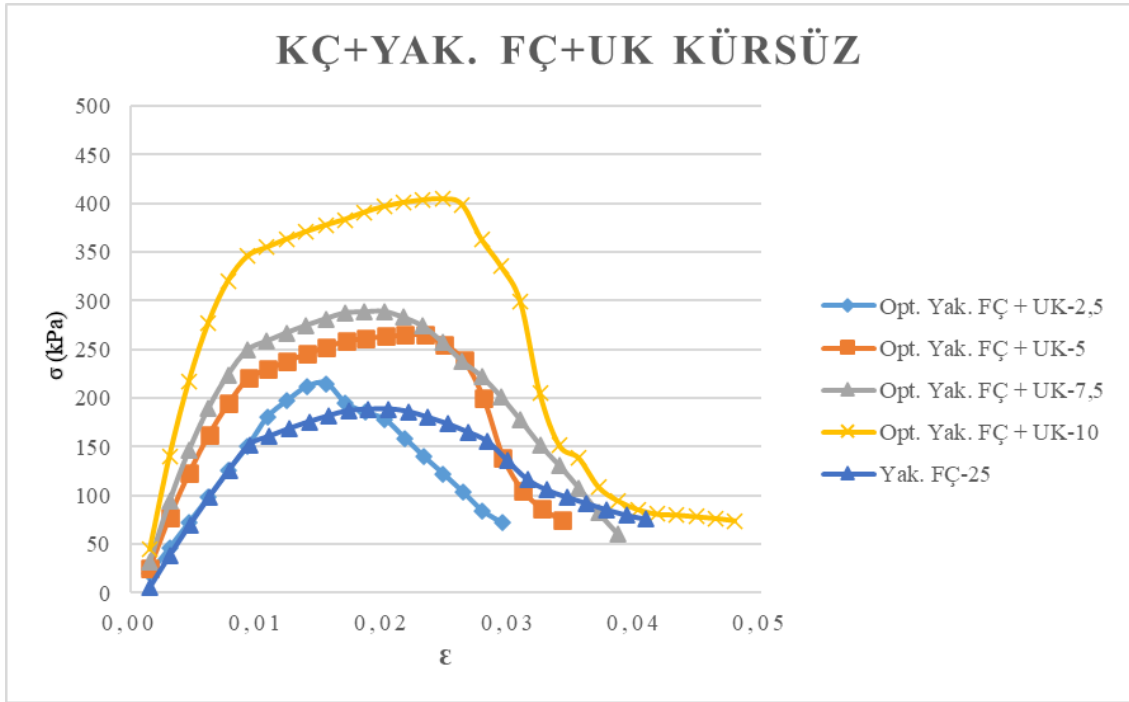


Şekil Ek-3.8. %80 KÇ+ %20 Yakılmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

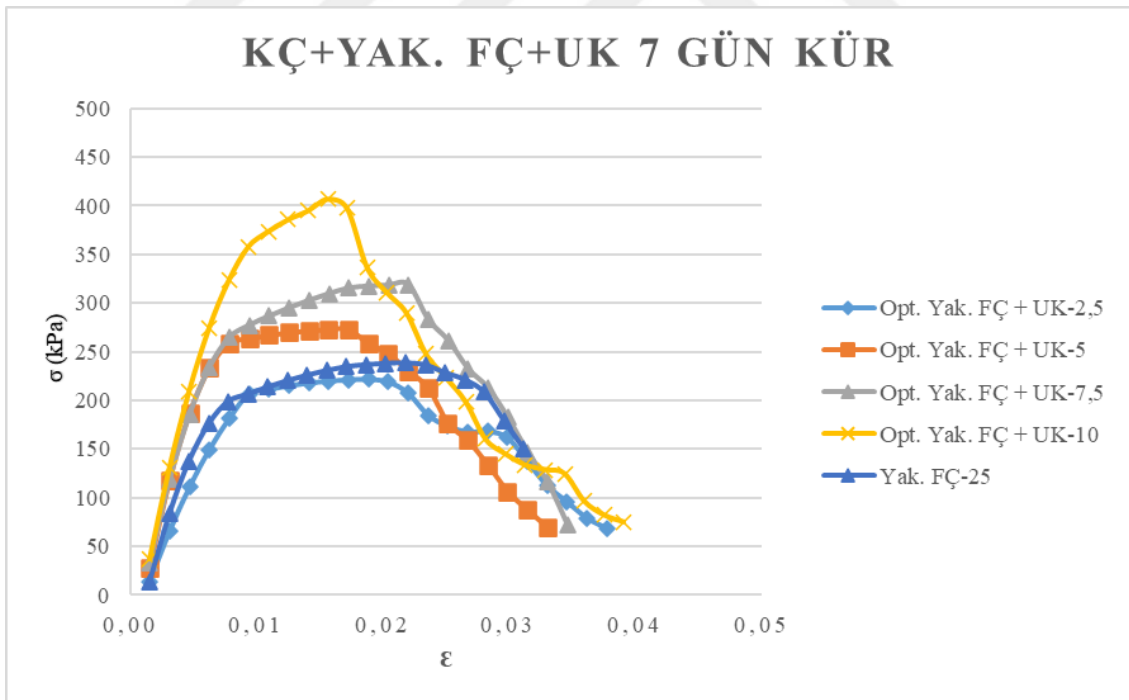


**Şekil Ek-3.9.** %75 KÇ+ %25 Yakılmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

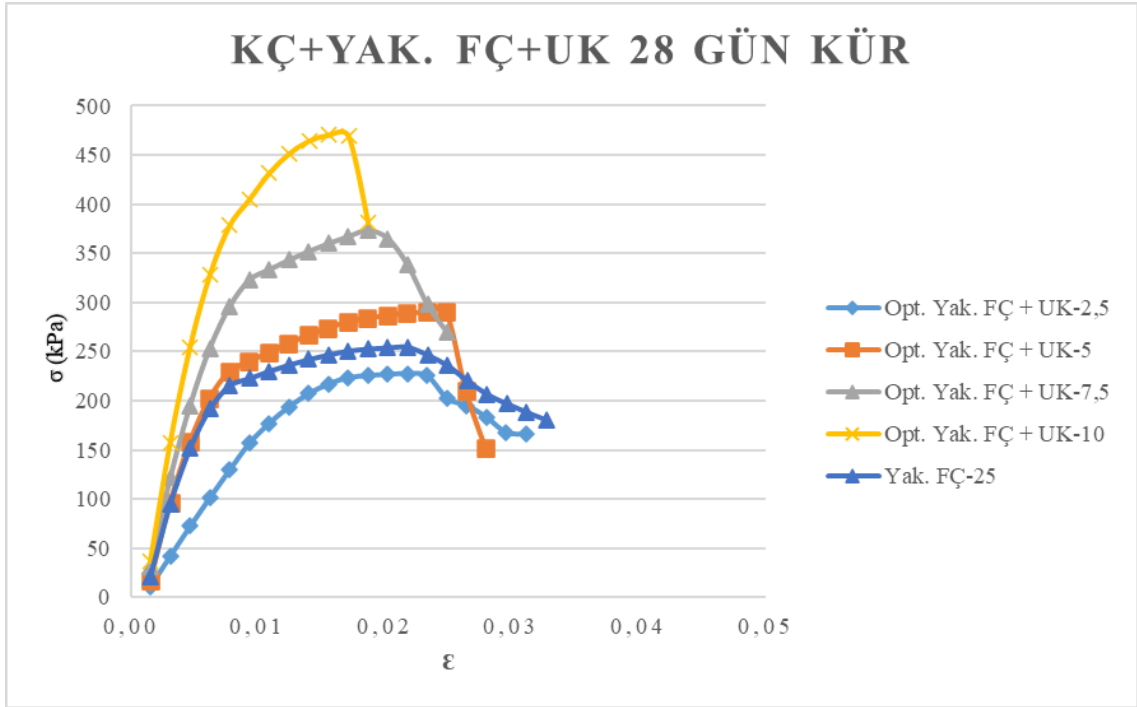
### EK-4 KÇ+Yakılmış FÇ+UK Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları



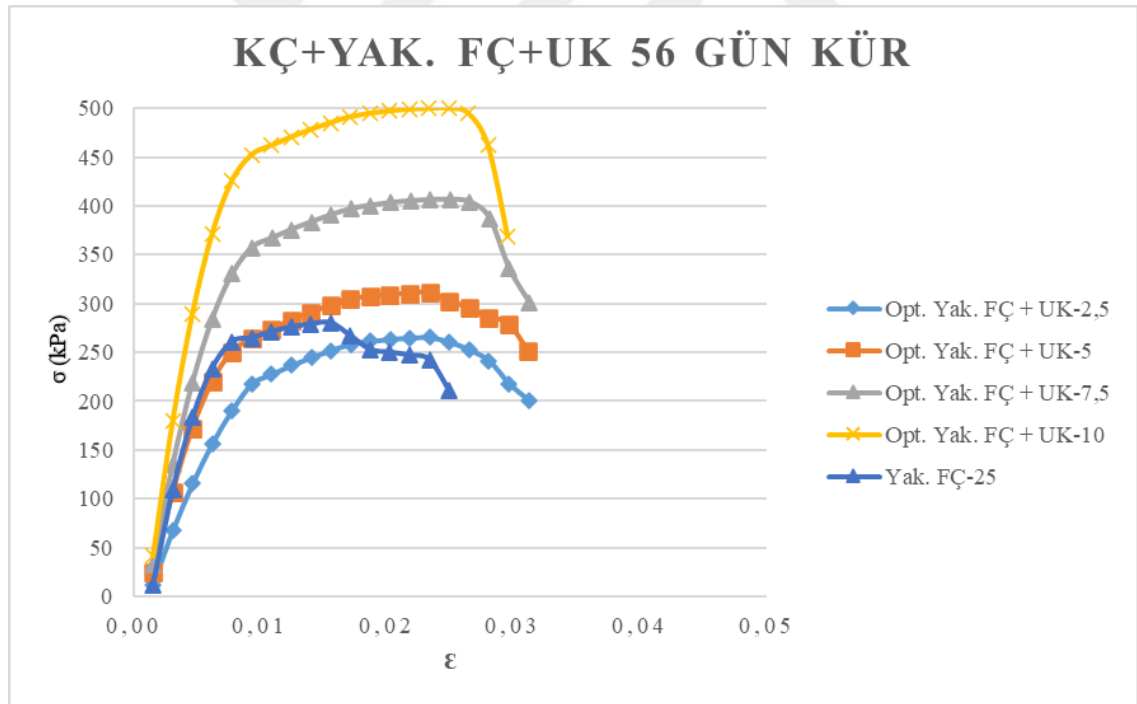
Şekil Ek-4.1. KÇ+Yakılmış FÇ+UK kürsüz numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



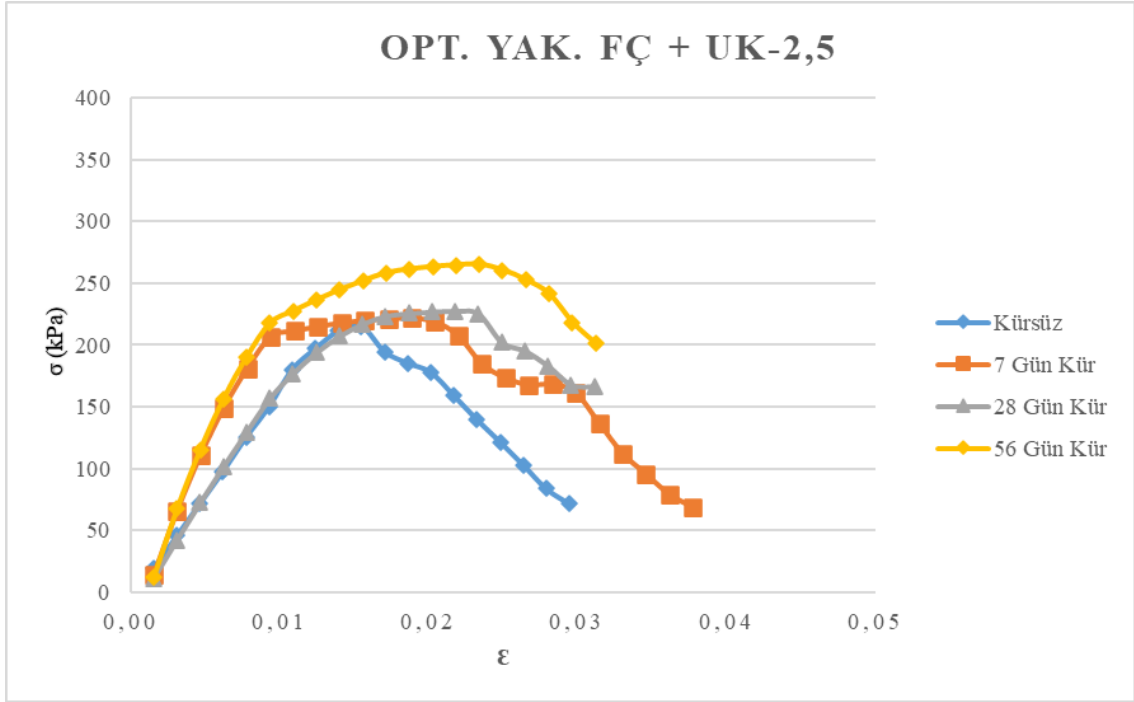
Şekil Ek-4.2. KÇ+Yakılmış FÇ+UK 7 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



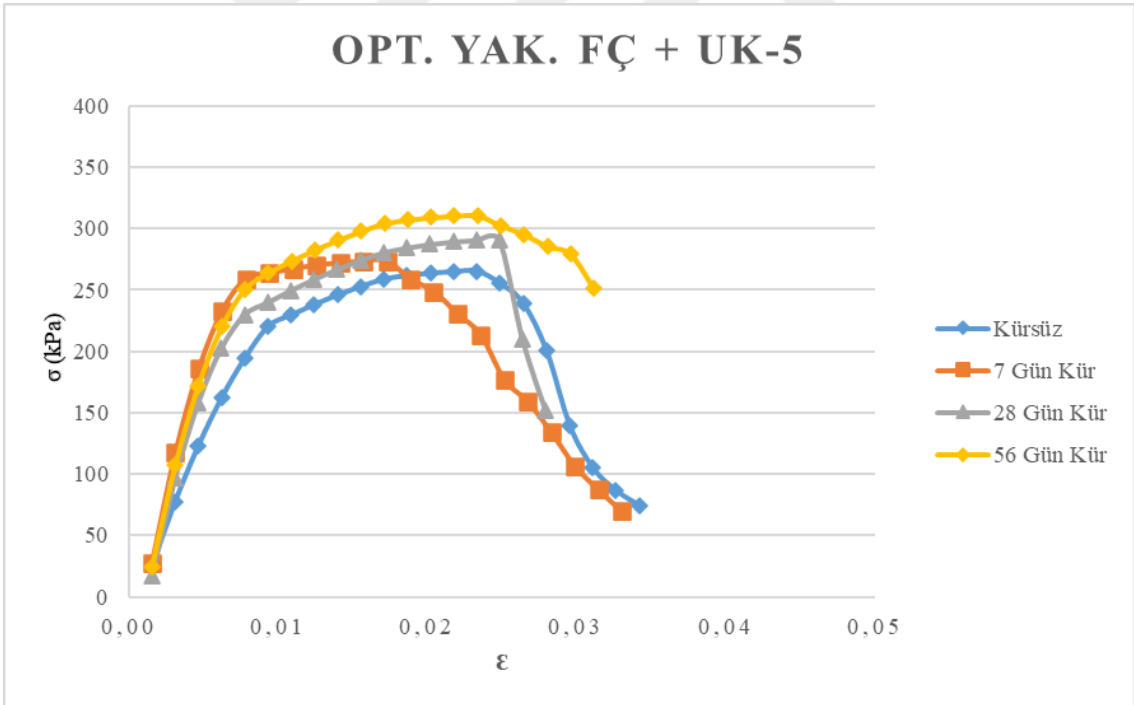
Şekil Ek-4.3. KÇ+Yakılmış FÇ+UK 28 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



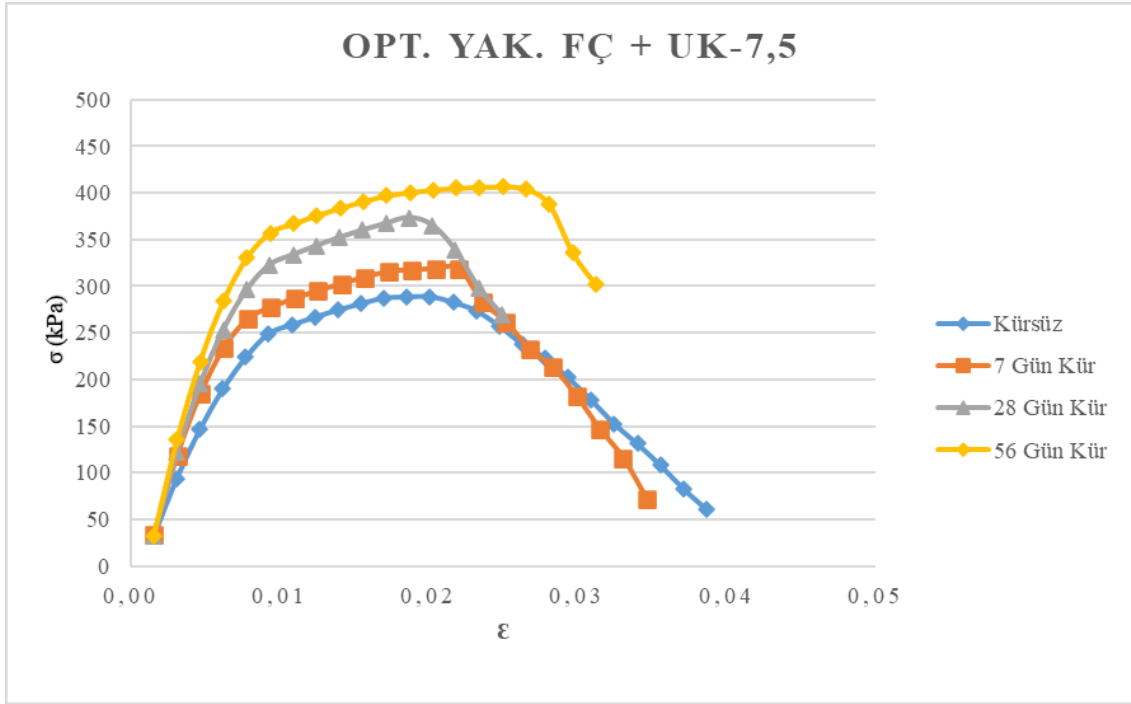
Şekil Ek-4.4. KÇ+Yakılmış FÇ+UK 56 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



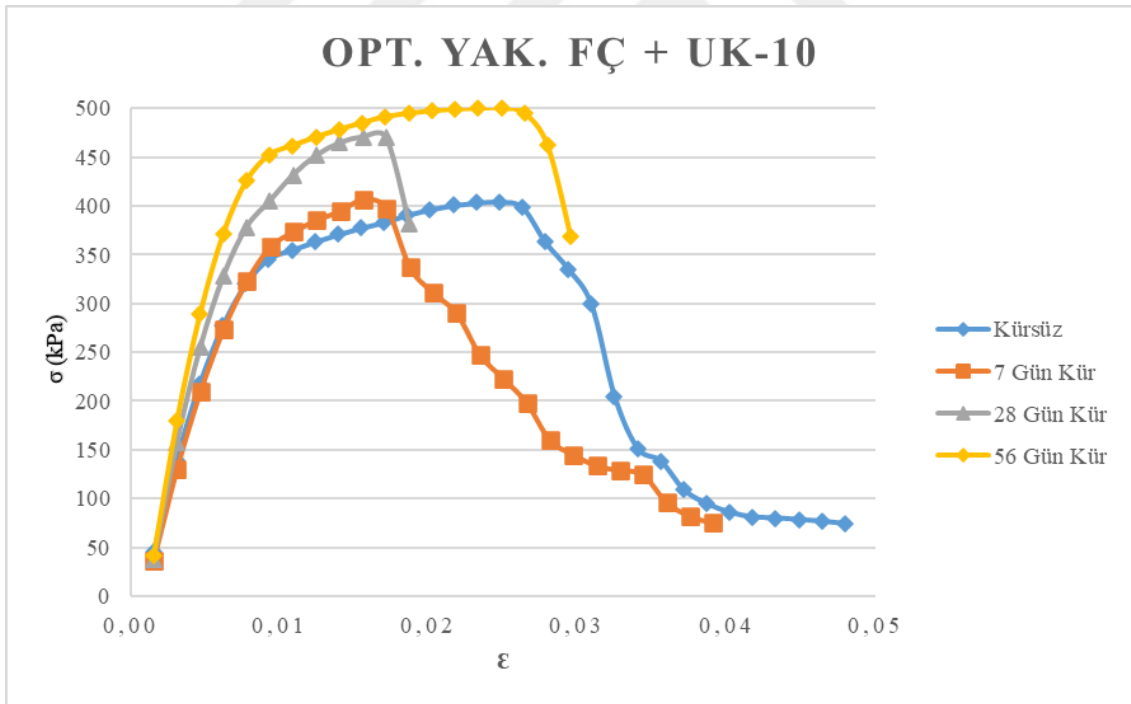
Şekil Ek-4.5. KÇ+Yakılmış FÇ+%2,5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



Şekil Ek-4.6. KÇ+Yakılmış FÇ+%5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

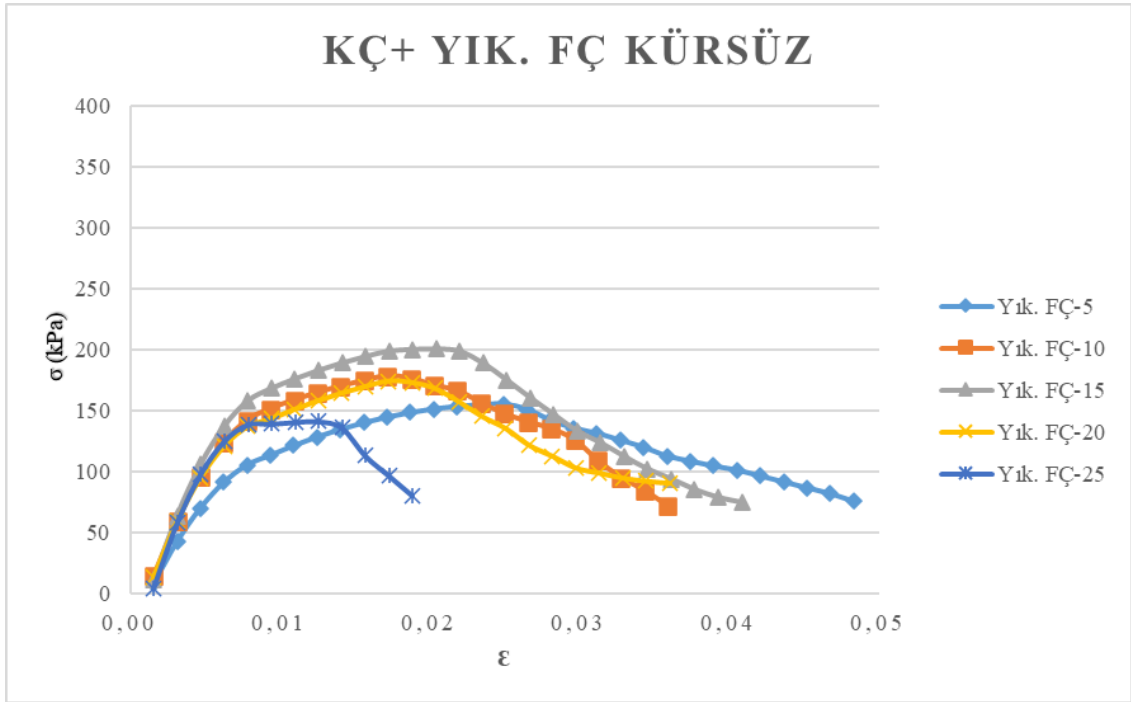


Şekil Ek-4.7. KÇ+Yakılmış FÇ+%7,5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

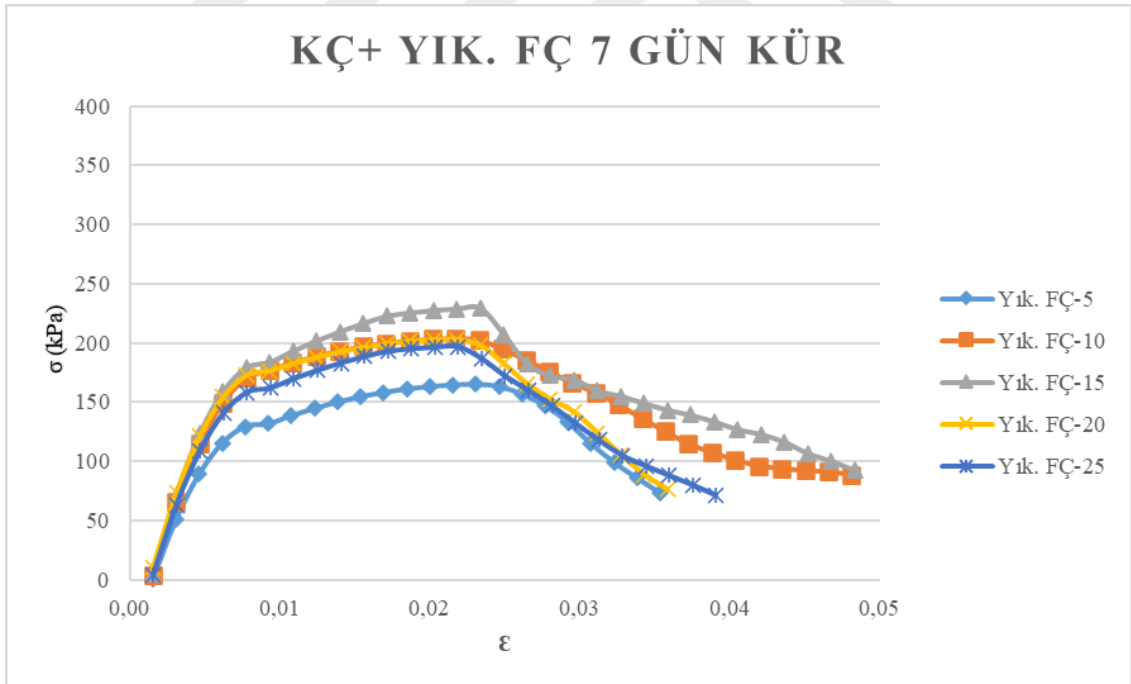


Şekil Ek-4.8. KÇ+Yakılmış FÇ+%10 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

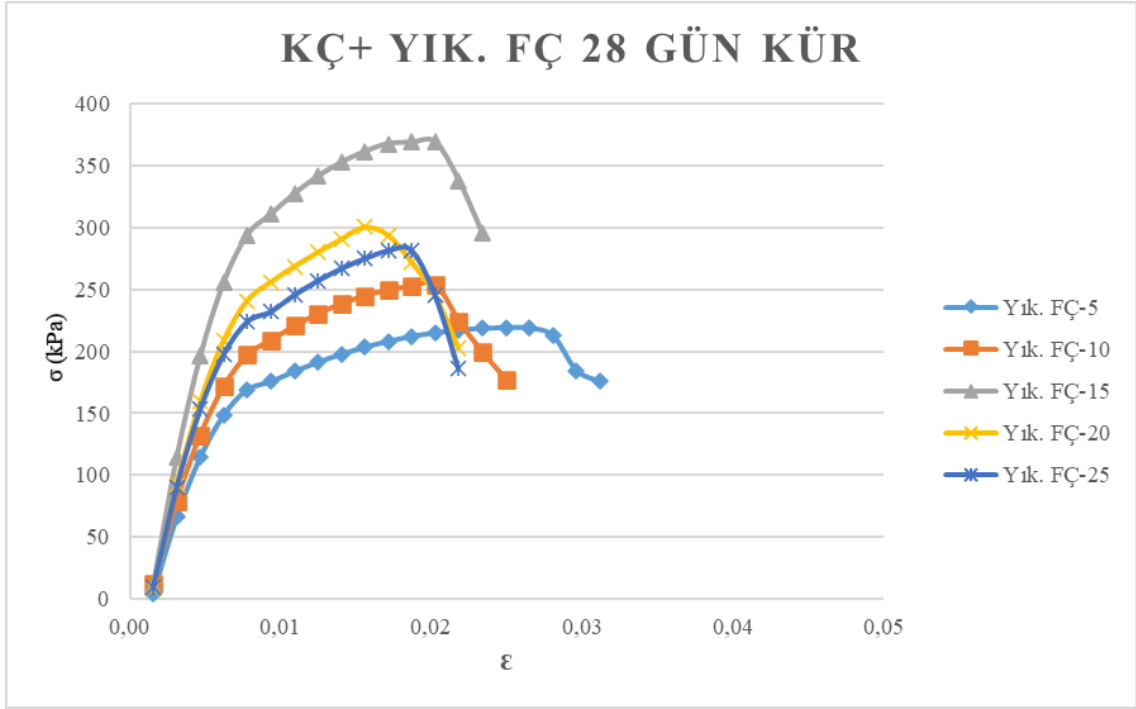
### EK-5 KÇ+Yıkanmış FÇ Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları



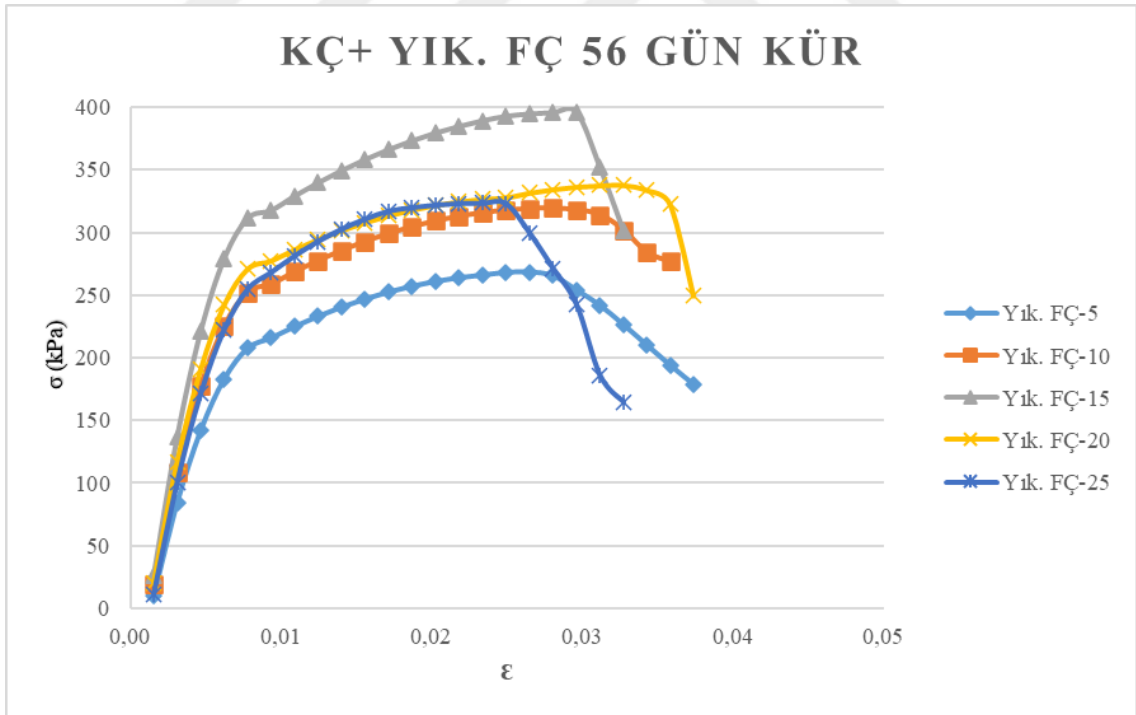
Şekil Ek-5.1. KÇ+Yıkanmış FÇ kürsüz numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



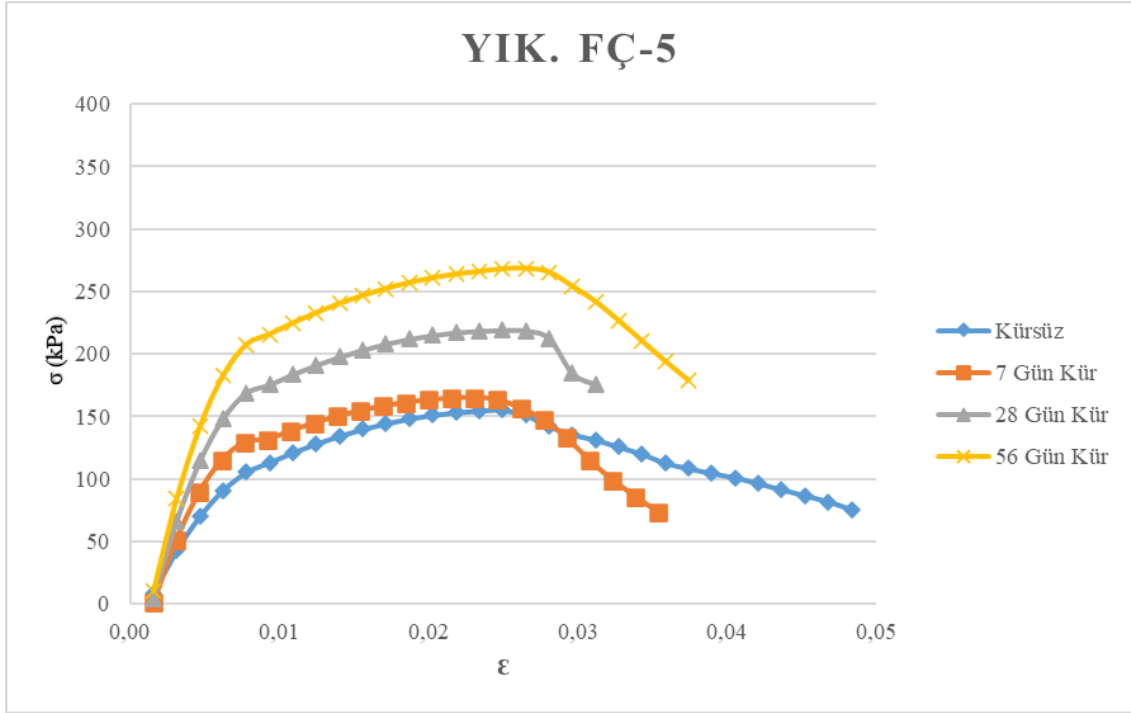
Şekil Ek-5.2. KÇ+Yıkanmış FÇ 7 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



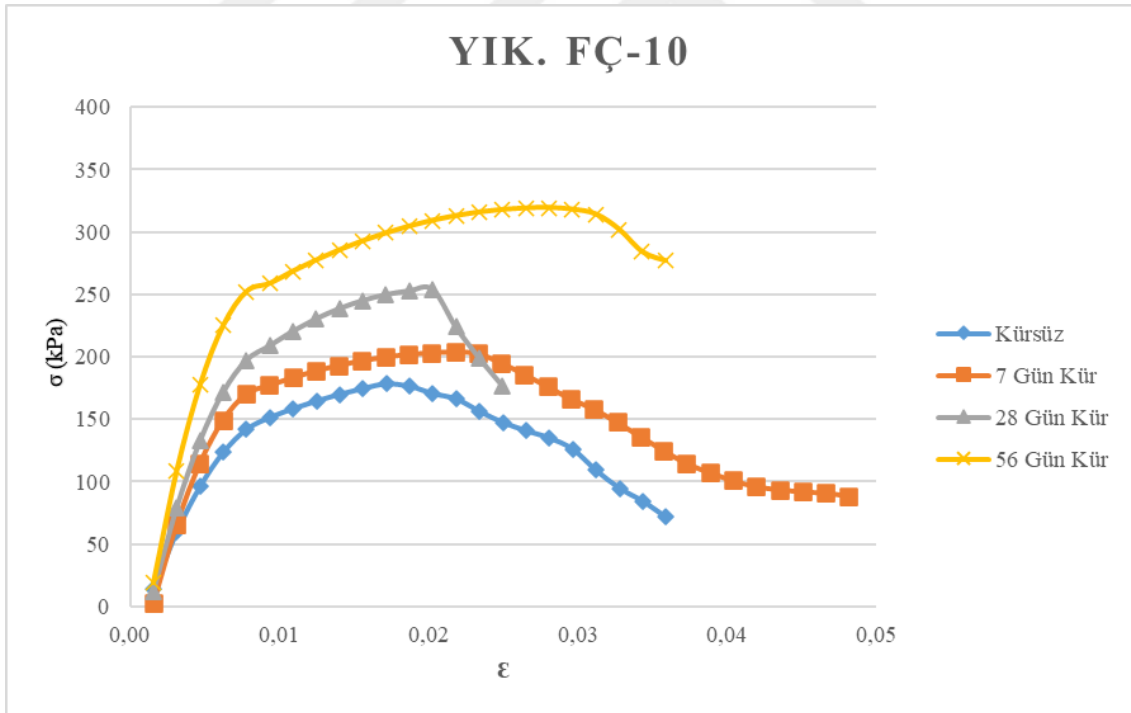
Şekil Ek-5.3. KÇ+Yıkamış FÇ 28 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



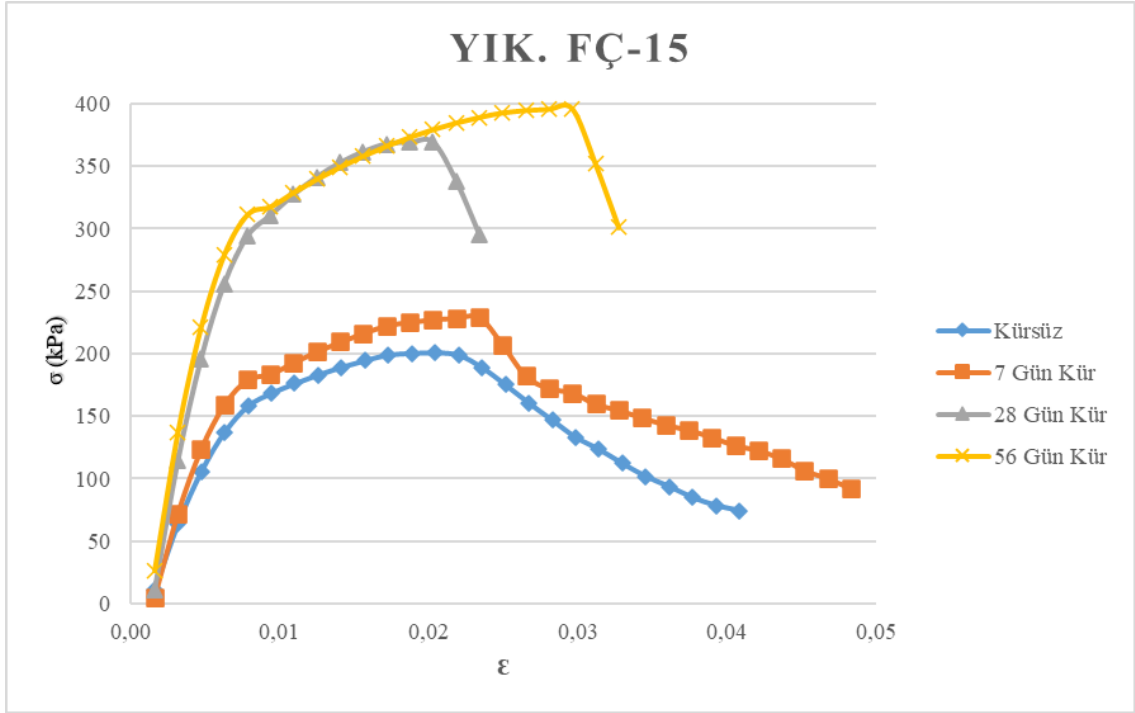
Şekil Ek-5.4. KÇ+Yıkamış FÇ 56 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



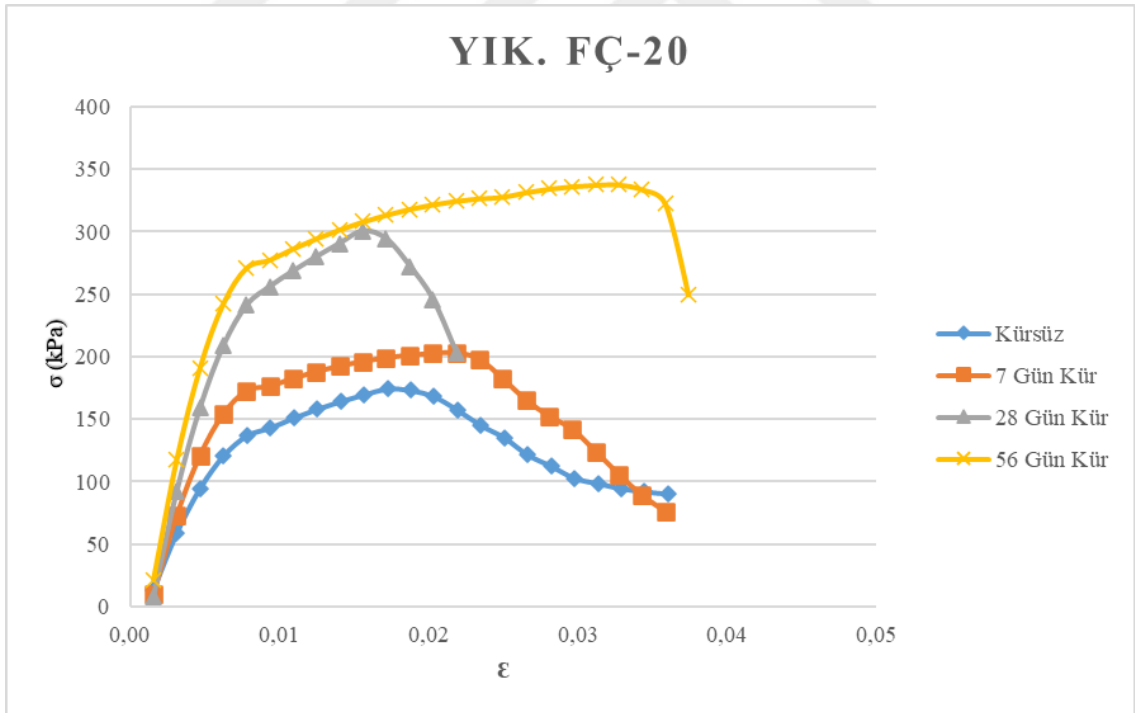
**Şekil Ek-5.5.** %95 KÇ+ %5 Yıkanmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



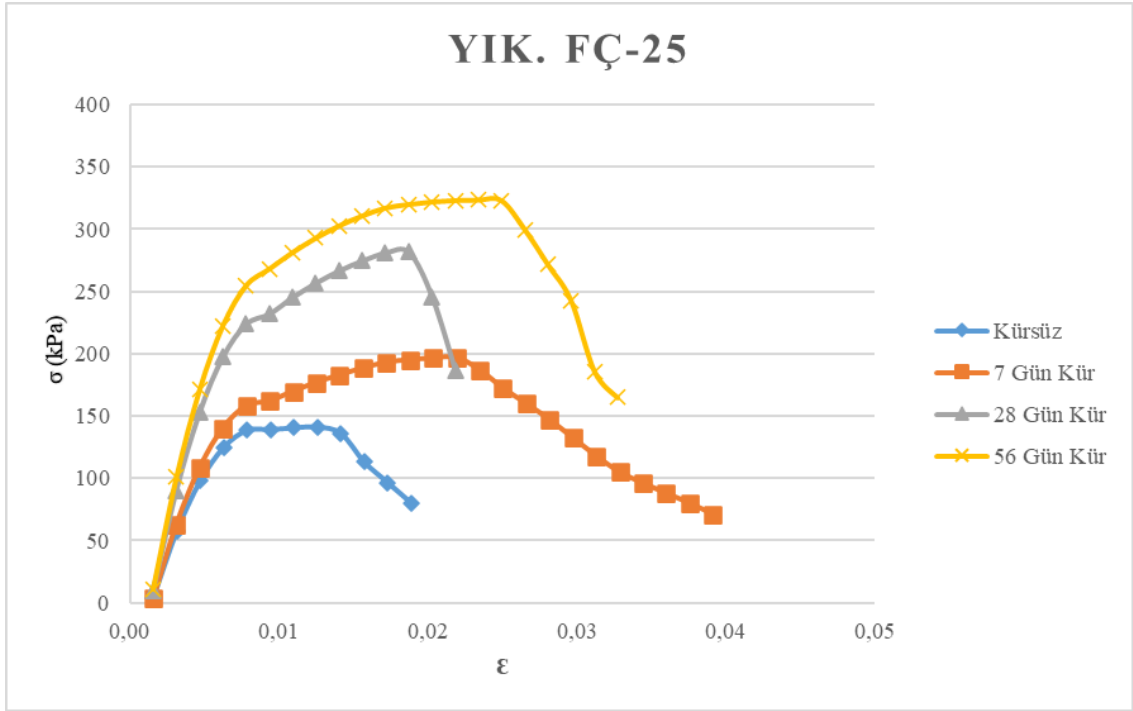
**Şekil Ek-5.6.** %90 KÇ+ %10 Yıkanmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



Şekil Ek-5.7. %85 KÇ+ %15 Yıkanmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

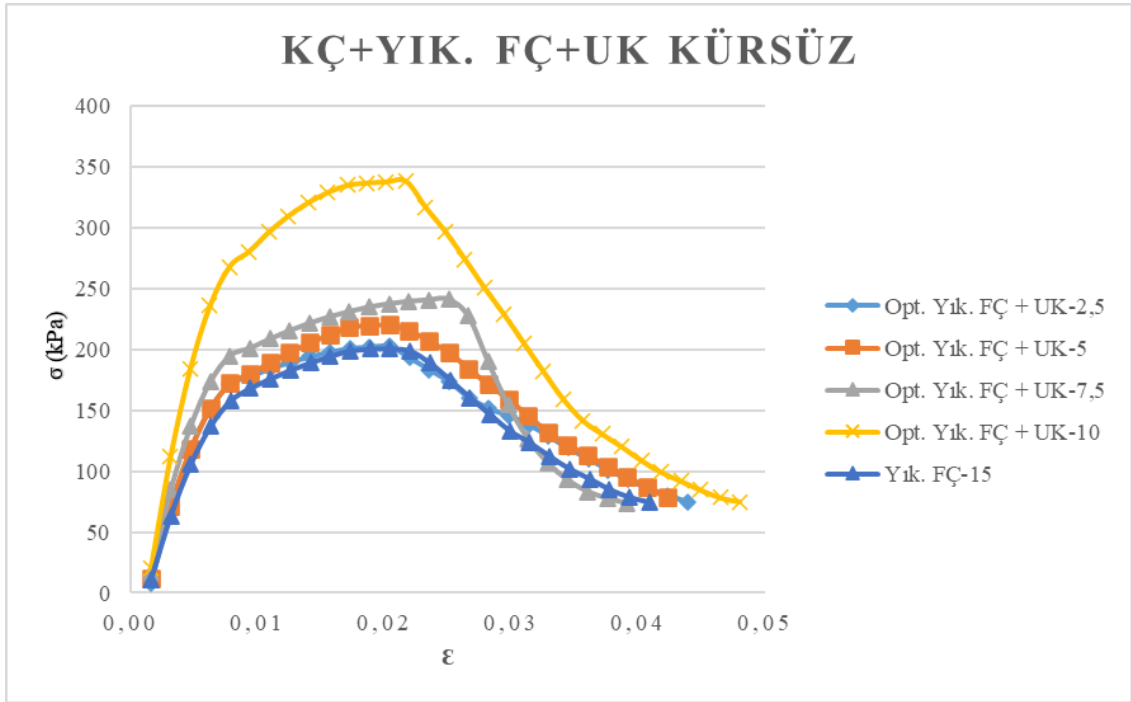


Şekil Ek-5.8. %80 KÇ+ %20 Yıkanmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

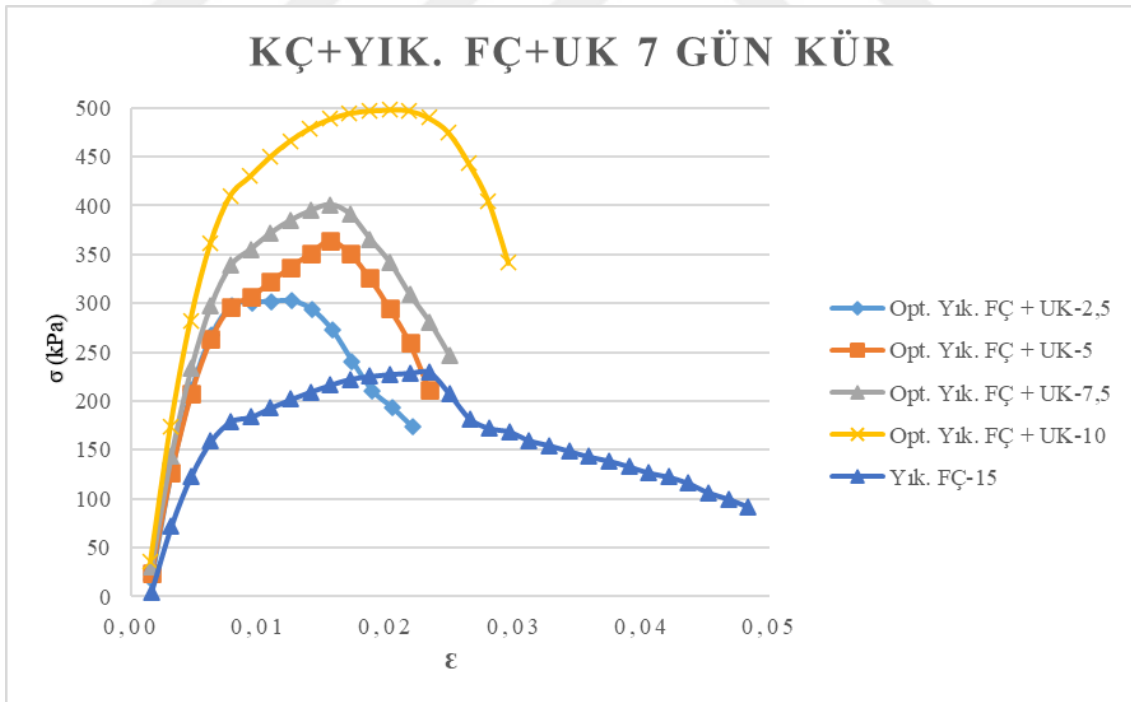


**Şekil Ek-5.9.** %75 KÇ+ %25 Yıkanmış FÇ numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları

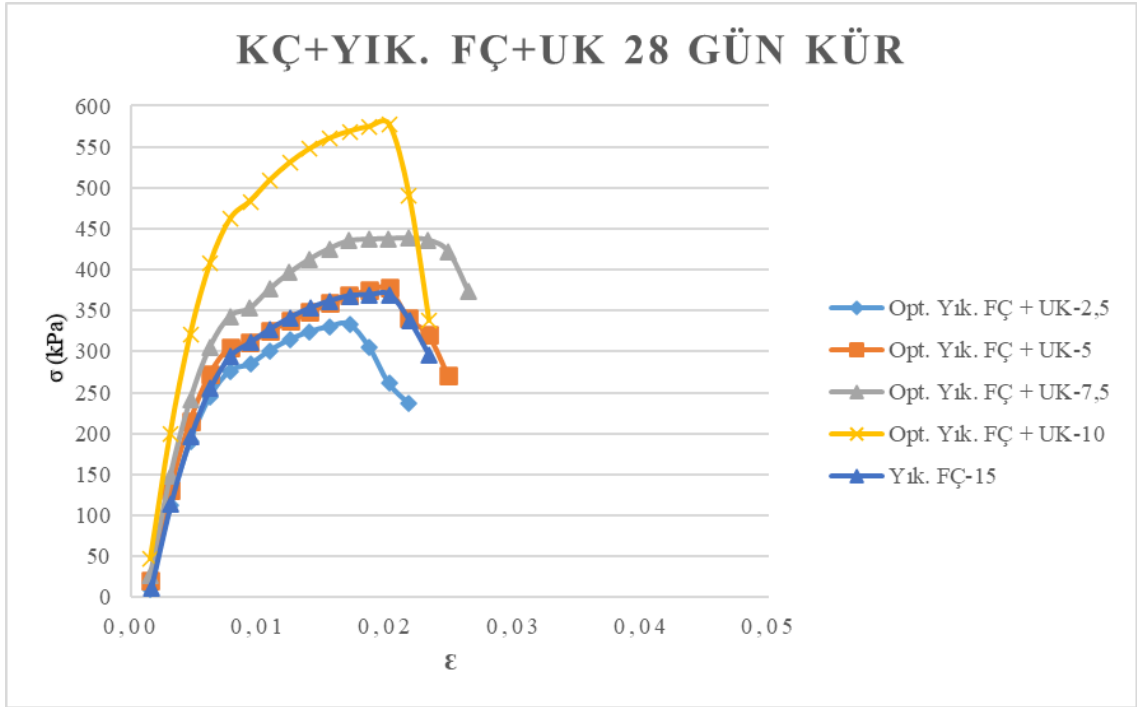
## EK-6 KÇ+Yıkanmış FÇ+UK Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları



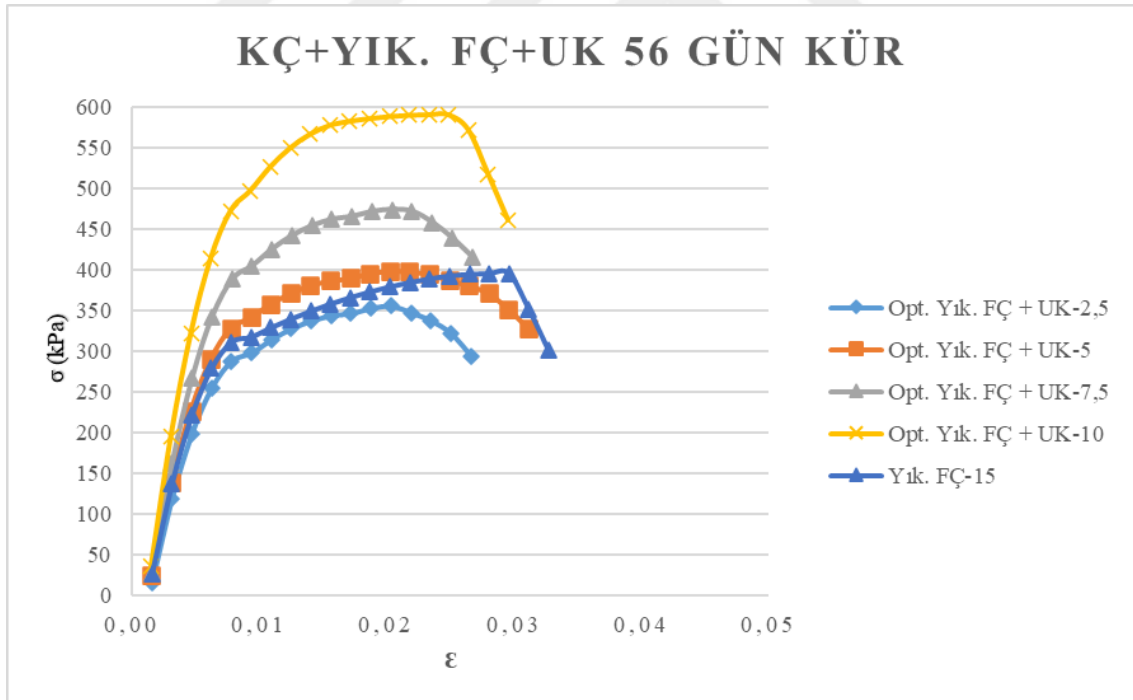
Şekil Ek-6.1. KÇ+Yıkanmış FÇ+UK kürsüz numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



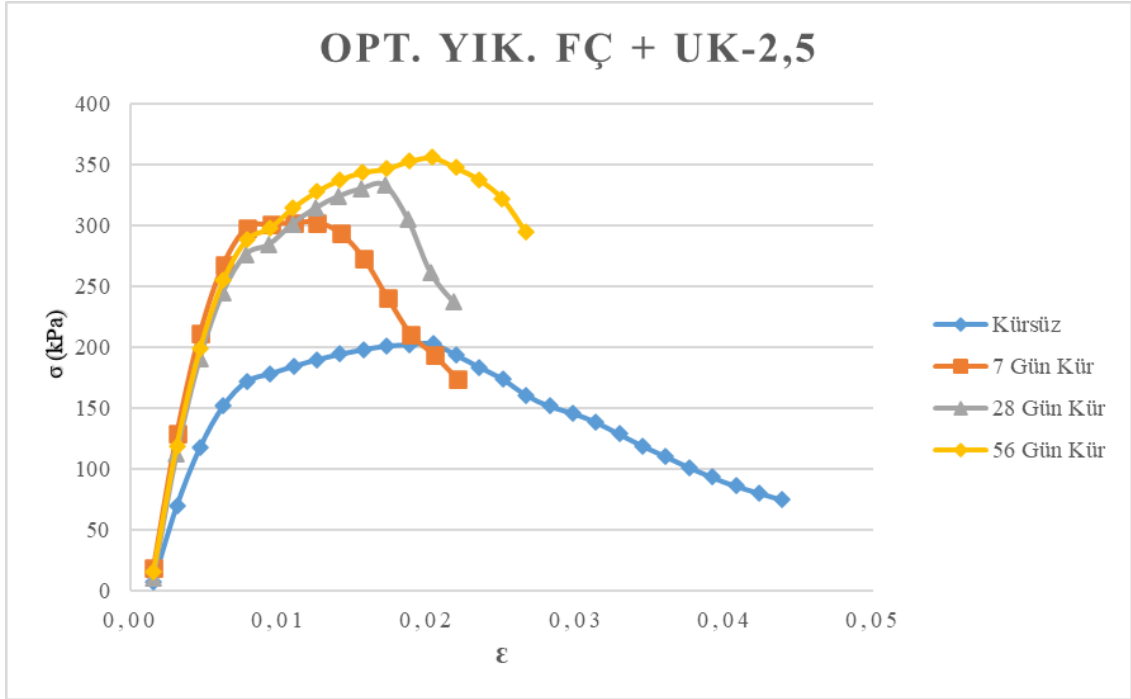
Şekil Ek-6.2. KÇ+Yıkanmış FÇ+UK 7 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



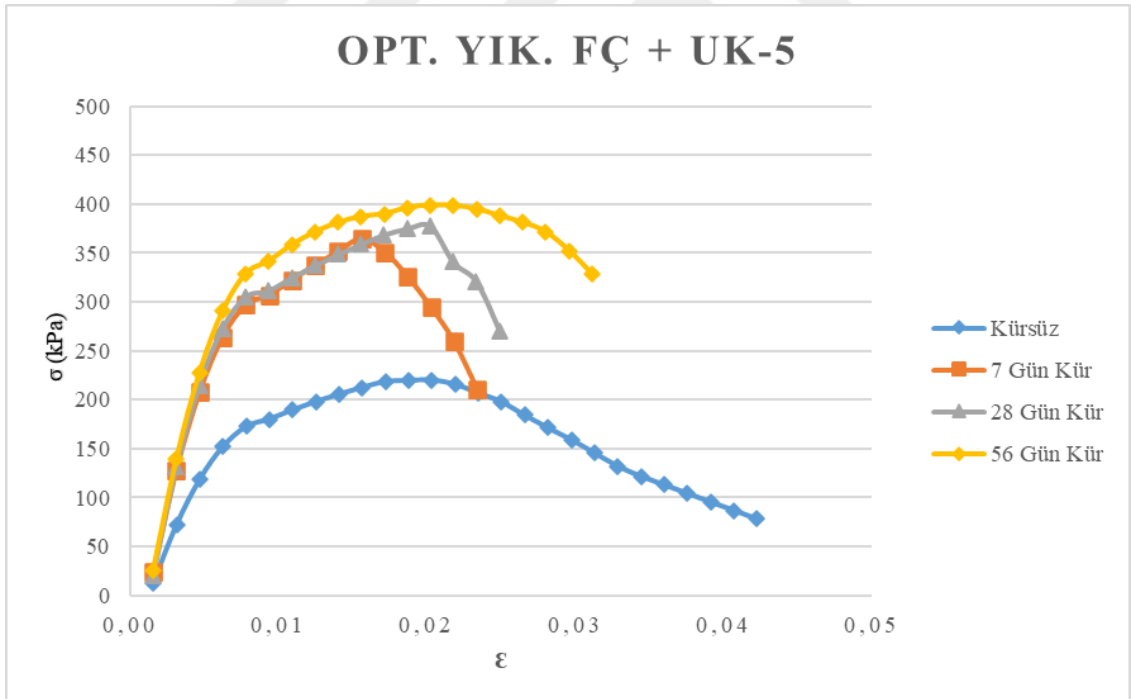
Şekil Ek-6.3. KÇ+Yıkanmış FÇ+UK 28 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



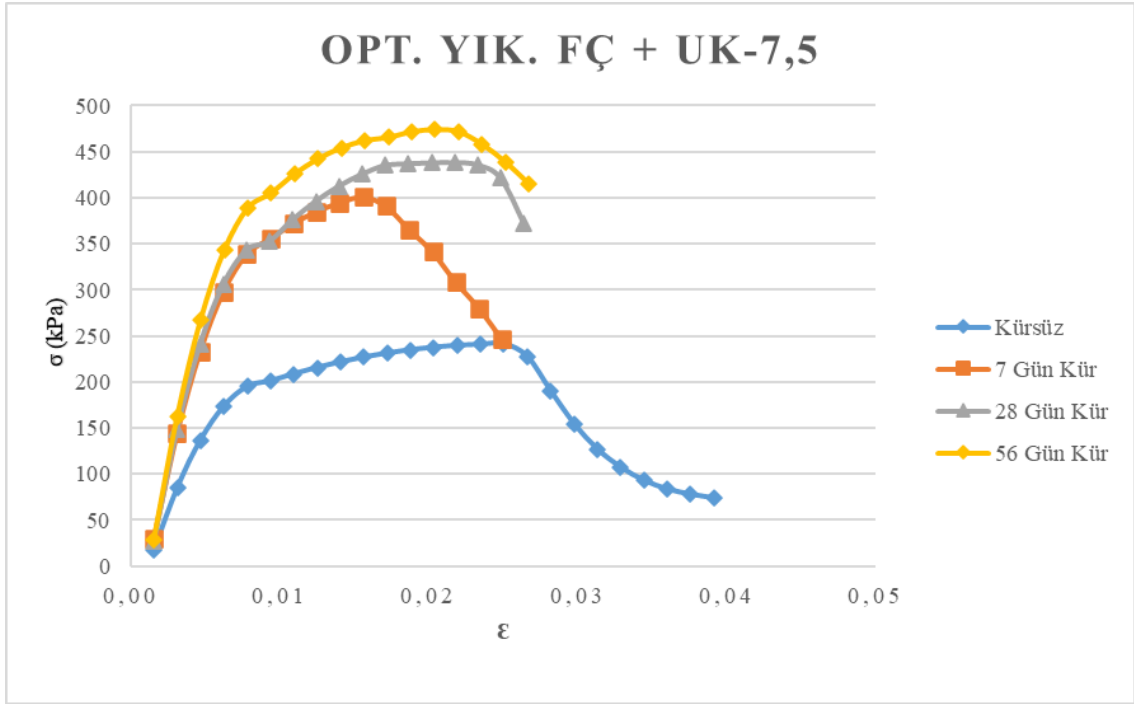
Şekil Ek-6.4. KÇ+Yıkanmış FÇ+UK 56 günlük numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



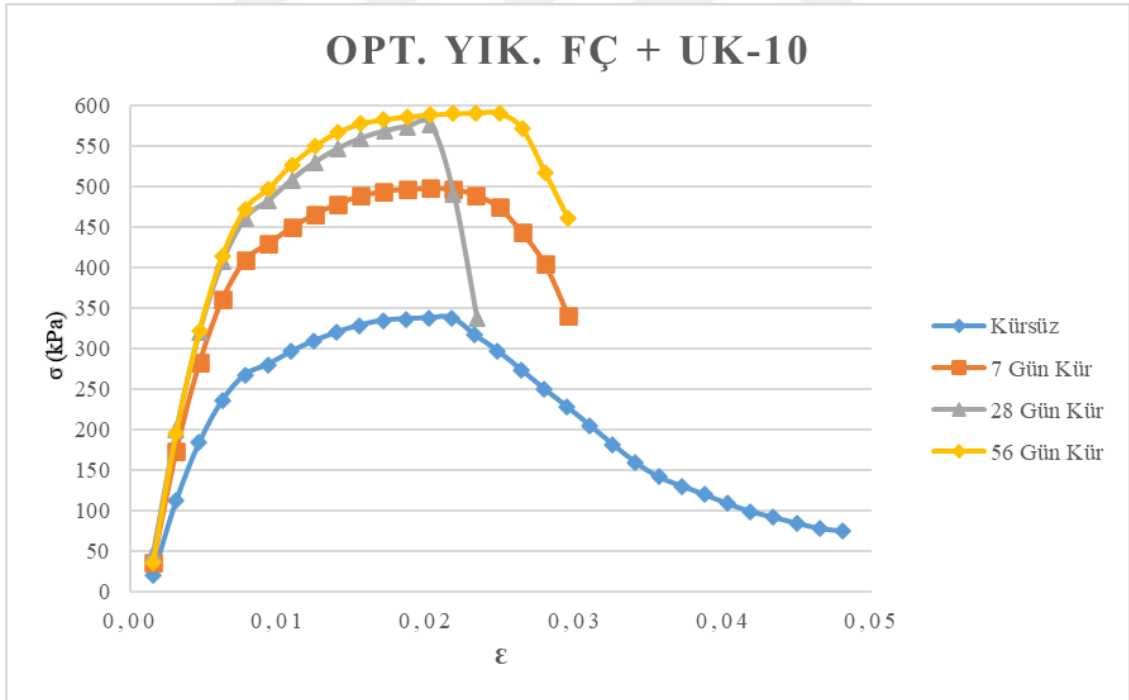
Şekil Ek-6.5. KÇ+Yıkanmış FÇ+%2,5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



Şekil Ek-6.6. KÇ+Yıkanmış FÇ+%5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



Şekil Ek-6.7. KÇ+Yıkanmış FÇ+%7,5 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları



Şekil Ek-6.8. KÇ+Yıkanmış FÇ+%10 UK numunelerin karşılaştırmalı serbest basınç deneyi sonuçları