

**MİKRO FİBER VE UÇUCU KÜL KATKILI  
ÇİMENTO HARÇLARININ DAYANIKLILIK  
İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Esmâ KAVASOĞLU**

**Danışman**

**Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**Haziran 2019**

Bu tez çalışması 17.FEN.BİL.38 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MİKRO FİBER VE UÇUCU KÜL KATKILI ÇİMENTO**  
**HARÇLARININ DAYANIKLILIK İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ**

**Esmâ KAVASOĞLU**

**Danışman**  
**Doç.Dr. Gökhan GÖRHAN**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**Haziran 2019**

## TEZ ONAY SAYFASI

Esmâ KAVASOĞLU tarafından hazırlanan “Mikro Fiber ve Uçucu Kül Katkılı Çimento Harçlarının Dayanıklılık İndeksinin Belirlenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 13/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** :Doç.Dr. Gökhan GÖRHAN

**Başkan** : Doç. Dr. Mehmet CANBAZ  
Eskişehir Osmangazi Ün., Mühendislik Fak.

**Üye** : Doç.Dr. Gökhan GÖRHAN  
Afyon Kocatepe Ün., Mühendislik Fak.

**Üye** : Dr. Öğretim Üyesi Gökhan KÜRKLÜ  
Afyon Kocatepe Ün., Mühendislik Fak.

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun  
...../...../2019 tarih ve  
.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....  
Prof. Dr. İbrahim EROL  
Enstitü Müdürü

**BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**  
**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

13/06/2019



**Esmâ KAVASOĞLU**

**ÖZET**  
Yüksek Lisans Tezi

**MİKRO FİBER VE UÇUCU KÜL KATKILI ÇİMENTO HARÇLARININ  
DAYANIKLILIK İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ**

Esmâ KAVASOĞLU  
Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç.Dr. Gökhan GÖRHAN

Yapılan çalışmada hammadde olarak CEM I 42.5 R tipi çimento ve uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Uçucu kül, Kütahya Tunçbilek Termik Santralinden tedarik edilmiştir. Harçların üretiminde 3 farklı boyda (6 mm, 12 mm ve 24 mm) lif kullanılmıştır.

Harç numunelerinin hazırlanmasında hammadde olarak kullanılan çimento ve UK malzemeleri en iyi tepkimeyi verecek şekilde farklı oranlarda karıştırılmıştır. Karışımlara toplam bağlayıcı miktarına göre % 0.5 oranında lif ilave edilmiştir. Laboratuvar tipi çimento mikserde hazırlanan karışımlar 4 x 4 x 16 cm ebatlarında metal kalıplara vibrasyon yöntemiyle yerleştirilmiştir. Kalıplarda priz alması beklenen örnekler bir gün bekletilmiş ve kalıptan alınarak su tankına yerleştirilmiştir. 28 ve 90 günlük kür süresinin ardından harç numunelerinin fiziksel özellikleri Arşimet prensibine göre belirlenmiştir. Ardından numunelerin basınç ve eğilme dayanım testleri (28 ve 90 günlük) yapılmıştır.

Numunelerin donatıya karşı durabilite indeksinin belirlenebilmesi amacıyla seçilen örnekler üzerinde bazı fiziksel deneyler ve civalı porozimetre deneyi uygulanmıştır. Elde edilen bulgulara göre; 90 günlük numunelerde % 20'ye kadar yapılan UK ikame oranlarının basınç dayanımlarını arttırdığı tespit edilmiştir. 28 günlük R1228 kodlu numuneler 46.4 MPa, 90 günlük 2U1290 kodlu numuneler ise 49.1 MPa ile en yüksek basınç dayanım değerini vermiştir. Sonuç olarak, kür süresinin artması ile birlikte numunelerin

dayanımlarında artış olduğu ve ikame edilen UK oranlarının % 30 ve üzeri olduğu numunelerde su emme kapasitesinin arttığı ve neticede mekanik dayanımın azaldığı tespit edilmiştir. Durabilite indeksi verileri dikkate alındığında ise bünyeye eklenen UK ikamesinin durabilite özelliklerini geliştirdiği bununla birlikte lif boylarının ise değişken sonuçlar vermekle birlikte durabilite açısından 12 mm'lik lif kullanımının daha uygun olduğu kanaatine varılmış olup genelde örneklerin tümünün yeterli donma direnci durabilitesine sahip olduğu düşünölmektedir.

**2019, xi + 64 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Durabilite indeksi, Uçucu kül, Mikro fiber, Harç.

## **ABSTRACT**

M.Sc. Thesis

### **DETERMINATION OF DURABILITY INDEX OF CEMENT MORTARS WITH MICRO FIBER AND FLY ASH**

Esma KAVASOĞLU

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

**Supervisor:** Assoc. Prof. Gökhan GÖRHAN

In the study, CEM I 42.5 R type cement and fly ash (UK) were used as raw material. Fly ash is obtained from the Tunçbilek Thermal Power Plant in Kütahya. Three different sizes (6 mm, 12 mm and 24 mm) fiber are used in the production of mortars.

Cement and UK materials used as raw materials in the preparation of mortar samples were mixed at different rates to give the best reaction. 0.5% fiber was added to the mixtures according to the total amount of binder. Mixtures prepared in laboratory type cement mixer are placed on metal molds with dimensions of 4 x 4 x 16 cm by vibration method. The samples that were expected to be set in the molds were kept for one day and were taken from the mold and placed in the water tank. After 28 and 90 days of curing time, physical properties of mortar samples were determined according to Archimedes' principle. Then, compressive and flexural strength tests of the samples (28 and 90 days) were performed.

In order to determine the durability index of the samples against frost, some physical and mercury porosimeter tests were applied on the selected samples. According to the findings; it was determined that the UK substitution rates up to 20% in 90 day samples increased the compressive strengths. Samples with R1228 code of 28 days gave the highest compressive strength with 46.4 MPa and 90 days with 2U1290 samples with 49.1

MPa. As a result, it was determined that the strength of the samples increased with the increase in the curing time and the water absorption capacity increased in the samples with 30% and above of the replaced UK ratios and consequently the mechanical strength decreased. Considering the durability index data, it was concluded that the addition of the UK substitution developed durability characteristics but the fiber lengths gave variable results and the use of 12 mm fiber was more suitable in terms of durability.

**2019, xi + 64 pages**

**Keywords:** Durability index, Fly ash, Micro fiber, Mortar



## TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolayı tez danışmanım Sayın Do. Dr. Gökhan GÖRHAN'a, her konuda neri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tezimin gerekleşmesinde 17. FEN.BİL.38 numaralı proje ile maddi destek sağlayan Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bilimsel Araştırmalar Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Bu araştırma ve eğitim hayatım boyunca desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Esma KAVASOğLU  
AFYONKARAHİSAR, 2019

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	4
2.1 Uçucu Kül .....	4
2.1.1 Uçucu Külün Özellikleri.....	4
2.1.2 Uçucu Külün Sınıflandırılması .....	6
2.2 Çimento.....	6
2.2.1 Tanımı.....	6
2.2.2 Ana Bileşen ve Oksitler .....	7
2.2.3 Üretimi ve Depolanması.....	8
2.3 Lifler .....	10
2.3.1 Lifler Hakkında Genel Bilgi .....	10
2.3.2 Lif Çeşitleri.....	11
2.3.2.1 Doğal Lifler.....	12
2.3.2.2 Metalik Lifler .....	12
2.3.2.3 Cam Lifler .....	13
2.3.2.4 Polimer Lifler.....	14
3. MATERYAL ve METOT .....	16
3.1 Kullanılan Malzemeler .....	16
3.2 Hammaddelere Uygulanan Analizler.....	17
3.3 Harçların Hazırlanması .....	18
3.4 Fiziksel ve Mekanik Testler.....	21
3.4.1 Su Emme .....	22
3.4.2 Görünen Porozite.....	23
3.4.3 Birim Hacim Ağırlık.....	23
3.4.4 Görünür Yoğunluk.....	23

3.4.5 Basınç Dayanım Testi.....	24
3.5 Durabilite İndeksinin Belirlenmesi.....	24
3.5.1 İlk Su Emme Hızı Deneyi.....	25
3.5.2 Kaynatılmış Su Emme Oranı.....	26
3.6 Harç Numunelerinin Mineralojik ve Morfolojik Analizleri.....	26
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	28
4.1 Malzemelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	28
4.2 Harçların Fiziksel Özellikleri.....	30
4.3 Harç Numunelerin Eğilme ve Basınç Dayanım Özellikleri.....	36
4.4 SEM-EDX Analizleri.....	39
4.5. Harçların Gözeneklilik Değerleri.....	51
4.6 Durabilite İndeksi.....	52
5. SONUÇLAR.....	54
6. KAYNAKLAR.....	56
ÖZGEÇMİŞ.....	64

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

CaCO <sub>3</sub>	Kalsiyum Karbonat
MPa	Mega Pascal

### Kısaltmalar

---

PA	Poliamid
PÇ	Portland Çimentosu
TS	Türk Standardı
UK	Uçucu Kül

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1 Farklı lif şekilleri (TS 10513, 1992). .....	13
Şekil 2.2 Cam elyafı şekli. ....	14
Şekil 3.1 İlk su emme hızı deneyi. ....	25
Şekil 4.1 Tunçbilek uçucu külünün XRD difraktogramı. ....	28
Şekil 4.2 CEM I 42.5 R tipi çimentoya ait XRD difraktogramı.....	29
Şekil 4.3 Harç numunelerinin (28 günlük) görünen porozite oranları. ....	31
Şekil 4.4 Harç numunelerinin (90 günlük) görünen porozite oranları. ....	31
Şekil 4.5 Harç numunelerinin (28 günlük) su emme oranları. ....	33
Şekil 4.6 Harç numunelerinin (90 günlük) su emme oranları. ....	33
Şekil 4.7 Harç numunelerinin (28 günlük) birim hacim ağırlığı. ....	34
Şekil 4.8 Harç numunelerinin (90 günlük) birim hacim ağırlığı. ....	34
Şekil 4.9 Harç numunelerinin (28 günlük) görünür yoğunlukları. ....	35
Şekil 4.10 Harç numunelerinin (90 günlük) görünür yoğunlukları. ....	36
Şekil 4.11 Harç numunelerinin (28 günlük) eğilme dayanımları. ....	37
Şekil 4.12 Harç numunelerinin (90 günlük) eğilme dayanımları. ....	37
Şekil 4.13 Harç numunelerinin (28 günlük) basınç dayanım değerleri.....	39
Şekil 4.14 Harç numunelerinin (90 günlük) basınç dayanım değerleri.....	39

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Çimentonun ana bileşenleri.....	7
Çizelge 3.1 Poliamid mikro fiberin karakteristik özellikleri.....	16
Çizelge 3.2 Harç yapımında kullanılan malzeme miktarları.....	20
Çizelge 4.1 Uçucu külün kimyasal kompozisyonu.....	28
Çizelge 4.2 Uçucu küle ait lazer tane boyut boyut analiz değerleri.....	28
Çizelge 4.3 Çimento (41.5 R) malzemesine ait XRF kimyasal analiz sonuçları.....	29
Çizelge 4.4 41.5 R tipi çimentoya ait lazer tane boyut analiz değerleri.....	29
Çizelge 4.5 RH90 kodlu harç numunenin EDX verileri.....	41
Çizelge 4.6 R690 kodlu harç numunenin EDX verileri.....	42
Çizelge 4.7 R1290 kodlu harç numunenin EDX verileri.....	43
Çizelge 4.8 R2490 kodlu harç numunenin EDX verileri.....	44
Çizelge 4.9 1U690 kodlu harç numunenin EDX verileri.....	45
Çizelge 4.10 1U1290 kodlu harç numunenin EDX verileri.....	46
Çizelge 4.11 1U2490 kodlu harç numunenin EDX verileri.....	47
Çizelge 4.12 2U690 kodlu harç numunenin EDX verileri.....	49
Çizelge 4.13 2U1290 kodlu harç numunenin EDX verileri.....	50
Çizelge 4.14 2U2490 kodlu harç numunenin EDX verileri.....	51
Çizelge 4.15 Civalı porozimetre deney sonuçları.....	52
Çizelge 4.16 Durabilite İndeksi değerleri.....	53

## RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
<b>Resim 2.1</b> Klinker numuneleri. ....	7
<b>Resim 2.2</b> Çimento siloları.....	10
<b>Resim 3.1</b> Poliamid mikro fiber. ....	16
<b>Resim 3.2</b> Uçucu kül (Tunçbilek). ....	17
<b>Resim 3.3</b> Bruker D8 Advance,Rigaku ZSX Primus,Malvern Mastersizer 2000.....	18
<b>Resim 3.4</b> Dökümü tamamlanan harç numuneleri, Harçların yerleştirilmesi. ....	19
<b>Resim 3.5</b> Su tankındaki numuneler. ....	19
<b>Resim 3.6</b> Eğilme dayanım testi.....	21
<b>Resim 3.7</b> Basınç dayanım testi. ....	21
<b>Resim 3.8</b> Asılı ağırlık. ....	22
<b>Resim 3.9</b> Laboratuvar tipi etüv.....	22
<b>Resim 3.10</b> Kaynatma kabındaki numuneler. ....	26
<b>Resim 3.11</b> SEM cihazı.....	27
<b>Resim 4.1</b> RH90 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü. ....	40
<b>Resim 4.2</b> RH90 kodlu harç numunenin SEM-EDX grafiği.....	40
<b>Resim 4.3</b> R690 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü. ....	41
<b>Resim 4.4</b> R690 kodlu geopolimer betonun SEM-EDX grafiği. ....	42
<b>Resim 4.5</b> R1290 kodlu harç numunenin SEM görüntüsü.....	42
<b>Resim 4.6</b> R1290 kodlu harç numunenin SEM-EDX grafiği. ....	43
<b>Resim 4.7</b> R2490 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü. ....	44
<b>Resim 4.8</b> R2490 kodlu harç numunenin SEM-EDX grafiği. ....	44
<b>Resim 4.9</b> 1U690 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü.....	45
<b>Resim 4.10</b> 1U690 kodlu harç numunenin SEM-EDX grafiği. ....	45
<b>Resim 4.11</b> 1U1290 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü.....	46
<b>Resim 4.12</b> 1U1290 kodlu harç numunenin SEM-EDX grafiği. ....	46
<b>Resim 4.13</b> 1U2490 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü.....	47
<b>Resim 4.14</b> 1U2490 kodlu harç numunenin SEM-EDX grafiği. ....	47
<b>Resim 4.15</b> 2U690 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü.....	48
<b>Resim 4.16</b> 2U690 kodlu harç numunenin SEM-EDX grafiği. ....	48
<b>Resim 4.17</b> 2U12900 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü.....	49
<b>Resim 4.18</b> 2U12900 kodlu harç numunenin SEM-EDX grafiği. ....	50
<b>Resim 4.19</b> 2U2490 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü.....	50
<b>Resim 4.20</b> 2U2490 kodlu harç numunenin SEM-EDX grafiği. ....	51

## 1. GİRİŞ

Çağımızın yapı dünyasında yaygın olarak kullanılan yapı malzemesi betondur. Evlerin, işyerlerinin, okulların, spor tesislerin, park yerlerinin, barajların vb. birçok yapının yapımında beton kullanılmaktadır. Beton diğer yapı malzemelerine kıyasla; kolay şekil alabilmesi, mukavemetinin yüksek olması ve her yerde üretilebilir olması nedeniyle en çok kullanılan yapı malzemesidir.

Betonun ana malzemesi olan çimentonun üretiminde çok fazla enerji gereksinimine ihtiyaç duyulduğundan üretim sırasında atmosfere yüksek oranlarda CO<sub>2</sub> salınmaktadır. Bu sebeple çevreye verilen zararın en aza indirgenebilmesi için çimento kullanımının azaltılması gerekmektedir. Çimento kullanımının azaltılabilmesi için uçucu kül ve benzeri puzolanik malzemelerin kullanılması bir alternatif olarak düşünülebilir (Pangdaeng *et al.* 2014). Son yıllarda puzolanik malzemelerin sıklıkla kullanıldığı gözlenmekle birlikte; ilgili atıklar, çimento üretiminde ortaya çıkan CO<sub>2</sub> emisyonunu önemli derecede azaltacak bir kaynak olarak görülmektedir (Kallel *et al.* 2016). Ayrıca puzolanik malzemelerin geleneksel Portland çimentolarına % 5 - % 30 oranlarında ikame yapılması durumunda durabilite özelliklerinin gelişim gösterdiği de belirtilmektedir (Donatello *et al.* 2013).

Uçucu külde küçük oranlarda kireç bulunmaktadır, bu nedenle ikame oranı arttıkça betonun dayanımı azalmaktadır. Fakat uzun kür sürelerinde uçucu külün puzolanik aktivitesinden dolayı betonda dayanım değerlerini arttırırken, sorptiviteyi de düşürdüğü belirtilmektedir (Saha 2018).

Betonarme elemanların basınç dayanımlarının yüksek olması istenir. Tasarım aşamasında her ne kadar titiz çalışılsa da, dikkate alınmamış etkiler sebebiyle yapı elemanları bir süre sonra işlevini göremez hale gelebilir ya da büyük miktarda onarım masrafına sebep olabilir (Baradan ve Aydın 2013).

Yapıların kullanım süreleri boyunca etkisi altında kaldıkları iç ve dış etkenler mevcuttur. Bu etkenlere karşı direnç göstererek işlevlerini yerine getirebilmelerine kalıcılık veya



durabilite denir. Kısaca, yapıların sahip olduğu özellikleri zaman içerisinde koruyabilmesidir (Baradan vd. 2010).

Birçok yapıda kullanılmakta olan betonun kullanım süresi boyunca, bünyesinde yıpranmaya neden olabilecek birçok kimyasal ve/veya fiziksel etkenlerle karşılaşabilmektedir (Erdoğan 2010). Beton veya betonarmenin bozulmalarına neden olan iç ve dış etkenler mevcuttur. Bu dış etkenlerden bir tanesinde donma çözülmedir.

Boşluklu ve heterojen bir içyapıya sahip olan beton, çimento hamuru, agrega ve agrega - çimento hamuru temas yüzeyinden oluşan üç fazlı bir kompozit kabul edilebilir. Bu üç fazın her biri boşluk içermektedir. Betondaki boşluklar boyutlarına göre sınıflandırılır. Birbirlerine bağlı kılcal boşluklar çimento hamurunun geçirimsizlik özelliklerine ve donma çözülme dayanımına etki eden temel etkenlerdir (Şengül vd. 2003).

Donma çözünme etkisi, soğuk hava şartlarında betonun kalıcılığını tehdit eden önemli bir etkendir (Baradan vd. 2010). Betondaki suların içerisinde eriyik halde bulunan tuzların etkisiyle betondaki sular 0 °C sıcaklıktan daha düşük sıcaklıkta donmaktadır (Erdoğan 2010).

Sertleşmiş ve suya doygun haldeki bir beton don etkisi altında kaldığında çimento harcındaki kapiler boşluklarda bulunan su donarak genişir. Genleşme ile oluşan gerilemelerin betonun çekme dayanımını aşması durumunda betonda; çatlama, ufalanma, kabuk atma gibi bozulmalar meydana gelir (Baradan vd. 2010).

Çimento üretiminin çevreye verdiği zararlar üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Doğanın korunması için üretimin azaltılması gerekmektedir. Çimento kullanımını azaltmak yapıların kullanım süresinin arttırılması, durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Diğer seçenek ise çimentoya puzolonik malzemeler ikame edilerek kullanımının azaltılmasıdır. Yapılan araştırmalar sonucunda puzolonik malzemelerin kullanılması betonun durabilitesi üzerinde olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Hamalı 2007).

Yapılan bu çalışmada ise uçucu kül ikameli çimento harçları üretiminde karışımlara ilgili örneklerin durabilite özelliklerinin geliştirilebilmesi amacıyla mikro fiber ilaveleri yapılmıştır. Harç örneklerinde kullanılan liflerden olan poliamidler (PA) son zamanlarda petrokimya ve tekstil endüstrisindeki gelişmelerle birlikte betonda PA 6.6 (nylon) elyaf kullanımı ile yaygınlaşmıştır. PA lifleri, termoplastiklerin bir ürünüdür ve yüksek mukavemete, iyi elektriksel ve kimyasal özelliklere, düşük sürtünme katsayısına, aşınmaya karşı yüksek dirence ve yüksek sıcaklıklarda özellikleri muhafaza etme kabiliyetine sahiptir. PA mikro ve makro lifler EN 14889-2 Sınıf I'e göre PA 6.6 hammaddelerinden üretilmektedir (Güler 2018). Her iki lif türü de uzun zincirli poliamidlerin polimerlerinden oluşur. Her ne kadar mikro PA lifleri erken yaşlarda büzülme çatlaklarının önlenmesi bakımından üstün sonuçlar vermesine rağmen, PA lifleri özellikle betonların aksenal yük kapasitesini arttırmada oldukça etkilidir. Mikro ve makro PA lifleri uzun süreli dayanıklılık, korozyon etkilerine direnç, uygulama kolaylığı, pompalama ve püskürtme sağlar. Ayrıca, PA lifleri polipropilen ve polietilen liflerden daha yüksek çekme dayanımına sahiptir (Guler 2018). Poliamidler birçok mühendislik uygulamalarında işlem kolaylığı ve kompleks geometrilerde kalın bileşenlerin enjeksiyonuna izin vermesi gibi mekanik özelliklerinden dolayı kullanılmaktadır (Singh *et al.* 2018). Kullanılan fiber malzemelerin özelliklerine bağlı olarak fiber takviyeli çimento esaslı malzemelerin fiziksel, kimyasal, elastik ve mekanik özellikleri etkilenmektedir (Orban *et al.* 2018). Bununla birlikte genelde lifler, çekme dayanımı, aşınma direnci, su emme ve çatlak kontrolü gibi geleneksel betonun (kırılgan bir malzeme) bazı özelliklerini geliştirmek için kullanılır (Çavdar 2014).

Harç örneklerin hazırlanmasında karışımlara ilave edilen fiber, Kratos mikro fiberdir. Yapılan bu çalışmada, hazırlanan harçlara ilave edilen mikro fiber ve çimentoya ikame edilen uçucu küllerin harçlarda meydana getirdiği fiziksel ve mekanik değişimler incelenmiştir. Aynı zamanda yapılan test ve analizlerle uçucu kül içerikli çimento harçlarının durabilite indeksi değerlerine kullanılan mikro fiberlerin etkisi araştırılmıştır.

## **2. LİTERATÜR BİLGİLERİ**

### **2.1 Uçucu Kül**

Uçucu kül (UK), termik santrallerden elde edilen bir yan üründür. Türkiye’de faaliyet gösteren santrallerde yıllık 16 milyon tondan fazla UK ortaya çıkmaktadır. Bu atık malzemeler çevresel sorunları ortaya çıkarmakla birlikte ülkemizde ve dünyada bu küllerin geri dönüşümü ve kullanımı ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır (Görhan vd. 2008).

Bir termik santralden yılda ortalama 650.000 ton UK ve taban külü elde edilmektedir. Bu miktarlardaki atık küllerin santrallerde depolanması mümkün değildir. Santrallerden uzaklaştırılması ise maddi kayıplar getirmekle beraber çevresel sorunları da ortaya çıkarmaktadır. Bu çevre sorunlarını gidermek amacıyla UK’ların kullanım alanları ile ilgili çalışmalar yürütülmektedir (Yazıcı 2004).

Türkiye Çimento Üreticileri Birliği 2003 raporuna göre, tüm dünyada meydana gelen UK miktarı yaklaşık 600 milyon tondur. 11 adet termik santral halen Türkiye’de çalışmaktadır. Türkiye’deki 11 santralde yıllık uçucu kül üretimi 20 milyon tondan fazladır (TÇMB 2003).

UK’ların üretim fazlalığı nedeniyle depolanması söz konusu değildir. Çevre kirliliği oluşmaması adına kullanım alanları araştırılmaktadır. UK’ların fiziksel ve kimyasal özellikleri; kömür cinsi, yanma sistemi, filtre sistemi gibi birçok etkene bağlıdır. Bu nedenle standart bir davranış sergileyemeyen UK’lardan istenilen seviyede sonuç elde edilememektedir (Güler vd. 2005).

#### **2.1.1 Uçucu Külün Özellikleri**

UK’lar genel olarak gri renktedirler. İçerisinde bulunan yanmamış karbon miktarı ne kadar fazla ise rengide o oranda koyulaşmaktadır. Genel şekli küresel olan uçucu kül parçacıklarının çapları 1-150 µm arasında değişim göstermektedir. UK’ların % 75’den

fazlasının çapı 45 µm'den daha küçüktür. Bu küresel tanelerin içi dolu veya boş olabilmektedir. İçleri boş olan kül parçacıkları toplam külün ağırlık olarak % 5'ini, hacim olarak ise yaklaşık % 20'sini oluşturmaktadır. UK'lar, doğal zeminlerle karşılaştırıldığında daha düşük özgül ağırlık değerlerine sahip, silt boyutunda oldukça uniform malzemelerdir (Toros 1987, Uysal 1987, Erşan 1996).

UK'lar çimentodan daha düşük yoğunluğa sahiptirler. Yoğunlukları mineralojik yapılarına göre değişiklik göstermektedir. Yüksek demir içeren küller daha yoğunken, yüksek miktarlarda alüminat, silikat ve yanmamış karbon bulunan küllerin yoğunluğu daha düşüktür (Yazıcı 2004).

UK'lar kendi başlarına bağlayıcı özelliği olmayan ancak sulu ortamda kireçle birleştirildiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanan puzolanik malzemelerdir. UK'lar kireç ve su ile karıştırıldıktan bir süre sonunda priz alıp dayanım kazanırlar. Ayrıca CaO miktarı yüksek uçucu küller daha iyi puzolanik özellik göstermektedir. UK'ların puzolanik özelliğın esası olan bu dayanım kazanma özelliği oldukça yavaş olarak ortaya çıkar. Artan süreyle birlikte uçucu küllerin dayanımı arttığı bilinmektedir (Poon *et al.* 1999).

UK ince ve amorf mineralojisi nedeniyle, ince taneli doğal puzolanlar gibi, puzolanik özellikler gösteren bir malzemedir. Sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştirildiğinde, hidrolik bağlanma özelliğine sahiptir. Bu nedenle hem Portland-puzzolan tipi çimento üretimi hem de beton katkı maddesi olarak kullanılırlar. Genellikle, beton katkı maddesi olarak büyük miktarlarda kullanılabilirler. Beton karışımındaki UK miktarı çimento ağırlığının % 15 ile % 50'si arasında değişebilir (Gikunoo 2004).

Bünyesinde az miktarda kireç bulunduran uçucu külün içindeki ana aktif bileşen, silika ve alüminin amorf veya camsı fazıdır. Bu özellikleri taşıyan UK, nemli ortamda kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek bağlayıcı özellik gösterirler. Başka bir deyişle, düşük kireçli UK, puzolanik özelliklere sahiptir (Çelik 2004).

## 2.1.2 Uçucu Külün Sınıflandırılması

UK'ların bünyesinde bulunan bileşenler farklılık göstermektedir. Bu durum küllerin tipini karakterize etmektedir. Genel olarak UK'larda;  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$  ve  $CaO$  bulunmaktadır. Ayrıca  $MgO$ ,  $SO_3$  alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır (Türker vd. 2003).

UK, ASTM C 618 standartlarına göre sınıflandırılmaktadır. ASTM C 618'e göre UK F ve C sınıflarına ayrılır. F sınıfı uçucu kül, bitümlü kömürden elde edilen % 70'den fazla  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  ve  $CaO$  yüzdesi % 10'un altında olan düşük kalsine kül olarak adlandırılır. C sınıfı uçucu kül linyit veya yarı bitümlü kömürden yapılmıştır ve toplam  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  miktarı % 50'den fazladır.  $CaO > % 10$  olduğundan, aynı zamanda yüksek kalkerli UK olarak da adlandırılır (ASTM C 618 2000).

Çoğu UK, özellikle F sınıfı uçucu kül, oda sıcaklığında etkinlikleri çok yavaş olmasına rağmen, oksijenle bağlanan tetrahedral silikatlarla yüksek derecede polimerizasyona sahiptir. Puzolanik aktiviteyi arttıran etkenler uçucu külün inceliği ve karbon yüzdesinin azlığıdır. Oda sıcaklığında puzolanik reaksiyon oranının çok düşük olduğu ve kimyasal reaksiyonun 40-50 °C'lik bir sıcaklıkta puzolanik olduğu bildirilmiştir (Karlhans 1990).

## 2.2 Çimento

### 2.2.1 Tanımı

Çimento en çok kullanılan yapı malzemesidir. Su ile tepkimeye girdiğinde bağlayıcılık özelliği göstermesinden dolayı "Hidrolik bağlayıcı" olarak da adlandırılmaktadır (Kuyumcu 2006). Hidrolik bağlayıcılar su ile tepkimeye girmesinin ardından zamanla priz alarak dayanım kazanırlar (TS EN 197-1 2009). Çimento, kil ve kalkerin belirli oranlarda karıştırılarak, pişirilip öğütülmesiyle elde edilmektedir. Günümüzde çeşitli puzolanik malzemelerde eklenerek çeşitli çimento türleri üretilmektedir. Bu çimentolar kullanım yeri, kullanım zamanı ve ortam koşulları değerlendirilerek tercih edilmektedir (Gönen 2012).

## 2.2.2 Ana Bileşen ve Oksitler

Kalker ve kil belirli oranda karıştırılarak 1500 °C'de pişirilir ve erken prizi engellemek amacıyla % 2-6 oranında alçı taşı eklenerek çimento elde edilir. (Güner 2011). Çimento hammaddesinin pişirildikten sonraki ismi “klinker’dir” (Resim 2.1) (Şimşek 2003).



**Resim 2.1** Klinker numuneleri (İnt.Kyn.2).

**Çizelge 2.1** Çimentonun ana bileşenleri (Güner 2011).

Adı	%	Bileşimi	Sembolü
Trikalsiyum Silikat (Çimentonun Erken Mukavemet Kazanmasını Sağlar)	25- 60	3 CaO. SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Dikalsiyum Silikat (Kimyasal Etkenlere Karşı Dayanıklılığını Arttırır)	15- 40	2 CaO. SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Trikalsiyum Alüminat (Sahte Piriz Oluşturur)	2- 15	3 CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Tetrakalsiyum Aluminoferrit (Çimentoya Gri Renk verir, sertleşmeyi yavaşlatır)	5- 15	4 CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Çimento hammaddeleri yüksek sıcaklıkta pişirilir. Pişirilme esnasında kalkerin ayrışması sonucunda kireç (CaO), kilin ayrışması sonunda ise kil mineraline bağlı olarak silis (SiO<sub>2</sub>), Alimin (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu öğeler asit ve bazik durumlarına göre birbirleriyle birleşerek Portland çimentolarının ana bileşenlerini (Çizelge 2.1) oluştururlar (Şimşek 2003).

### 2.2.3 Üretimi ve Depolanması

Çimentonun üretilmesi için kalker, kil ve ihtiyaç halinde alüminyum ve demir oksitler istenilen özellikleri sağlamak için belirli oranda karıştırılarak öğütülürler. Hazırlanan ham madde karışımına farin adı verilmektedir. Farinler 1450 °C sıcaklığa ulaşmaya kadar döner fırınlarda pişirilir. Pişirilen farinler klinker adını alır. Klinker düşük oranda kalsiyum sülfat ile öğütülürerek çimento meydana gelir (Yeğinobalı 2003).

Döner fırın, içi boş bir silindirin şekline sahip olan uzun bir fırındır. Fırın, bir ucu diğer ucundan daha yüksekte kalacak tarzda, yaklaşık olarak % 3-4 eğimle yerleştirilmiştir. Çelikten yapılmış olan bu fırının çapı 2- 6 m arasında değişmektedir; boy çap oranı 15-30 kadardır. Döner fırınlar çalışır durumda iken, kendi eksenini etrafında saatte 60- 180 devir yapabilmektedir. Klinker üretimi için hammaddelerin pişirilmesi, işleminde kullanılan bu fırına, kendi eksenini etrafında döndüğü için, “döner fırın” denilmiştir (Erdoğan 2010).

Döner fırının alt kısmında ateşin çıktığı bir boru mevcuttur. Bu borudan çıkan ateş 1870 °C değerindedir. Bu kısma gelene kadar sıcaklığı 1480 °C'ye varan kalsine malzeme son kısımda sıvılaşır. Ergimeden kaynaklı malzemeler birleşerek büyük taneli klinker oluşur (Yeğinobalı 2003).

Klinkerler döner fırından çıktıktan sonra soğutma işlemi gerçekleştirilir. İri taneli haliyle su ile bağlayıcılık özelliği göstermez. Bağlayıcılık özelliği gösterebilmesi için ince şekilde öğütülmesi gereklidir. Bu haliyle priz süresi oldukça kısadır. İşlenebilirliği arttırmak için priz süresini uzatmak gerekir bu yüzden alçı taşı eklenerek çözüm sağlanmıştır (Güner 2011).

Portland çimentosu klinkeri normalde klinker mineralleri olarak adlandırılan dört ana kimyasal bileşik içerir. Portland çimentosunun sağlamlık gelişimi ve uzun vadeli yapısal ve dayanıklılık özelliklerinden büyük ölçüde sorumlu olan iki kalsiyum silikat minerali olan  $C_3S$  ve  $C_2S$ 'dir. Bununla birlikte,  $CaO$  (kireçtaşından kireç) ve  $SiO_2$  (kumdan silika) arasındaki reaksiyonun, yüksek yanma sıcaklıklarında bile elde edilmesi çok zordur. Az

miktarda alümina ve demir oksit varsa (tipik olarak % 5  $Al_2O_3$  ve % 3  $Fe_2O_3$ ) mevcutsa kimyasal kombinasyon büyük ölçüde kolaylaştırılır, çünkü bunlar arasında kireç ve silisin kısmen çözülebildiği ve daha sonra reaksiyona girebileceği bir erimiş akı oluşturmaya yardımcı olur.  $C_3S$  ve  $C_2S$ 'yi verir. En büyük enerji girdisini gerektiren reaksiyon, esas olarak 700-1000 °C sıcaklık aralığında gerçekleşen  $CaCO_3$ 'ün karbonatsızlaşmasıdır. % 80 kireçtaşı içeren tipik bir karışım için,  $CaCO_3$ 'ü karbondan arındırmak için enerji girişi, yaklaşık 400 kCal / kg klinkerdir; bu, modern bir kuru işlem fırınının toplam enerji ihtiyacının yaklaşık yarısıdır.

Karbon giderme yaklaşık 1100 °C'de tamamlandığında, besleme sıcaklığı daha hızlı artar. Kireç, belit ( $C_2S$ ) oluşturmak için silika ile reaksiyona girer, ancak reaksiyona girmemiş olan kireç seviyesi, ~ 1250 °C sıcaklığa ulaşılan kadar yüksek kalır. Bu, alitin ( $C_3S$ ) termodinamik stabilitesinin alt sınırınıdır. 1300 °C'de kısmi erime meydana gelir, sıvı faz (veya akı) mevcut alümina ve demir oksit tarafından sağlanır.  $C_2S$ ,  $C_3S$  'ye dönüştürüldüğünde reaksiyona girmemiş kireç seviyesi azalır. İşlem, reaksiyona girmemiş kireç seviyesinin (serbest kireç) % 3'ün altında olmasını sağlamak için gerçekleştirilecektir.

Normal olarak,  $C_3S$  oluşumu yaklaşık 1450 °C'lik bir malzeme sıcaklığında etkili bir şekilde tamamlanır ve birleşik kireç seviyesi, daha fazla kalma süresi ile sadece yavaşça azalır. Klinkerin birleştirilebilme kolaylığı, hammaddelerin mineralojisinden ve özellikle mevcut kaba silika (kuvars) seviyesinden kuvvetli bir şekilde etkilenir. Hammaddelerde kaba silika seviyesi ne kadar yüksek olursa, ham karışımı ne kadar ince olursa, uygun fırın sıcaklıklarında tatmin edici bir kombinasyon sağlamak için öğütülmesi gerekecektir.

Kaba silika, silis parçacıklarının bölgeleri etrafında nispeten büyük belit kristallerinin kümelerinin oluşması ile de ilişkilidir. Klinker alevin altından geçerken soğumaya başlar ve akı fazını oluşturan erimiş  $C_3A$  ve  $C_4AF$  kristalleşir. Bu kristalizasyon normalde klinker döner fırından çıktığında ve soğutucuya ~ 1200 °C sıcaklıkta girdiğinde tamamlanır. Alit pahasına belit içeriğinde bir artışa ve ayrıca tatmin edici olmayan beton reolojisine (su talebi ve sertleşmesine) neden olabilecek nispeten büyük  $C_3A$  kristallerinin oluşmasına neden olabileceğinden yavaş soğutmadan kaçınılmalıdır (Odler 2003).



Çimentonun uygun koşullarda depolanması özelliklerini koruyabilmesi adına önemlidir. Çimentonun bozulması su ile etkileşim veya rutubetli ortamlarda bulunmasıyla oluşmaktadır. Bu nedenle depolanacak yerin istenilen kriterleri sağlaması gereklidir (Şimşek 2003).

Çimentolar kuru depolarda veya hava ile teması olmayan silolarda depolanmalıdır (Şekil 2.2). Torbalarla saklanması durumunda ise en fazla 8 torba üst üste istiflenmelidir aynı zamanda torbalar arası hava akımının sağlanması gerekmektedir. Zeminden gelebilecek neme karşı zemin plastik örtü ile kaplanıp ahşap ızgara yapılması yararlı olacaktır.



**Resim 2.2** Çimento Siloları (İnt.Kyn.3).

Çimentoların depolanma süresinin en fazla iki ay olması önerilmektedir. Normal bir depoda 3 ay bekleyen portland çimentosu, mukavemetinden % 10-20'sini, 6 ay bekleyen çimento ise % 20-30'unu kaybeder (Şimşek 2003).

## **2.3 Lifler**

### **2.3.1 Lifler Hakkında Genel Bilgi**

Bir boyutu diğer boyutuna göre çok büyük olan lif, doğal ve yapay yollarla üretilen, dayanımları ve elastisite modülleri yüksek olan malzemeleri tanımlar (Ekincioglu 2003).

Lif kullanımı eski zamanlara dayanmaktadır. Doğal lif olarak adlandırılan doğadan kolayca temin edilebilen; at kuyruğu, keçi kılı, keten ve kenevir gibi lifler kerpiç ve sıva

gibi malzemelere ilave edilmiştir. Yapay lifler 19. yüzyılın sonunda ortaya çıkmıştır. Liflerin elastisite modülleri ve dayanımlarının yüksek olması sebebiyle kullanımı yangınlaşmıştır. Liflerin özelliklerini geliştirmek adına birçok çalışma yapılmaktadır (Chawla 1998).

Betonda oluşabilecek mikro ve makro boyuttaki çatlakları önlemek veya ilerlemesini önlemek amacıyla betona doğal ve yapay lifler eklenmektedir. Lifli betonun en önemli özelliği liflerin beton içinde homojen şekilde dağılmasıdır. Günümüzde en çok tercih edilen lifler; cam, polipropilen, karbon ve çelik liflerdir (İnt.Kyn.5).

Betonda meydana gelen gerilmeler nedeniyle çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlakları azaltmak veya yayılmasını önlemek için betona kullanılacak alana uygun lif eklenmektedir. Liflerin kullanım miktarı oldukça kritik bir seçimdir. Yetersiz kullanılmaması yada fazla kullanılıp işlenebilirliği engellememesi gerekmektedir (Li 2003, Şahmaran and Li 2009, Zhou *et al.* 2010). Polivinil alkol lifleri, genel olarak hacimce % 2'yi aşmayacak şekilde tercih edilmelidir. Kullanılacak liflerin özellikleri bilinmelidir (Li and Maalej 1996). İlk çatlaktan sonra, elyaflar enine kesitte yeterli miktarda ve homojen dağılımdadır; ve eğer elyaf-matris arasındaki yapışma yeterliyse, elyaf stresi bölümün diğer kısımlarına taşıyabilir (Yang and Li 2008).

Betonun çekme dayanımı ve çekme birim deformasyon kapasitesi çok düşüktür. Betonun bu zayıf özelliklerinin iyileştirilmek amacıyla lifler katılmakta ve elde edilen beton türüne ise lifli beton adı verilmektedir (Yardımcı 2007). Beton içerisinde lif kullanımı, betonun çatlak gelişimine karşı dirençli olmasını ve süneklik özelliğinin artmasını ve betonun; dayanım ve enerji yutma kapasitesi özelliklerini geliştirir (Kozak 2013).

### **2.3.2 Lif Çeşitleri**

Lifleri doğal ve yapay olmak üzere iki grupta inceleyebiliriz. Kullanılan alana ve gösterdikleri özelliklere göre birçok lif türü vardır (Bunsell 1988).

### 2.3.2.1 Doğal Lifler

Doğal lifler; doğal kaynaklardan elde edilip işlem görmeden kullanılan liflerdir. Bu lifler ekonomiktir ve kolaylıkla elde edilebilir oldukları için tercih edilirler. Fakat tercih edilen bu liflerde karşılaşılan sorun liflerin alkali ortamda özelliklerini kaybetmesidir (Aran 1990).

Bilinen en eski lifler bambu, şeker kamışı, odun, at yelesi ve samandır. Bu lifler geçmişten günümüze kadar çimento ile birlikte kullanılmıştır (Ekincioğlu 2003). Bazalt kayanın yüksek sıcaklıkta eritilmesiyle elde edilen bazalt elyafları, çevre kirliliği yaratmayan korozyona dayanıklı, yalıtkan ve elastik ürünlerdir. Bazalt liflerinin betona olan etkilerini araştıran ilk araştırmacılar Sim ve diğerleridir (Sim *et al.* 2005).

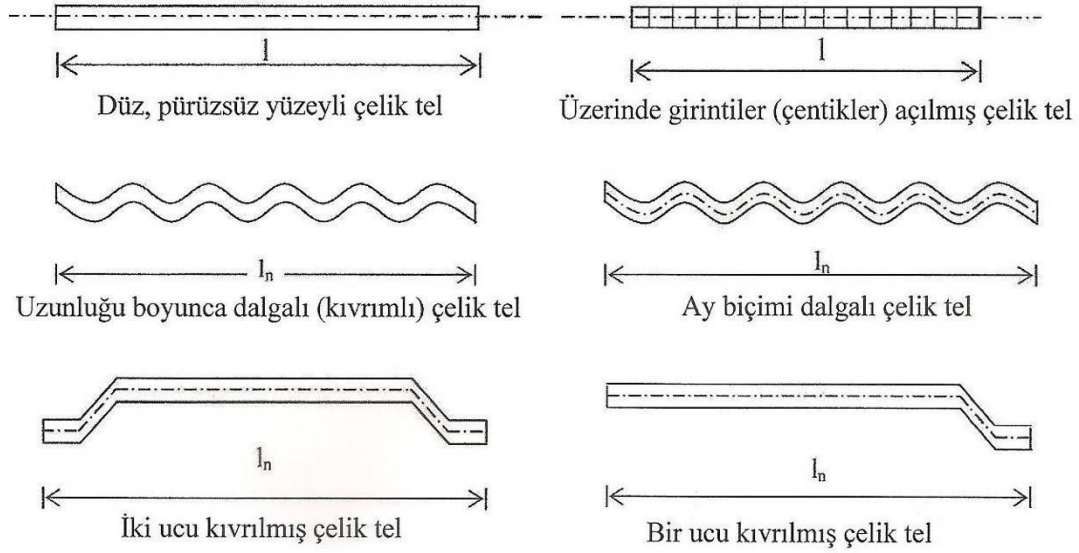
### 2.3.2.2 Metalik Lifler

Plastik şekil değiştirme özelliğine sahip olan metaller birçok sektörde tercih edilmektedir. Metal lifler yüksek dayanımları nedeniyle diğer liflere göre daha çok kullanılmaktadır. Metallerde en büyük sorun olan paslanma liflerde kendini gösteriyor. Bu nedenle paslanmaz çelik lif diğer liflere oranla daha çok kullanılmaktadır. Çelik liflerin görevi beton içerisinde adezyon kuvveti oluşturmaktır. Betondaki mikro çatlaklar nedeniyle sürtünme kuvveti düzensizdir. Bu nedenle, betonda çelik lifler kullanılarak zayıf alanlarda oluşan gerilme kuvvetlerini bir köprü gibi aktarması sağlanır (Altun vd. 2003).

Çelik elyaf takviyeli beton, 60'ların başında geliştirildi ve elyaf türleri üzerindeki araştırmalar ve uygulamalar, bu malzemeyi dünyadaki çeşitli uygulamalarda bilinen bir teknoloji haline getirdi. Halen tasarım ve hesaplama yöntemleri geliştirilmektedir (Yıldırım 2002). Betonda kullanılacak çelik liflerin özellikleri ve sınıflandırılması Amerikan standardı ASTM A 820-96'ya göre dört gruba ayrılır. Bunlar; soğuk çekilmiş lifler, plakadan kesilmiş lifler, erimiş lifler ve diğer lifler (ASTM A820 1996).

Çelik liflerin sınıflandırılması Türk standardı TS 10513 göre üç gruba ayrılmıştır. Bu standarda göre lifler; düz pürüzsüz yüzeyle lifler, bütün uzunluğunca deforme olmuş lifler

(üzerinde gintiler açılmış, uzunluğu boyunca dalgalı ve ay biçimli dalgalı teller) ve sonu kancalı lifler (iki ucu kıvrılmış ve bir ucu kıvrılmış teller) olarak gruplandırılmıştır ( TS 10513 1992). Çelik liflerin şekilleri Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 Farklı lif şekilleri (TS 10513 1992).

### 2.3.2.3 Cam Lifler

Cam lifler; sert, korozyona dayanıklı, esnek ve hafif malzemelerdir. Ayrıca diğer malzemelerle tepkimeye girmez ve düşük maliyetlidir. Bu özelliklerinden dolayı endüstriyel uygulamalarda çok fazla kullanılmaktadır (Barbero 1999).

Cam lifler, camların elektrikli fırında yaklaşık 1200-1500 °C'de eritilmesi ve ergimiş camların platin alaşımli bir potanın altındaki binlerce delikten geçerek ve bir soğutma bölgesinin içinden geçerek üretilir. Daha sonra, liflere kaplamalar uygulayarak ve onları demet halinde sararak depolanırlar (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Cam elyafı şekli (İnt.Kyn.4).

#### 2.3.2.4 Polimer Lifler

Polimer liflerin birçok çeşiti vardır. Bunlar; polipropilen, naylon, polietilen, aramid ve perlondur. Polimer liflerden çimento hamuruna katılan ve uygun sonucu veren lif ise polipropilen liflerdir (Ekincioğlu 2003). Bu liflerin dayanımları yüksek, alkali ortama dayanıklı olması ve maliyetinin düşük olması, önemli bir donatı malzemesi özelliğini taşımaktadırlar. Ayrıca polipropilen liflerin su ile reaksiyon göstermemesinden dolayı harç veya beton içerisinde ıslanarak topaklanmaması da tercih nedenidir (Ersoy 2001).

Polipropilen liflerin betondaki en önemli etkisi, priz süresince meydana gelebilecek olan çatlakların kontrolünü sağlamaktır. Betonun sertleşmesi prizin ilk aşamasında betonun dayanım kazanma hızı ve büzölmelerden kaynaklı oluşan iç gerilmelerinin oluşum hızından daha yavaştır (Acun 2000).

Harç örneklerinde kullanılan liflerden olan poliamidler (PA) son zamanlarda petrokimya ve tekstil endüstrisindeki gelişmelerle birlikte betonda PA 6.6 (naylon) elyaf kullanımı ile yaygınlaşmıştır. PA lifleri, termoplastiklerin bir ürünüdür ve yüksek mukavemete, iyi elektriksel ve kimyasal özelliklere, düşük sürtünme katsayısına, aşınmaya karşı yüksek dirence ve yüksek sıcaklıklarda özellikleri muhafaza etme kabiliyetine sahiptir. PA mikro ve makro lifler EN 14889-2 Sınıf I'e göre PA 6.6 hammaddelerinden üretilmektedir. Her iki lif türü de uzun zincirli poliamidlerin polimerlerinden oluşur. PA lifleri özellikle betonların aksenal yük kapasitesini arttırmada oldukça etkilidir. Mikro ve makro PA lifleri uzun süreli dayanıklılık, korozyon etkilerine direnç, uygulama kolaylığı,

pompalama ve püskürtme sağlar. Ayrıca, PA lifleri polipropilen ve polietilen liflerden daha yüksek çekme dayanımına sahiptir (Guler 2018). Poliamidler birçok mühendislik uygulamalarında işlem kolaylığı ve kompleks geometrilerde kalın bileşenlerin enjeksiyonuna izin vermesi gibi çok ilginç mekanik özelliklerinden dolayı kullanılmaktadır (Singh *et al.* 2018). Kullanılan fiber malzemelerin özelliklerine bağlı olarak fiber takviyeli çimento esaslı malzemelerin fiziksel, kimyasal, elastik ve mekanik özellikleri etkilenmektedir (Orban *et al.* 2018). Bununla birlikte genelde lifler, çekme dayanımı, aşınma direnci, su emme ve çatlak kontrolü gibi geleneksel betonun (kırılgan bir malzeme) bazı özelliklerini geliştirmek için kullanılır (Çavdar 2014).

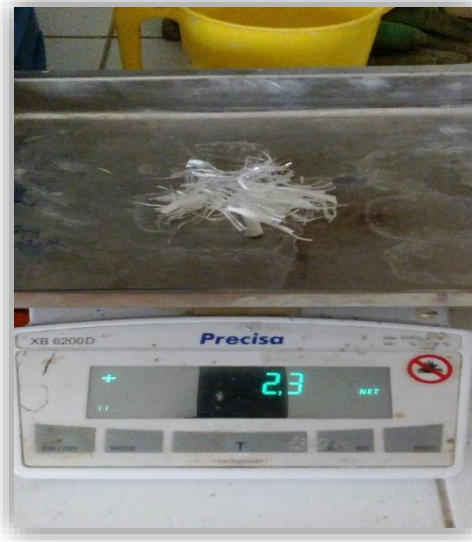
### 3. MATERYAL ve METOT

#### 3.1 Kullanılan Malzemeler

Harçların üretiminde uçucu kül (UK), çimento ve poliamid mikro fiber lif kullanılmıştır. Örneklerin üretiminde kullanılan poliamid mikro fiber, KraTos Mikro Sentetik Fiber donatıdır (Resim 3.1). Karışımlarda kullanılan Poliamid mikro fiber lifin karakteristik özellikleri Çizelge 3.1’ de verilmiştir (İnt.Kyn.1).

**Çizelge 3.1** Poliamid mikro fiberin karakteristik özellikleri.

Ham Madde	Poliamid 6.6
Özgül Ağırlık	1, 14
Uzunluk (mm)	6, 12, 24
Çekme Gerilmesi (MPa)	970
Alkali Direnci	Çok iyi
Korozyon Direnci	Çok iyi



**Resim 3.1** Poliamid mikro fiber.

Örneklerin üretiminde çimentoya, uçucu kül ikamesi yapılmıştır. Çalışmada kullanılan UK, Afyonkarahisar’da faaliyet gösteren KOLSAN Hazır Beton A.Ş. firmasından

bedelsiz olarak temin edilen Kütahya Tunçbilek Termik Santrali'ne ait uçucu küldür (Resim 3.2).



**Resim 3.2** Uçucu Kül (Tunçbilek).

Harçların yapımında çimento, mikro fiber, kum ve UK kuru karışıma tabi tutulmuştur. Sonrasında karışımlara su eklenmiştir. Harç karışımlara eklenen çimento Afyonkarahisar Çimento Fabrikası tarafından üretilen CEM I 42.5 R tipi çimentodur. Harçların üretiminde standart kum kullanılmıştır.

### **3.2 Hammaddelere Uygulanan Analizler**

Harç yapımında kullanılan UK ve çimento malzemelerine kimyasal, mineralojik ve tane boyut analizleri yapılmıştır. Malzemelerin mineralojik analizi Resim 3.3'te gösterilen Bruker Marka D8 Advance (a) Model cihazında XRD yöntemiyle yapılmıştır. Malzemelerin kimyasal analizleri, Resim 3.3'te gösterilen Rigaku ZSX Primus (b) cihazında XRF yöntemi ile ve tane boyut analizleri ise Resim 3.3'te gösterilen Malvern Mastersizer 2000 (c) cihazında yapılmıştır.





(a)



(b)



(c)

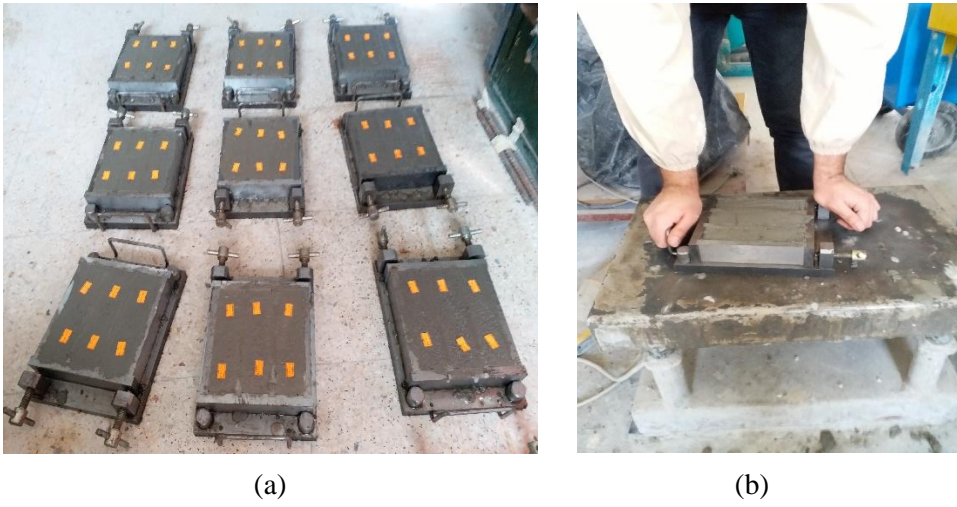
**Resim 3.3** Bruker D8 Advance (a), Rigaku ZSX Primus.(b), Malvern Mastersizer 2000 (c).

### 3.3 Harçların Hazırlanması

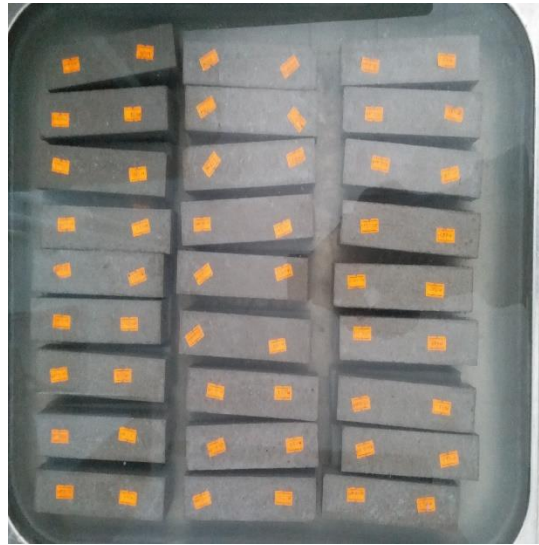
Döküm işlemine ilk olarak su/çimento oranı 0.5 olan referans harçlar ile başlanılmıştır. Daha sonra referans harca 6, 12 ve 24 mm boyutlarına sahip mikro fiber ve çimentoya ikame olarak % 0 - %50 aralığında uçucu kül kullanılarak harç numuneler üretilmiştir.

Karışımlarda kullanılacak olan fiber için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Referans harca ilave olarak % 0.1 ile % 0.5 oranlarında mikro fiber ilave edilmiş olup 7 ve 28 günlük kür süresinin ardından elde edilen basınç verileri dikkate alınarak karışımlarda kullanılacak mikro fiberin ideal katkı oranının toplam bağlayıcı miktarına göre % 0.5 olmasına karar verilmiştir.

Çimento harçların hazırlanmasında CEM I 42.5 tipi çimento kullanılmış olup örnekler, TS EN 196-1'e (TS EN 196-1 2002). uygun 4×4×16 cm'lik metal kalıplara dökülmüştür (Resim 3.4). Örneklerde boşluk kalmayacak şekilde titreşim uygulanarak örneklerin metal kalıplara yerleştirilmiştir (Resim 3.4). Hazırlanan harçların laboratuvar şartlarında bir gün açık ortamda priz almasının ardından örnekler kalıplardan alınmıştır. Ardından testlerinin yapılacağı güne kadar (28 ve 90 gün) harç örnekleri su tankında su kürüne maruz bırakılmıştır (Resim 3.5). Harçların hazırlanmasında kullanılan malzemeler ve karışım oranları Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.



**Resim 3.4** Dökümü tamamlanan harç numuneleri (a), Harçların yerleştirilmesi (b).



**Resim 3.5** Su tankındaki numuneler.

Çalışmada hazırlanan harç örneklerin kodlamasında, ilk olarak ikame edilen UK malzemesinin yüzdesi verilmiştir (örneğin:%20 UK=2U). Daha sonra ilave edilen lif boyuna göre 6, 12 ve 24 kodlaması ilave edilmiştir. Son olarak kür süresini belirten 28 ve 90 sayıları eklenmiştir. Yapılan kodlamalara göre örnek verilecek olursa, Çizelge 3.2'deki 3U1228 kodlu numune %30 UK, 12mm mikro fiber ve 28 günlük kür süresini ifade etmektedir.

**Çizelge 3.2** Harç yapımında kullanılan malzeme miktarları.

Numuneler	Çimento(g)	Kum(g)	Uçucu Kül (g)	Su (g)	Filler (g)
RH28-90	450	1350	-	225	-
R628-90	450	1350	-	225	2.3 (6 mm)
R1228-90	450	1350	-	225	2.3 (12 mm)
R2428-90	450	1350	-	225	2.3 (24 mm)
1U628-90	405	1350	45	225	2.3 (6 mm)
1U1228-90	405	1350	45	225	2.3 (12 mm)
1U2428-90	405	1350	45	225	2.3 (24 mm)
2U628-90	360	1350	90	225	2.3 (6 mm)
2U1228-90	360	1350	90	225	2.3 (12 mm)
2U2428-90	360	1350	90	225	2.3 (24 mm)
3U628-90	315	1350	135	225	2.3 (6 mm)
3U1228-90	315	1350	135	225	2.3 (12 mm)
3U2428-90	315	1350	135	225	2.3 (24 mm)
4U628-90	270	1350	180	225	2.3 (6 mm)
4U1228-90	270	1350	180	225	2.3 (12 mm)
4U2428-90	270	1350	180	225	2.3 (24 mm)
5U628-90	225	1350	225	225	2.3 (6 mm)
5U1228-90	225	1350	225	225	2.3 (12 mm)
5U2428-90	225	1350	225	225	2.3 (24 mm)

Çalışmada hazırlanan harç örneklerin kodlamasında, ilk olarak ikame edilen UK malzemesinin yüzdesi verilmiştir (örneğin:%20 UK=2U). Daha sonra ilave edilen lif boyuna göre 6, 12 ve 24 kodlaması ilave edilmiştir. Son olarak kür süresini belirten 28 ve 90 sayıları eklenmiştir. Yapılan kodlamalara göre örnek verilecek olursa, Çizelge 3.2'deki 3U1228 kodlu numune %30 UK, 12mm mikro fiber ve 28 günlük kür süresini ifade etmektedir.

### 3.4 Fiziksel ve Mekanik Testler

Testlerde 28 ve 90 günlük numuneler kullanılmıştır (Resim 3.6 ve Resim 3.7). Harçların mekanik özellikleri TS EN 196-1'e (TS EN 196-1 2002) göre belirlenmiştir. Numunelerin fiziksel ve basınç dayanımı testlerinde her bir seri grubundan üç örneğin ortalaması alınmıştır.



**Resim 3.6** Eğilme dayanım testi.



**Resim 3.7** Basınç dayanım testi.

Örneklerin fiziksel özelliklerini bulmak için 1 gün süreyle su tankında bekletilmiştir. Daha sonra numunelerin Arşimet prensibine göre su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Numunelerin fiziksel yapısının belirlenmesi için; numunelerin tamamen su altında asılı ağırlıkları ve

sudan çıkarılıp yüzeyi kurulandıktan sonraki ağırlıkları belirlenmiştir (Resim 3.8). Son olarak numuneler etüvde tamamen kurutulup tekrar tartılmıştır (Resim 3.9). Bu veriler yardımıyla numunelerin; görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri (TS EN 772-4 2000)'e göre, su emme değerleri ise (TS EN 771-1 2005)'e göre elde edilmiştir.



**Resim 3.8** Asılı ağırlık.



**Resim 3.9** Laboratuvar tipi etüv.

### 3.4.1 Su Emme

Numuneler oda sıcaklığında bulunan su tankına yerleştirilir. Yerleştirmedeki önemli husus numunelerin bütün yüzeylerinin su ile temas ettirilmesidir. Bu amaç doğrultusunda numuneler küçük takozlar üzerine belirli aralıklarla yerleştirilir. Numuneler 24 saatlik beklemeden ardından sudan çıkarılarak yüzeylerinde bulunan su bir bez yardımıyla alınır. Doymun halde bulunan numuneler tartılır. Su emme kapasitesi malzemeye giren su miktarının, malzemenin kuru ağırlığına bölünmesiyle bulunmakta, ve % olarak ifade edilmektedir.

### 3.4.2 Görünen Porozite

Malzemedeki gözeneklilik oranına porozite (P) adı verilir. Kür süresini tamamlayan numuneler, kür havuzundan çıkarılarak TS EN 772-4' e uygun olarak porozite tayini deneyine tabi tutulmuştur. Bunun için örneklerin doymun ağırlığı ( $W_3$ ), asılı ağırlığı ( $W_2$ ) ve kuru ağırlığı ( $W_1$ ) kaydedilmiştir. (3.1) numaralı denklem kullanılarak numunelerin porozite değerleri elde edilmiştir.

$$P = \frac{(W_3 - W_1)}{(W_3 - W_2)} \times 100 \quad (3.1)$$

### 3.4.3 Birim Hacim Ağırlık

Numuneler 105 °C sıcaklıktaki etüvde kurutulduktan sonra ağırlıkları ölçülmüştür. Bulunan ağırlıklar numunelerin hacimlerine bölünerek birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir.

### 3.4.4 Görünür Yoğunluk

Örneklerin asılı ağırlıkları belirlenir ( $W_A$ ). Sudan çıkarılan numunelerin yüzey ıslaklığı alınarak, suya doymun ağırları bulunur ( $W_D$ ). Son olarak etüvde kurutulan numunelerin ölçümleri tamamlanır ( $W_K$ ) ve aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$Gr.Y. = \frac{W_K}{(W_K - W_A)} \quad (3.2)$$

### 3.4.5 Basınç Dayanım Testi

Basınç dayanımı, aksenal basınç yükü etkisi altındaki numunenin kırılmak için göstereceği direnme kabiliyetidir. Elde edilen kırılma yükü değeri, numune alanına bölünerek ilgili örneklerin basınç dayanım değerleri hesaplanmıştır.

### 3.5 Durabilite İndeksinin Belirlenmesi

Harçların durabilite indeksinin belirlenebilmesi amacıyla bazı fiziksel deneyler ve testler ile civalı porozimetre deneyleri yapılmıştır. Üretilen harçların durabilite indeksinin belirlenebilmesi adına iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlar Robinson et al. ve Maage'nin önerdiği yöntemlerdir (Korothe 1997). Bahsedilen bu yöntemler kil tuğlası örnekleri üzerinde belli sayıda numune üzerinde yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilmiştir. Bu nedenle esasen tuğla örnekleri üzerinde uygulanan bu yöntemlerde bahsedilen aynı deneyler ve testler, çimento harçları üzerinde uygulanarak dona karşı durabilite indeksi çıkarılmış ve elde edilen katsayılara göre yorum yapılmıştır.

Robinson et al. yönteminde örneklerin; su emme hızı, su emme oranı, kaynatılmış su emme oranı, doygunluk katsayısı ve basınç dayanımı değerleri ile formülize edilen bir durabilite indeksi hesaplanmaktadır (Denklem 3.3). Hesaplanan bu indeks değeri ne kadar düşükse, malzeme o kadar yüksek bir durabilite değerine sahiptir. Fakat bu yöntemde örneklerde donma çözünme dayanıklılığını etkileyen gözenek boyut dağılımı dikkate alınmamaktadır. Bu yöntemde elde edilen index değeri 7'nin altında olması durumunda örneklerin durabilitesinin yüksek olduğu ve örneklerin %10'nunun kayba uğrayabileceği belirtilmiştir (Korothe 1997).

$$Y = \left[ \frac{IRA}{10 \left(1 - \frac{C}{B}\right)} \right] - \left[ \frac{145CS - 6000}{1000} \right] + [C - 10] \quad (3.3)$$

Burada, Y: Durabilite indeksi, IRA: İlk su emme hızı (g/min.193.55 cm<sup>2</sup>), C: 24 saatlik su emme oranını (%), B: 5 saatlik kaynatma ile su emme oranını (%), CS: Basınç dayanımı (MPa), C/B ise doygunluk katsayısını ifade etmektedir.

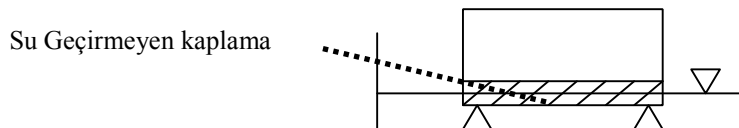
Maage yönteminde ise istatistiksel analizler temelinde bir matematiksel modeli, gözenek yapısını hesaba katarak önermiştir (Denlem 3.4). Bu yöntemde;

$$F_c = \frac{3.2}{PV} + 2.4P3 \quad (3.4)$$

Burada, F<sub>c</sub>: Durabilite indeksi, PV: civanın nüfus ettiği gözenek hacmi (intruded pore volume in ml/gram) ve P3 ise 3 µm'den daha büyük gözenek hacmini ifade etmektedir (% of PV). Maage yöntemine göre, F<sub>c</sub> > 70 ise örnek dona dayanıklı, F<sub>c</sub> < 55 ise örnek dona dayanıksızdır. Bu metot ile donma durabilitesi sadece toplam gözenekliliğe bağlı değildir. Bu yöntemde ayrıca gözenek boyutlarının dağılımıda değerlendirilmektedir (Korothe 1997).

### 3.5.1 İlk Su Emme Hızı Deneyi

Kalıplardan alınan harç numuneleri 90 günlük kür süresinin ardından 105 °C'lik etüvde 1 gün süreyle kurutulmuştur. Sabit kütleye ulaşan numuneler oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Daha sonra TS EN 772-11 standardı temel alınarak ilk su emme hızı deneyi yapılmıştır. Numunelerin sadece bir yüzeyinin su ile temas etmesi gerekmektedir. Bu nedenler diğer yüzeylerin su ile temasını engellemek için parafinle kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir ve kuru ağırlıkları alınmıştır. Ardından Şekil 3.1'de gösterildiği gibi numunenin su ile temas edeceği yüzey tepsinin iç kısmına gelecek şekilde yerleştirilerek 1 dakika sonunda terazi ile ölçülmüştür.



Şekil 3.1 İlk su emme hızı deneyi.



### 3.5.2 Kaynatılmış Su Emme Oranı

Numuneler 24 saat su kürüne bırakılmıştır. Ardından çıkarılan numuneler havlu yardımıyla yüzey kuru hale getirilerek ölçülmüştür. Ölçümü tamamlanan numuneler 105 °C'lik etüvde 24 saat bekletilerek tamamen kuruması sağlanmıştır. Deney numuneleri ASTM C 67-00 standardına uygun olarak bir kaynatma kabı içine konularak üzerleri su ile örtülene dek su ile doldurulur. 5 saat boyunca kaynatılır. Sonra sıcaklığı 20- 25 °C'ye düşene kadar soğumaya bırakılır. Kaptan çıkarılan numunelerin yüzey ıslaklığı alınarak tartım sonuçları kaydedilir. Böylece önce suya doymun duruma getirilmiş olan numunelerin su içinde kaynatma noktası doymun kuru yüzey ağırlıkları bulunmuş olur.



**Resim 3.10** Kaynatma kabındaki numuneler.

### 3.6 Harç Numunelerinin Mineralojik ve Morfolojik Analizleri

Çizelge 3.2'ye göre hazırlanan RH90, R690, R1290, R2490, 1U690, 1U1290, 1U2490, 2U690, 2U1290 ve 2U2490 kodlu harç örneklerinden numuneler alınarak analize gönderilmiştir. AKÜ Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde Bruker Marka D8 Advance Model cihazıyla (Resim 3.3) beton örneklerin XRD analizleri yapılmıştır. Yine aynı merkezde bulunan LEO 1430 VP model SEM cihazı ile de morfolojik analizler yapılmış ve örneklerin iç yapı resimleri çekilmiştir.



**Resim 3.11** SEM cihazı.

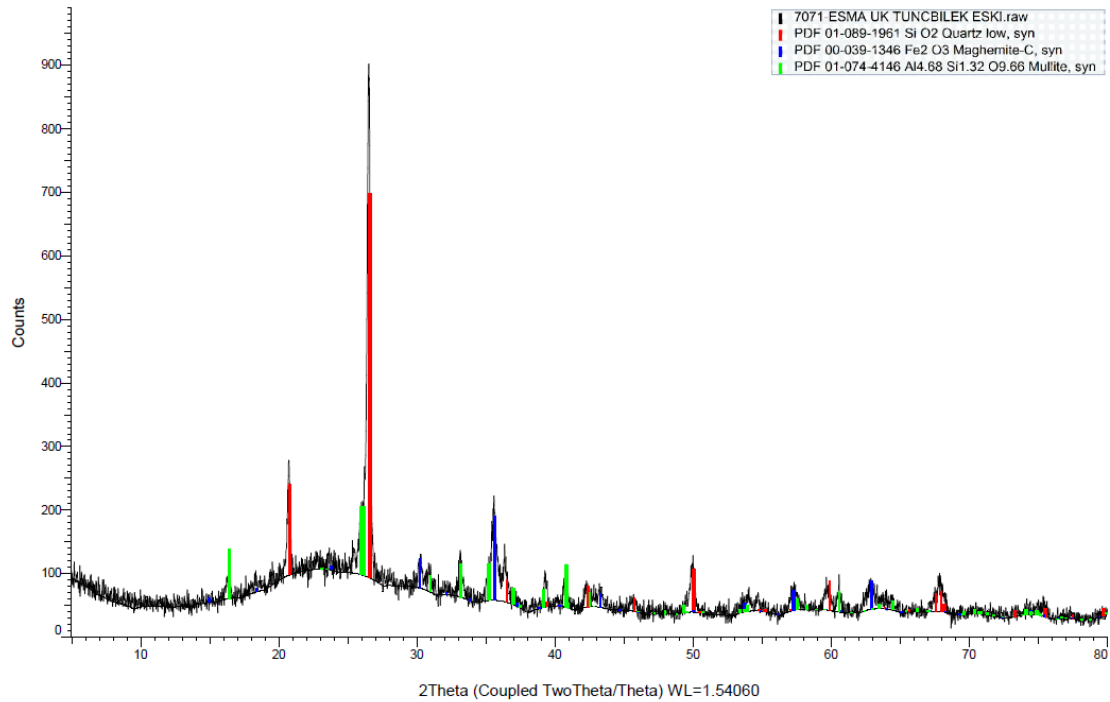
## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 4.1 Malzemelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

XRF analiz verilerine göre; uçucu külün toplam  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  değeri % 86.58, CaO değeri ise % 3.09'dur. Elde edilen analiz değerlerine göre uçucu kül ASTM C618-08a'ya göre (ASTM C 618 2000), toplam  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  değeri % 70'den fazla ve CaO % 10'dan az olduğu için F sınıfı uçucu küldür. Uçucu külden kütlece silika/alümina oranı ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 2.61'dir (Çizelge 4.1). Uçucu küle ait lazer tane boyut analiz değerleri ise Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Uçucu külün kimyasal kompozisyonu.

Kompozisyon	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	MgO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	CaO	LOI	Toplam
Ağırlıkça, %	55.63	21.34	9.61	4.49	0.16	1.87	0.64	3.09	1.03	97.86



Şekil 4.1 Tunçbilek uçucu külünün XRD difraktogramı.

Çizelge 4.2 Uçucu küle ait lazer tane boyut boyut analiz değerleri.

Numune	$d_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )
Uçucu kül	7.122	37.375	139.115

Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te CEM I 41.5 R tipi çimentonun XRF analiz sonuçlarına göre kimyasal kompozisyonu ve lazer tane boyut analiz değerleri yer almaktadır. XRF sonuçlarına göre malzeme bünyesinde bulunan alkali oksit bileşiklerinin muhtemel ASR riskine sebep olma potansiyeli bulunmaktadır. Bununla birlikte MgO bileşiğinin riskli bir seviyede olmadığı gözlenmiştir. Bununla birlikte çimento tanelerinin lazer tane boyut analizine göre yeterli inceliklerde olduğu görülmüştür.

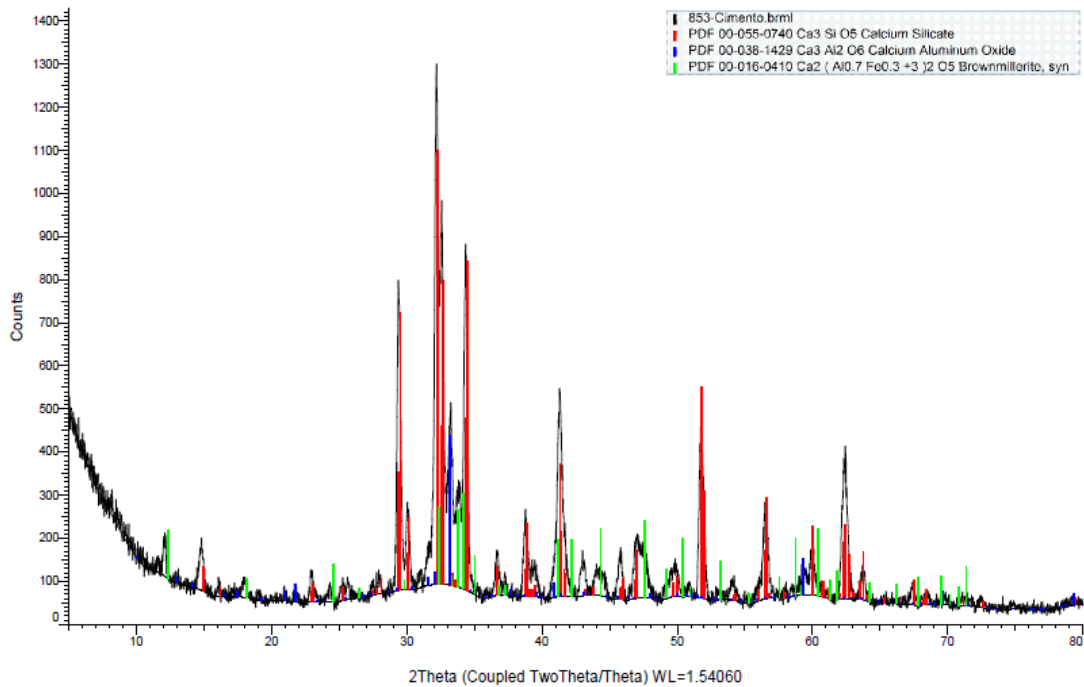
Çimento malzemesinde yapılan XRD analizine göre, malzeme bünyesinde; dolomit, larnit, kalsiyum alüminyum oksit ve kalsiyum silikat gibi mineraller bulunmaktadır (Şekil 4.2).

**Çizelge 4.3** Çimento (41.5 R) malzemesine ait XRF kimyasal analiz sonuçları.

Oksit (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO	K.K.	Toplam
Çimento	16.66	4.62	3.75	1.92	0.79	1.27	4.18	63.90	1.74	98.83

**Çizelge 4.4** 41.5 R tipi çimentoya ait lazer tane boyut analiz değerleri.

Numune	d <sub>10</sub> (µm)	d <sub>50</sub> (µm)	d <sub>90</sub> (µm)
Çimento	1.913	17.322	53.956



**Şekil 4.2** CEM I 42.5 R tipi çimentoya ait XRD difraktogramı.

## 4.2 Harçların Fiziksel Özellikleri

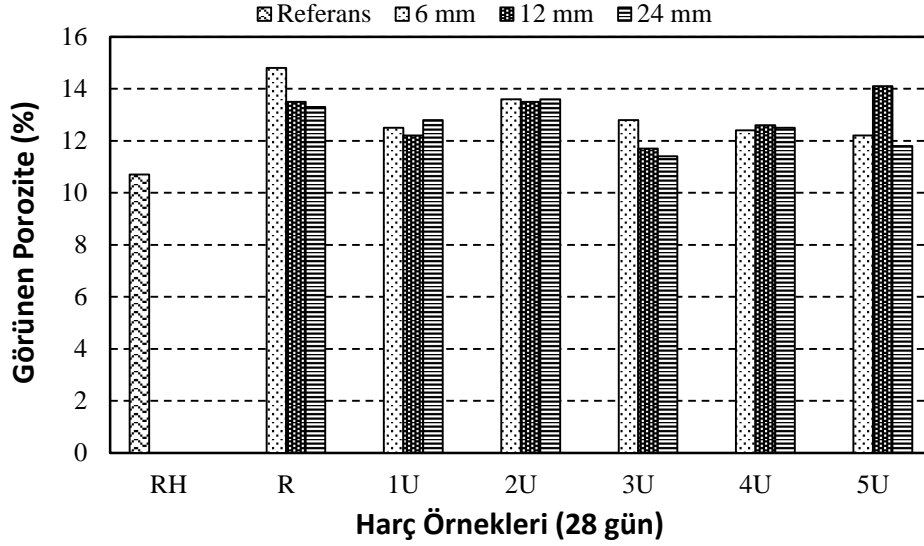
Referans harçlarda elde edilen görünen porozite oranları, 28 ve 90 gün kür edilen örneklerde sırasıyla % 10.7 ve % 10.9 olarak elde edilmiştir. Sadece lif katkılı örneklerde ise 28 günlük kür uygulamalarında referans örneklerden daha yüksek oranlarda görünen porozite oranı elde edilirken, 90 günlük kür uygulanan örneklerde referans harçların sahip olduğu gözenekliliğe yakın değerler oluştuğu belirlenmiştir.

Kür süresinin 28 günden 90 güne uzaması durumunda, örneklerin görünen porozitesinin azaldığı; Harçlara ikame edilen UK miktarının artması durumunda ise uygulanan kür sürelerinin sonuçlar üzerinde değişken sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

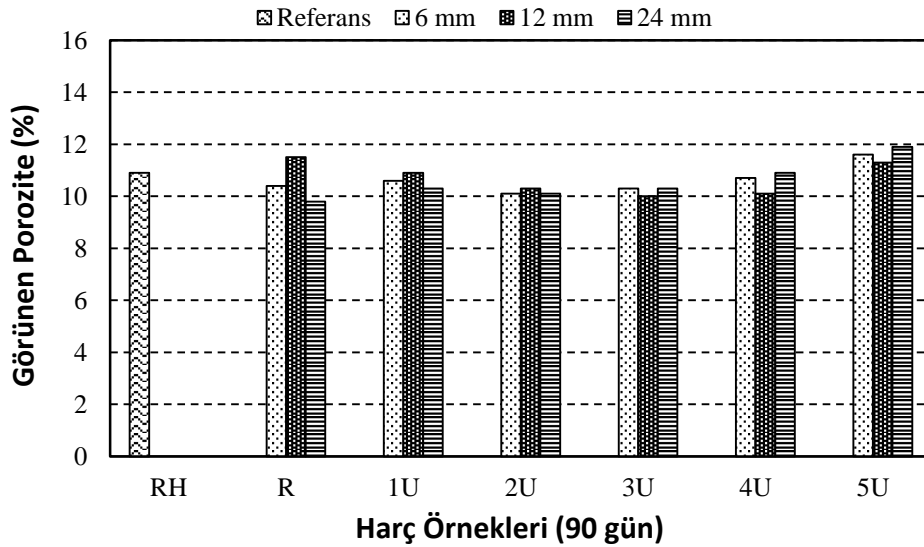
Farklı lif boyu ve UK ikameli harçların 28 günlük örneklerinden elde edilen görünen porozite oranları, UK ikame oranı ve lif boyundan farklı oranlarda etkilenmiştir. Bu nedenle 28 günlük örnekler üzerinde lineer değişimler gerçekleşmemiştir. Bununla birlikte bu örneklerde elde edilen görünen porozite oranları 90 gün kür edilmiş harçlardan bir miktar daha yüksek seviyelerde yer almıştır. 90 günlük örneklerde ise sadece 24 mm uzunluğundaki lif katkılı numunelerde UK oranı arttıkça görünen porozite oranlarında doğrusal bir artış eğilimi saptanmıştır. Bununla birlikte çimentoya ikame edilen uçucu küllerin porozite değerlerini azalttığı belirtilmektedir (Wang *et al.* 2008). Bu noktada, diğer örneklerde çok büyük farklılıklar oluşmadığı gözlenmiştir.

Yapılan bir çalışmada ise % 20 UK ikamesine kadar porozite oranlarının referans örneklere göre bir miktar daha düşük seviyelerde kaldığı, % 30 UK ikamelerinde ise porozitenin referans örneklerinden bir miktar daha yüksek seviyelerde yer aldığı belirtilmektedir (Benli vd. 2017). Normal koşullarda kür süresinin uzaması ile birlikte porozitenin azalması beklenmektedir. Bünye içerisinde kalsiyum hidroksitin varlığında ileriki dönemlerde uçucu külün puzolanik reaksiyonu ile birlikte matris içerisinde hidrat ürünleri artmakta ve neticede mevcut gözenekler bu hidrat ürünleri doldurmakta ve dolayısıyla gözeneklilik oranları azalmaktadır (Teixeira *et al.* 2019). Nitekim porozite yapı malzemelerinin dayanım ve durabilite gibi önemli parametrelerini etkileyen fiziksel özelliklerini belirlemede kullanılan en yaygın parametrelerden biridir (Maria 2010).

Dolayısıyla durabilite özelliklerinin olumlu olabilmesi için malzemenin mümkün mertebede daha az gözenek oranlarına sahip olması gerekir.



Şekil 4.3 Harç numunelerinin (28 günlük) görünür porozite oranları.



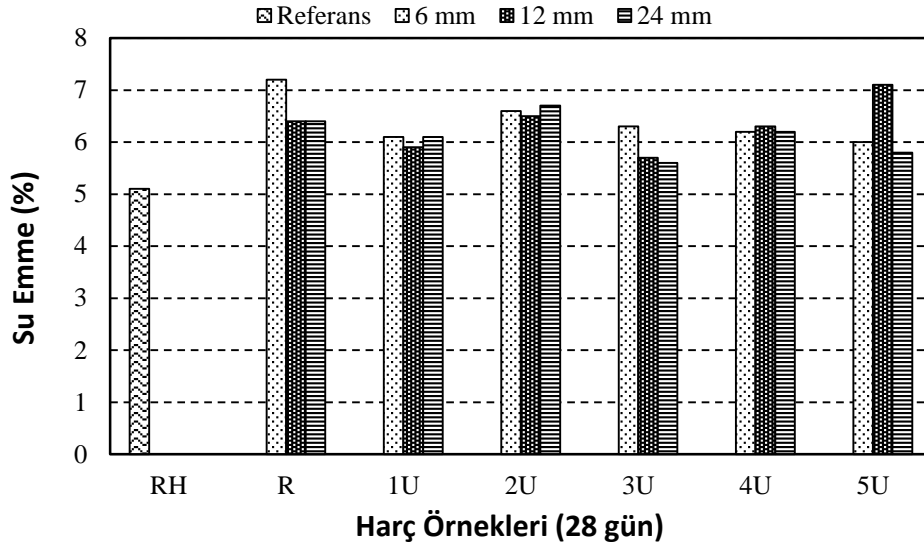
Şekil 4.4 Harç numunelerinin (90 günlük) görünür porozite oranları.

Donma hasarlarına karşı bir malzemenin ne kadar dayanıklı veya uygun olduğunu belirlemede kullanılan testlerden biri de su emme oranlarının belirlendiği yöntemlerdir. Normal koşullarda bir malzeme bulunan nem içeriğinin % 30'u aşmaması istenmektedir. Aksi takdirde daha yüksek bir oranda su emme oranlarına sahip olan malzemenin don hasarları alacağı belirtilmektedir (Bicer 2018). Su emme kapasitesi

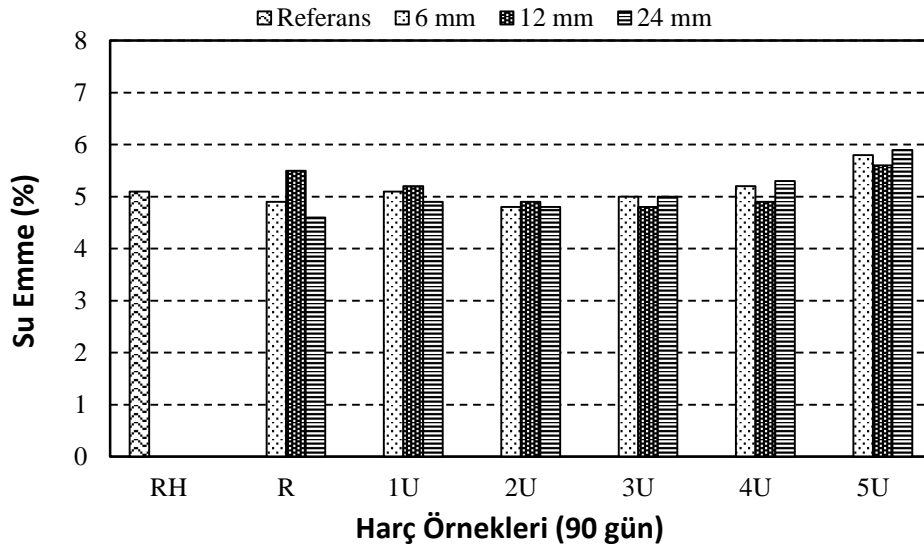
malzemenin durabilitesini ve servis ömrü boyunca karşı karşıya kalacağı etkilere karşı göstereceği fiziksel ve kimyasal reaksiyonlardaki dayanımını etkilemektedir. Malzemenin su emme oranları ne kadar yükseğe bünyede o kadar yüksek permeabilitiye sahip olur. Bu ise malzemenin fiziksel ve mekanik anlamda durabilitesi ve dayanımında kayıpları beraberinde getirir. Aynı zamanda su emme kapasitesi malzemenin yoğunluk değerleri ile basınç, eğilme ve elastiklik modülü gibi mekanik özelliklerini etkilemektedir (Demir ve Sevim 2018).

UK ikame oranı ve lif katkısına bakılmaksızın harç örneklerinde su emme oranları % 4.6 - % 7.2 arasında değişkenlik göstermiştir. Genel olarak lif boyunun sonuçlar üzerinde değişken değerler verdiği bununla birlikte 90 günlük numunelerde su emme oranlarının %30 UK ikamesi ve üzerindeki oranlarda lineer olarak artış gösterdiği belirlenmiştir. 28 günlük harç örneklerinde ise UK ikamesi ve lif katkısı ile su emme oranları arasında lineer bir ilişki görülmemiştir.

En düşük su emme oranları 90 günlük numuneler içinde sadece lif katkılı örneklerden (R690, R1290 ve R2490) elde edilirken, en yüksek su emme oranları % 50 UK ikameli harçlardan elde edilmiştir. 28 günlük harç örneklerinde en yüksek su emme oranları R kodlu örneklerden elde edilirken (% 7.2), en düşük su emme oranları 90 günlük 24 mm'lik lif katkılı R kodlu örneklerden elde edilmiştir (% 4.6). Genel olarak değerlendirildiğinde 28 günlük numunelerin 90 günlük numunelere oranla daha yüksek seviyelerde su emme oranlarına sahip oldukları tespit edilmiştir. Çimento harçları içerisine ikame edilen UK oranlarının % 30'a kadar yapıldığı bir çalışmada da UK ikame oranlarının artması neticesinde su emme kapasitelerinin artabileceği bununla birlikte dayanımların ise zayıflayabileceği belirtilmektedir (Demir ve Sevim 2018).



Şekil 4.5 Harç numunelerinin (28 günlük) su emme oranları.



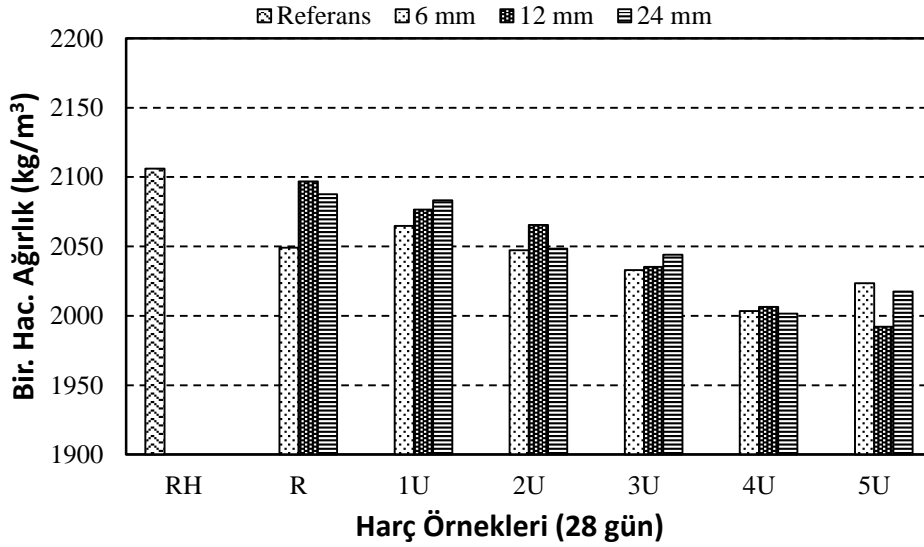
Şekil 4.6 Harç numunelerinin (90 günlük) su emme oranları.

Harçların 90 günlük örneklerinin 28 günlük örneklere göre daha yoğun bir yapıda olduğu gözlenmiştir. Normal şartlarda kullanılan malzemelerin özgül ağırlık değerleri dikkate alındığında bünyede artan UK ikame oranı ile harçların birim hacim ağırlıklarının doğrusal olarak azalması beklenmektedir. Nitekim uçucu küllerin kullanım oranlarının artırılması durumunda yoğunluk değerlerinin de azalacağı belirtilmiştir (Bicer 2018).

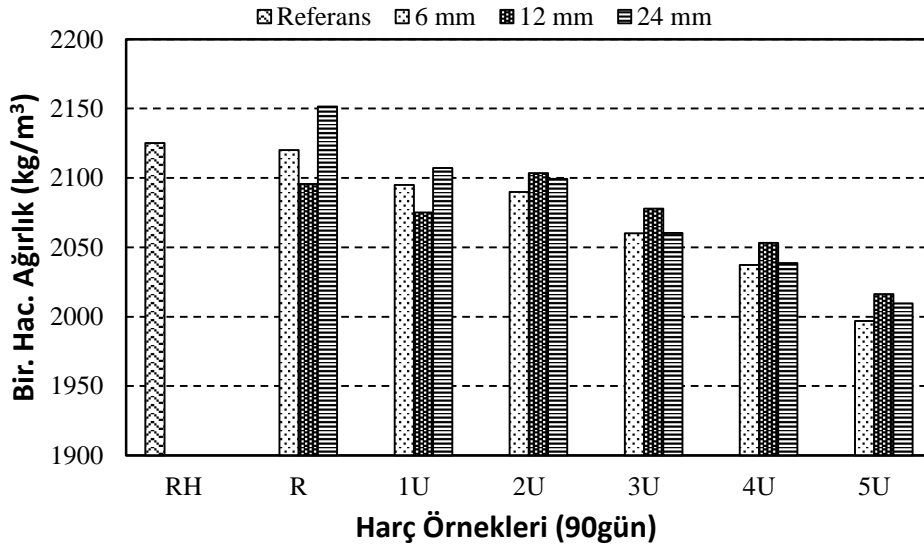
Bu doğrultuda, 28 ve 90 günlük numunelerde UK ikamesi arttıkça örneklerin birim hacim ağırlıklarında azalmalar gözlenmiştir. Bununla birlikte harç örneklerine eklenen lif



boyutunun ise sonuçlar üzerinde belirgin bir etki yapmadığı gözlenmiştir. %50 UK ikameli harçların en düşük birim hacim ağırlıklara sahip olduğu görülmektedir. Harçlardan elde edilen verilere göre 28 günlük numunelerde birim hacim ağırlıklar 1992.1 kg/m<sup>3</sup> - 2106.2 kg/m<sup>3</sup>; 90 günlük numunelerde ise 1996.8 kg/m<sup>3</sup> - 2151.6 kg/m<sup>3</sup> arasında değişkenlik göstermiştir.



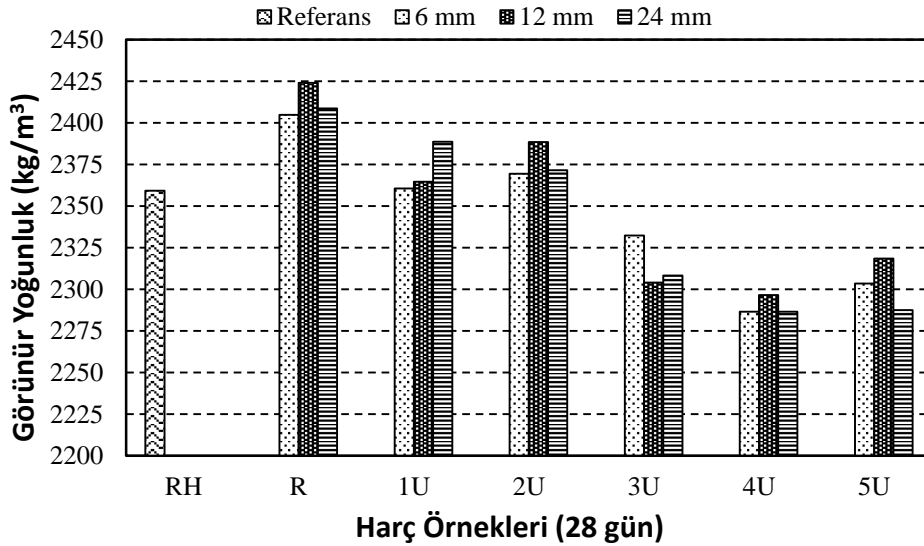
Şekil 4.7 Harç numunelerinin (28 günlük) birim hacim ağırlığı.



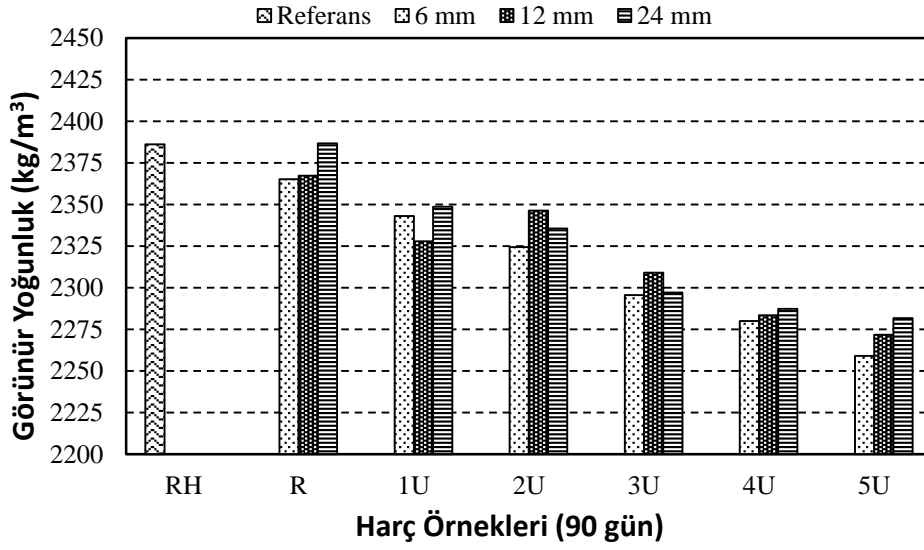
Şekil 4.8 Harç numunelerinin (90 günlük) birim hacim ağırlığı.

Görünür yoğunluk değerleri incelendiğinde ise örneklerin bünyesinde bulunan UK ikamesi arttıkça görünür yoğunlukların birim hacim ağırlıklar da olduğu gibi azaldığı

gözlenmiştir. 28 günlük numunelerin görünür yoğunlukları değişkenlik gösterirken, 90 günlük harçlarda 6 ve 24 mm uzunluğundaki liflerin ilave edildiği harçlarda görünür yoğunluklar lineer olarak azalmıştır. 28 günlük harçlarda en yüksek görünür yoğunluk değerleri % 100 çimento (R serisi) ve 12 mm lif katkılı numunelerden elde edilirken; 90 günlük harçlarda ise maksimum görünür yoğunluklar % 100 çimento (R serisi) ve 24 mm lif katkılı numunelerden elde edilmiştir. Nitekim örneklerin yoğunluk değerleri arttığında malzemenin mekanik özelliklerinin ve doluluğunun arttığı, doluluk oranlarının artması ile birlikte daha az boşluklu yapılara sahip olacağı ve dolayısıyla daha yüksek dayanımlara sahip olabileceğide belirtilmektedir (Demir ve Sevim 2018). Bununla birlikte, 28 ve 90 günlük numunelerin görünür yoğunlukları sırasıyla; 2286.5 kg/m<sup>3</sup> - 2424.0 kg/m<sup>3</sup> ve 2259.1 kg/m<sup>3</sup> - 2386.7 kg/m<sup>3</sup> arasında değişkenlik göstermiştir.



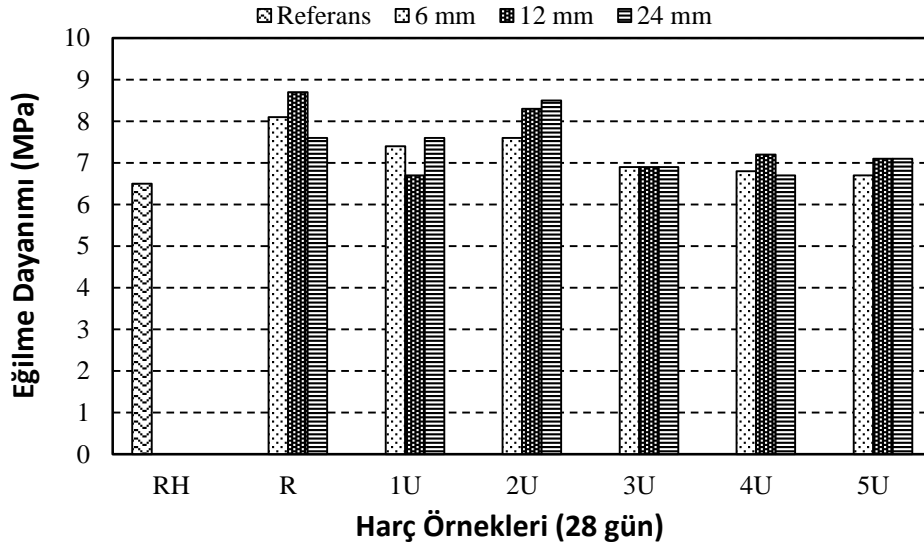
Şekil 4.9 Harç numunelerinin (28 günlük) görünür yoğunlukları.



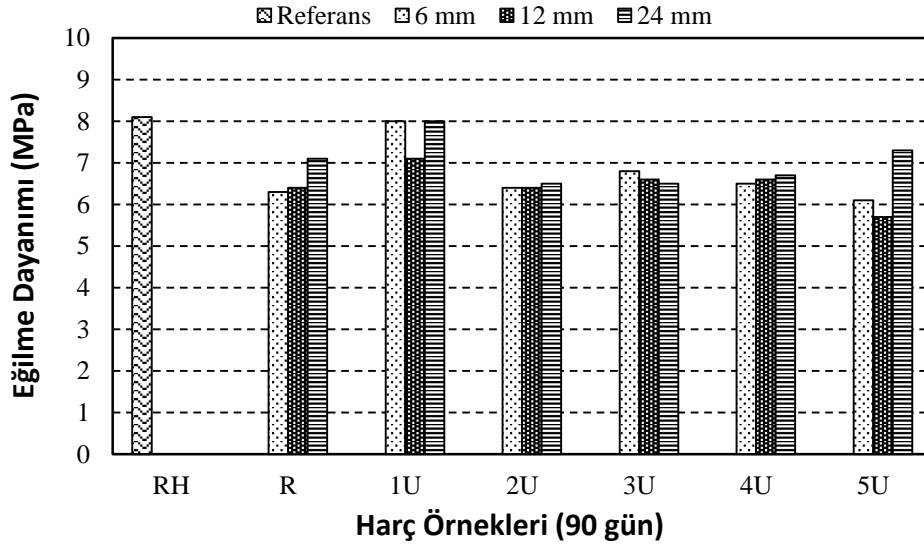
Şekil 4.10 Harç numunelerinin (90 günlük) görünür yoğunlukları.

#### 4.3 Harç Numunelerin Eğilme ve Basınç Dayanım Özellikleri

Harç numunelerin eğilme dayanım testlerinden elde edilen veriler ışığında, 28 ve 90 günlük numuneler arasında belirgin bir farkın oluşmadığı görülmüştür. %100 çimentolu 28 günlük 12 mm lif katkıli harçların (R1228) 8.7 MPa ile 90 günlük numunelerde ise RH harçlarının 8.1 MPa ile en yüksek eğilme dayanım değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. 28 gün kür edilen harçlarda sadece lif katkısının yapıldığı örneklerde eğilme dayanımı artmıştır. Nitekim çimento harçlarına ikame edilen liflerin eğilme dayanımını arttırdığı bilinmektedir (Çavdar 2014). Bununla birlikte üretilen harçlarda UK ikamesinin sonuçlar üzerinde lineer bir etki yapmadığı ve ikame oranlarının artmasına paralel olarak elde edilen değerlerin değişken olduğu gözlenmiştir. Bu noktada % 30 UK ikameli harçlarda sadece 180 günlük örneklerde eğilme dayanımı değerlerinin referans örnekleri geçebildiği belirtilmiştir (Benli vd. 2017). Bu noktada lif katkıli 28 gün kür edilen örneklerin tümünün referans örnekleri geçtiği açıkça görülebilmektedir. 90 günlük örneklerde ise tüm harç örneklerinden elde edilen eğilme dayanımı değerleri referans örneklerden düşük seviyede kalmıştır. Bünyeye eklenen lifler eğilme dayanımında istenilen sonucu vermemiştir. Karışımlarda bulunan UK oranlarındaki artışın eğilmede çekme dayanımı değerlerini düşürdüğü belirtilmiştir (Nagaratnam *et al.* 2015). Lif boyundaki artışın ise genel anlamda eğilme dayanımı değerlerini nispeten arttırdığı görülebilmektedir.



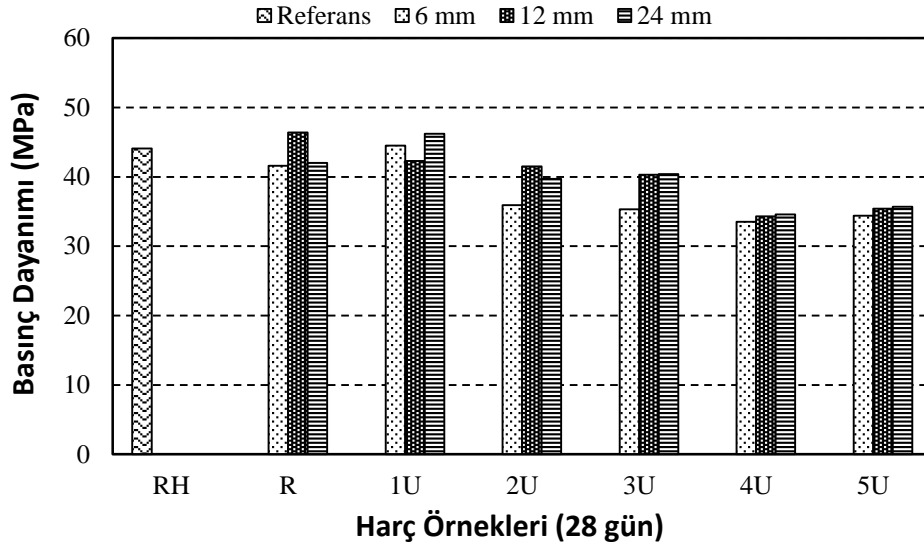
Şekil 4.11 Harç numunelerinin (28 günlük) eğilme dayanımları.



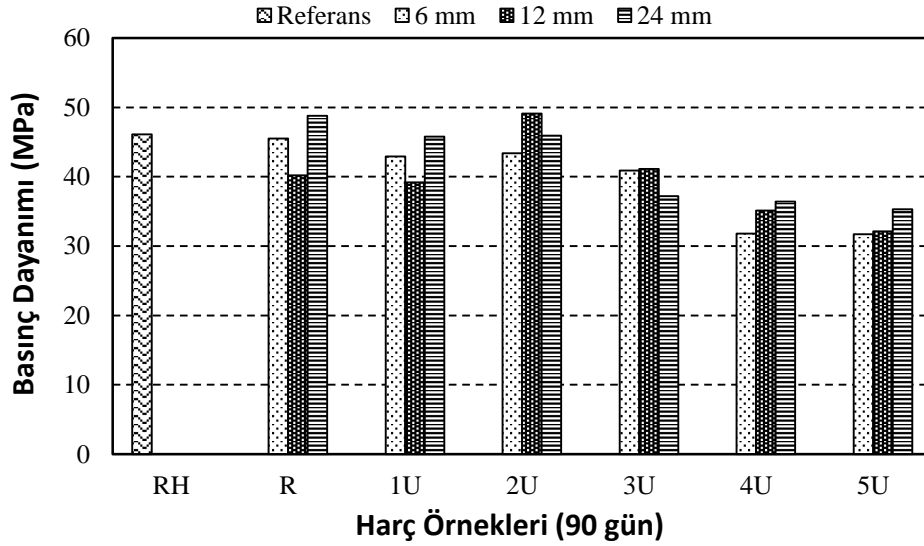
Şekil 4.12 Harç numunelerinin (90 günlük) eğilme dayanımları.

Basınç dayanım değerleri incelendiğinde uygulanan kür süresinin artması ile birlikte numunelerin dayanımlarında artış olduğu belirlenmiştir. 90 gün kür edilen harç örneklerinde, örneklere ikame edilen UK oranlarının %30'a kadar olduğu harçlarda örneklerin basınç dayanımları artmıştır. Bu noktada referans örnekler ile % 10 UK ikameli örneklerin basınç dayanımlarının benzer olduğu gözlenmiş olup yapılan başka bir çalışmada bu benzerliğe değinilmiştir (Bicer 2018). Başka bir çalışmada ise % 20 ve % 40 UK ikameli harçların referans harçlardan daha yüksek basınç dayanım değerlerinde olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte % 60 UK ikamesinde ise referans

örneklere göre değerler düşmüştür. Bu noktada çimento miktarının değerler üzerinde önemli bir rol oynadığına dikkate alınmalıdır (Nadeem *et al.* 2013). Üretilen harçlar içerisinde %40 - %50 UK ikameli 28 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımlarında ise önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Şekil 4.13 ve 4.14 incelendiğinde 28 günlük örneklerin basınç dayanımları 33.5 MPa - 46.4 MPa; 90 günlük örneklerin basınç dayanımları ise 31.7 MPa - 49.1 MPa arasında değişmektedir. Tüm örnekler içerisinde en yüksek basınç dayanımı 90 gün kür edilen %20 UK ikameli ve 12 mm lif katkılı örneklerden elde edilmiştir. Nitekim farklı lif katkılı çimento harçlarında lif katkıları basınç dayanımlarını azaltmaktadır (Çavdar 2014). Lifler, harçlara eklendiğinde çimento matrisine ve agregaya göre daha sünek bir yapıya sahip olduklarından, çimento matrisinde süreksizliğe neden olurlar. Bu nedenle harçların basınç dayanımını azaltması beklenir (Çavdar 2014). Harç örneklerinin uzayan kür sereleri ile dayanımlarının artmasında uçucu külün geç hidrate olması yatmaktadır. Bunun yanında erken dayanımların nispeten daha düşük olması ise bünyede bulunan C<sub>3</sub>S varlığının düşük seviyelerde olmasından kaynaklıdır. Nitekim UK ikame oranlarının artması ile birlikte C<sub>3</sub>S oranları nispeten daha da azalmakta ve dolayısıyla artan UK ikame oranları 28 gün kür edilen harç örneklerinde basınç dayanım değerlerini azaltmaktadır. UK ikamesinin % 30 oranlarına kadar yapıldığı harç örneklerinde de basınç dayanım değerlerinin ikame oranının artması ile azaldığı ve UK ikameli harçlarda referans örneklere göre daha düşük değerler elde edildiği gözlenmiştir (Benli vd. 2017). Aynı zamanda yapılan başka bir çalışmada, karışımlarda sadece % 10 oranında uçucu kül kullanılan karışımlarda referans örneklerle benzer dayanım değerleri alınabildiği de belirtilmektedir (Barbosa *et al.* 2013). Bununla birlikte UK ikamesinin % 10 olduğu örneklerde 90 gün kür sürelerine kadar elde edilen basınç dayanım değerlerinin referans örneklerden daha düşük seviyelerde kaldığı, 90 günden daha uzun kür sürelerinde ise referans örnekleri geçtiği belirtilmektedir (Aghabaglou *et al.* 2014).Yapılan başka bir çalışmada ise erken yaşlarda % 50 UK ikameli harçlarda referans örneklere göre % 53, UK ikamesinin % 20 olduğu örneklerde ise % 27 dayanım kaybı olduğu belirtilmiştir (Yıldırım ve Sümer 2013).



Şekil 4.13 Harç numunelerinin (28 günlük) basınç dayanım değerleri.

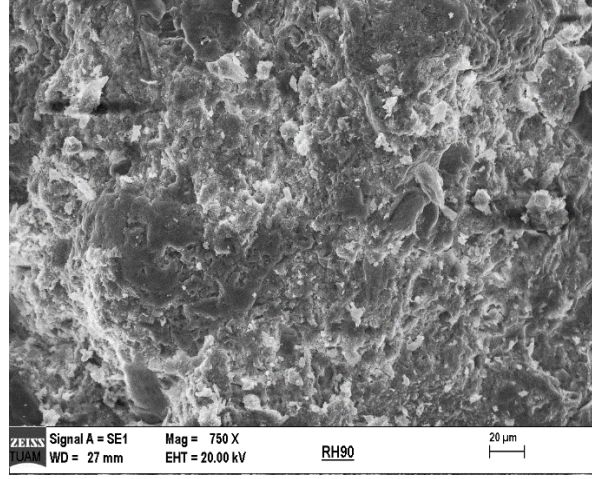


Şekil 4.14 Harç numunelerinin (90 günlük) basınç dayanım değerleri.

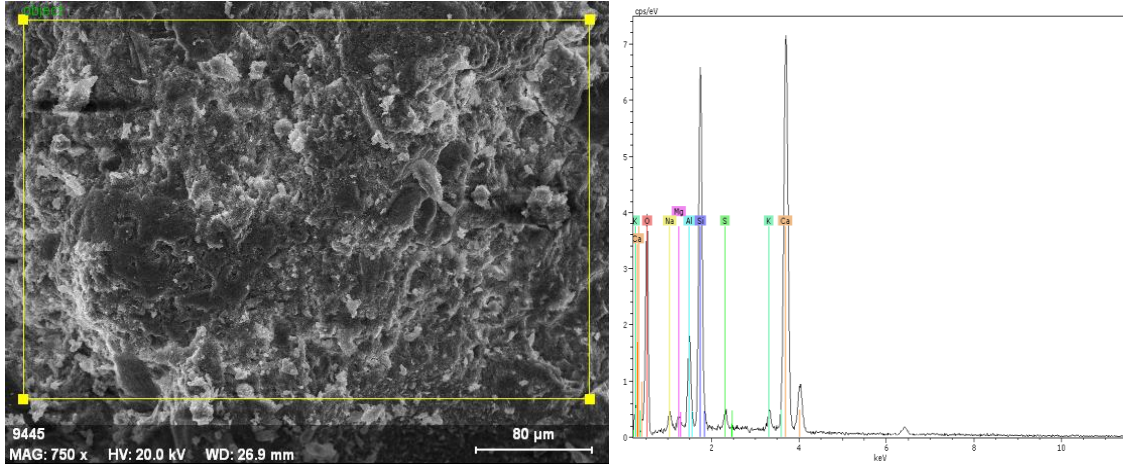
#### 4.4 SEM-EDX Analizleri

Harç numunelerden seçilen bazı örnekler üzerinde SEM-EDX analizleri uygulanmış ve ilgili örneklerin morfolojik özellikleri ile içerdikleri bileşikler araştırılmıştır. Bu kapsamda referans harç, % 0, % 10 ve % 20 UK ikameli ve 6 mm-12 mm-24 mm lif katkılı 90 günlük numunelerin incelemeleri yapılmıştır. Bu doğrultuda öncelikle 90 günlük referans harç numunelerine ait SEM resimleri elde edilmiş ve Resim 4.1'de

gösterilmiştir. SEM görüntüsünde de görülebileceği gibi örnek morfolojisinde herhangi bir çatlak oluşumu tespit edilmemiştir.



**Resim 4.1** RH90 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü (x750 büyütme).



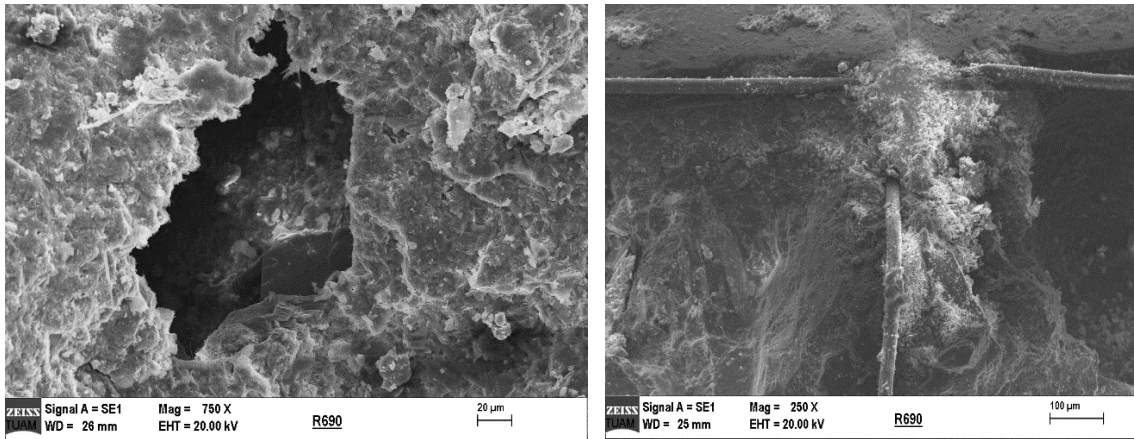
**Resim 4.2** RH90 kodlu harç numunenin SEM-EDX grafiği.

SEM – EDX analizlerine göre referans harç numunelerinin bünyesinde; sodyum, magnezyum, alüminyum, silis, sülfür, potasyum, kalsiyum ve oksijen bulunmaktadır (Çizelge 4.5 ve Resim 4.2).

**Çizelge 4.5** RH90 kodlu harç numunenin EDX verileri.

Element	Net	unn. C [ağırlıkça.- %]	norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Sodyum	1012	1.88	1.64	1.52	Na <sub>2</sub> O	2.68
Magnezyum	729	0.91	0.79	0.70	MgO	0.96
Alüminyum	4650	4.63	4.04	3.20	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.27
Silis	19326	17.63	15.36	11.70	SiO <sub>2</sub>	39.96
Sülfür	1215	1.09	0.95	0.63	SO <sub>3</sub>	2.88
Potasyum	1354	1.18	1.03	0.56	K <sub>2</sub> O	1.51
Kalsiyum	29816	28.83	25.13	13.41	CaO	42.75
Oksijen	9442	58.59	51.07	68.27		23.72

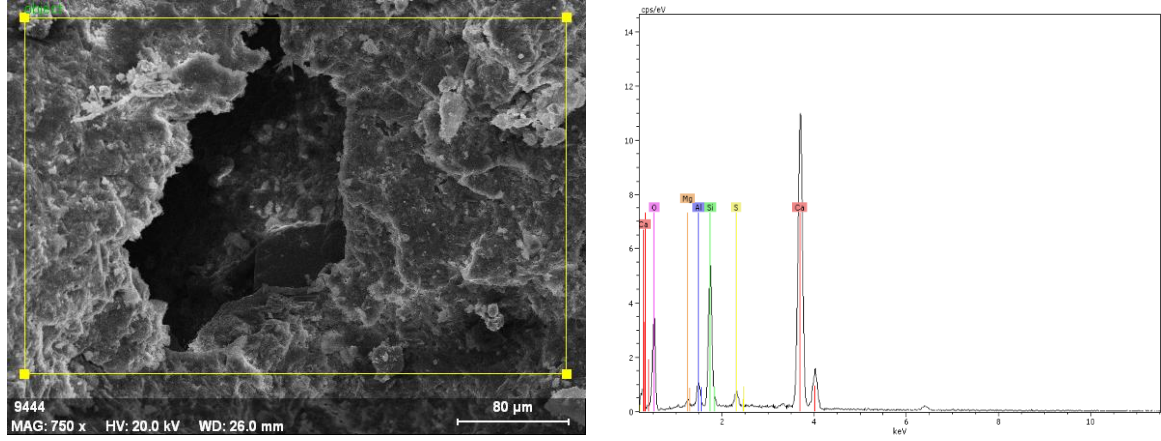
90 günlük 6 mm lif katkılı harç numunelere ait SEM resimleri Resim 4.3’de gösterilmiştir. SEM görüntülerinden malzeme bünyesinde açık gözenek yapılarının oluştuğu gözlenmiştir.



**Resim 4.3** R690 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü (x250, x750 büyütme).

SEM – EDX analizlerine göre 6 mm’lik lif ilaveli harç numunelerinin bünyesinde; magnezyum, alüminyum, silis, sülfür, kalsiyum ve oksijen minerallerinin varlığı tespit edilmiştir (Çizelge 4.6 ve Resim 4.4 ). Referans örneklerin değerleri dikkate alındığında ise bünyede CaO miktarının arttığı gözlenmiştir. Bu artışın alansal EDX analizinin alındığı bölge nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir.



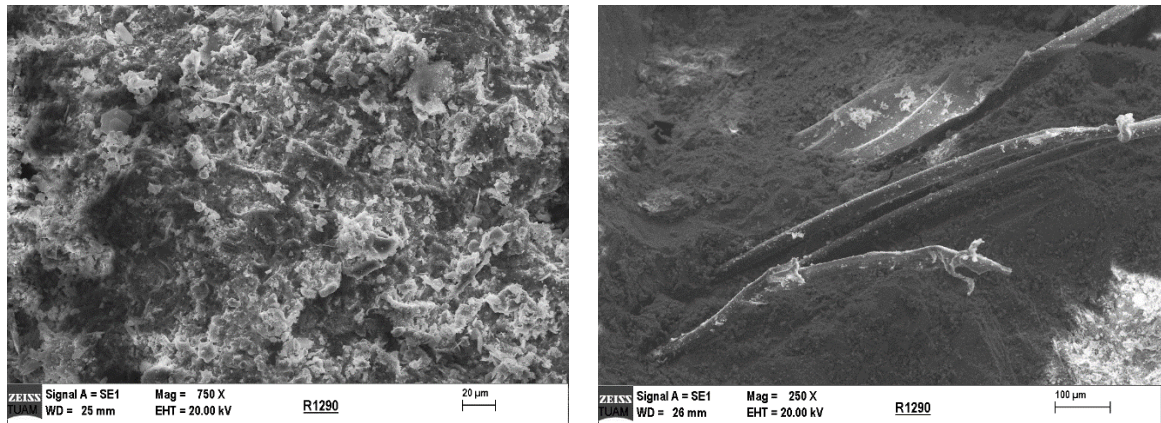


**Resim 4.4** R690 kodlu harç numunenin SEM-EDX grafiği.

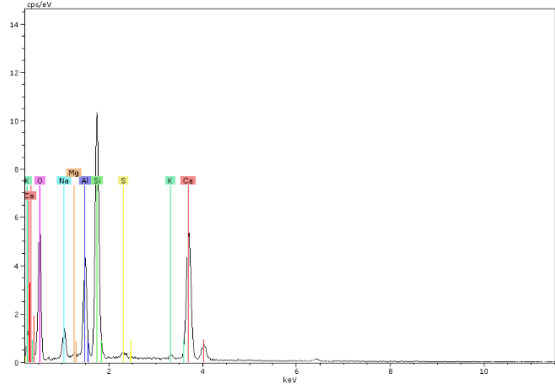
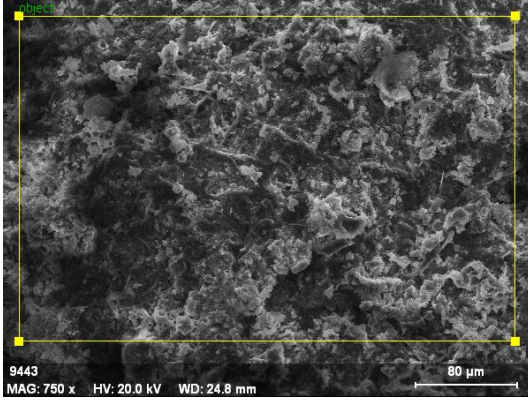
**Çizelge 4.6** R690 kodlu harç numunenin EDX verileri.

Element	Net	unn. C [ağırlıkça.- %]	norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Magnezyum	221	0.21	0.21	0.18	Mg	0.30
Alüminyum	1739	1.33	1.31	1.03	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.56
Silis	12852	8.87	8.76	6.61	SiO <sub>2</sub>	26.89
Sülfür	1412	0.97	0.96	0.64	SO <sub>3</sub>	3.45
Kalsiyum	39750	33.19	32.76	17.33	CaO	65.80
Oksijen	7328	56.73	56.00	74.21		40.20

90 günlük 12 mm lif katkılı harç numunelere ait SEM resimleri Resim 4.5’de gösterilmiştir. Görüntülere göre lif katkısının bünye morfolojisinde çatlak oluşuma sebep olmadığı gözlenmiştir.



**Resim 4.5** R1290 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü (x250, x750 büyütme).



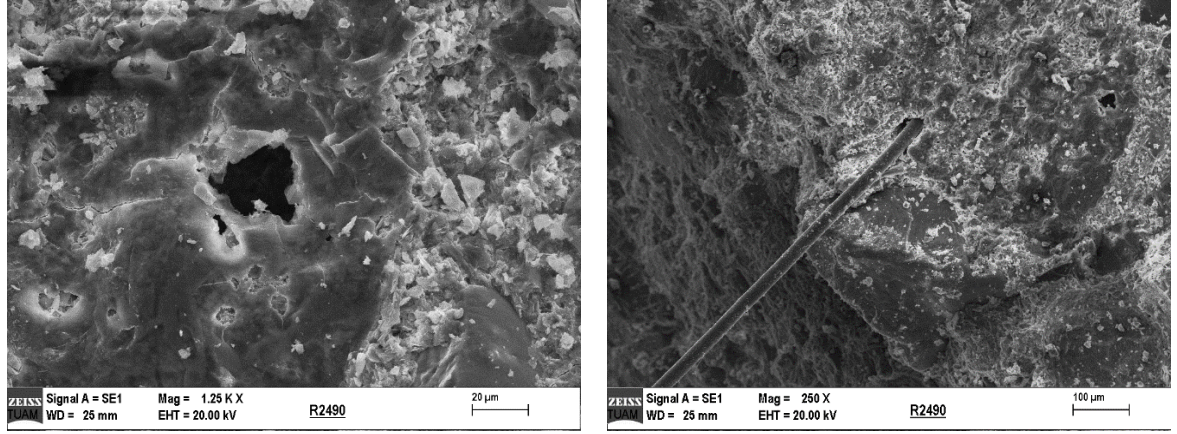
**Resim 4.6** R1290 kodlu harç numunenin SEM-EDX grafiği.

SEM – EDX analizlerine göre 12 mm’lik lif ilaveli harç numunelerinin bünyesinde; magnezyum, alüminyum, silis, sülfür, potasyum, kalsiyum ve oksijen bulunmaktadır (Çizelge 4.7 ve Resim 4.6). 6 mm lif katkılı örneklerin değerleri dikkate alındığında bünyede  $Al_2O_3$  miktarının arttığı gözlenmiştir. Yine bu artışın alansal EDX analizinin alındığı bölgeye göre karışımın tam homojenize olmamasından kaynaklı bir artış olduğu düşünülmektedir.

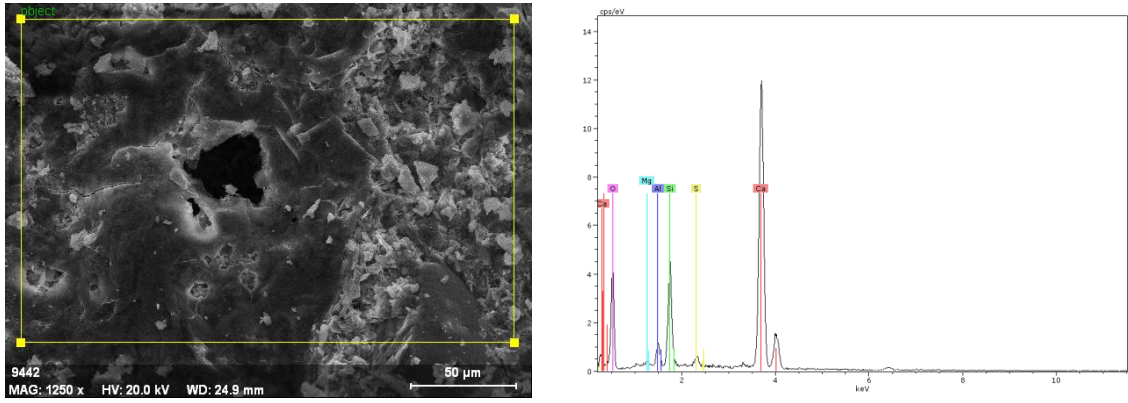
**Çizelge 4.7** R1290 kodlu harç numunenin EDX verileri.

Element	Net	unn. C [ağırlıkça.- %]	norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Sodyum	3872	4.20	3.86	3.43	$Na_2O$	6.33
Magnezyum	723	0.55	0.50	0.42	Mg	0.61
Alüminyum	13336	8.11	7.45	5.65	$Al_2O_3$	17.12
Silis	34685	20.32	18.66	13.59	$SiO_2$	48.53
Sülfür	1144	0.67	0.62	0.39	$SO_3$	1.87
Potasyum	653	0.38	0.35	0.18	$K_2O$	0.51
Kalsiyum	24983	16.02	14.71	7.51	CaO	25.02
Oksijen	15055	58.64	53.85	68.83		22.69

90 günlük 24 mm lif katkılı harç numunelere ait SEM resimleri Resim 4.7’de gösterilmiştir. SEM – EDX analizlerine göre 24 mm’lik lif ilaveli harç numunelerinin bünyesinde; magnezyum, alüminyum, silis, sülfür, kalsiyum ve oksijen bulunmuştur (Çizelge 4.8 ve Resim 4.7).



**Resim 4.7** R2490 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü (x250, x750 büyütme).



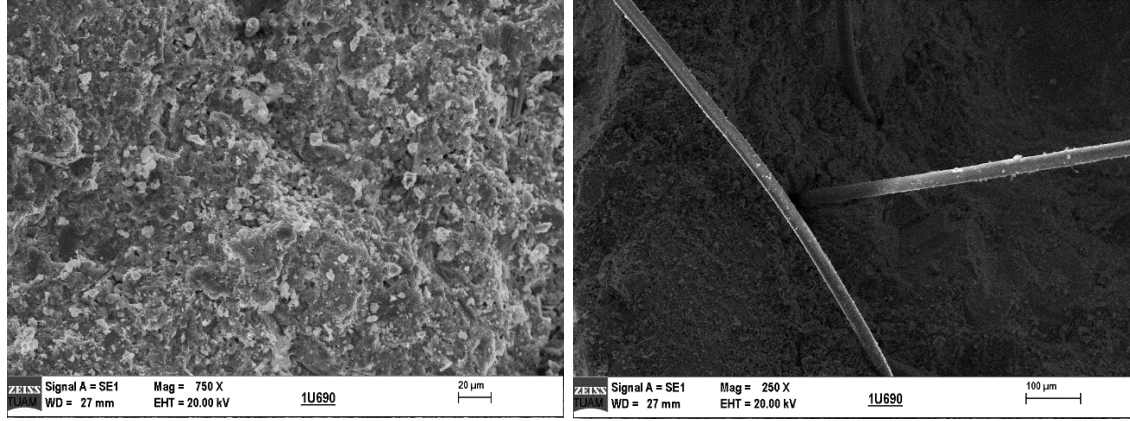
**Resim 4.8** R2490 kodlu harç numunesinin SEM-EDX grafiği.

**Çizelge 4.8** R2490 kodlu harç numunesinin EDX verileri.

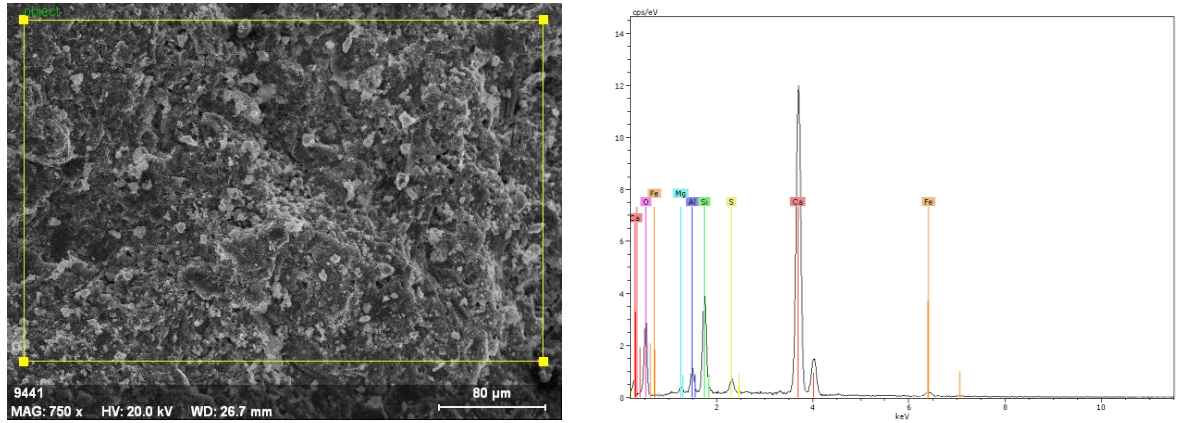
Element	Net	unn. C [ağırlıkça.- %]	norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Magnezyum	65	0.05	0.04	0.04	Mg	0.07
Alüminyum	1713	1.02	0.96	0.74	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.92
Silis	10992	6.06	5.69	4.22	SiO <sub>2</sub>	19.66
Sülfür	1064	0.63	0.59	0.38	SO <sub>3</sub>	2.38
Kalsiyum	44985	35.33	33.19	17.23	CaO	74.97
Oksijen	9588	63.34	59.52	77.39		49.47

90 günlük % 10 UK ve 6 mm uzunluğunda lif katkılı harç numunelere ait SEM resimleri Resim 4.9’da gösterilmiştir. SEM görüntülerinden elde edilen yüzey morfolojisinde bünye içerisinde topaklaşma yada herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Bununla birlikte alansal EDX sonuçları Çizelge 4.9’da verilmiştir.





**Resim 4.9** 1U690 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü (x250, x750 büyütme).

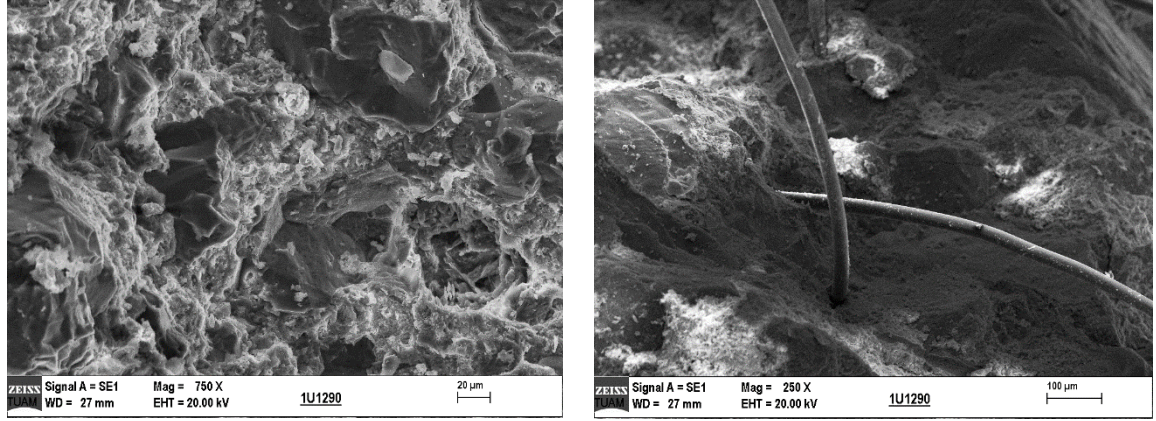


**Resim 4.10** 1U690 kodlu harç numunesinin SEM-EDX grafiği

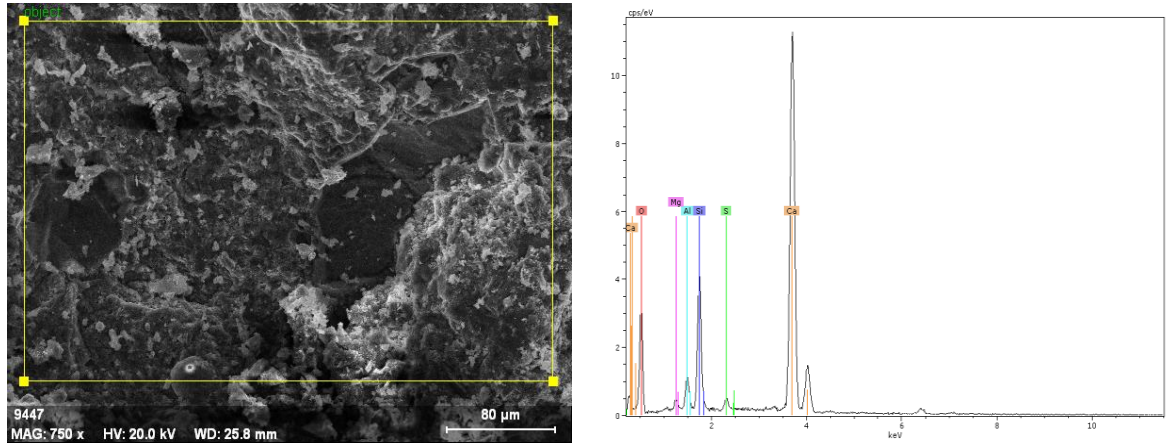
**Çizelge 4.9** 1U690 kodlu harç numunesinin EDX verileri.

Element	Net	unn. C [ağırlıkça.- %]	norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Magnezyum	1218	0.88	0.91	0.82	Mg	1.15
Alüminyum	4197	2.38	2.47	2.02	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.92
Silis	18418	9.24	9.58	7.52	SiO <sub>2</sub>	25.94
Sülfür	3436	1.60	1.66	1.14	SO <sub>3</sub>	5.24
Kalsiyum	79128	32.14	33.32	18.32	CaO	59.00
Demir	1310	1.47	1.53	0.60	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.76
Oksijen	11422	48.75	50.54	69.59		28.89

90 günlük % 10 UK ve 12 mm uzunluğunda lif katkıli harç numunelere ait SEM resimleri Resim 4.11'de gösterilmiştir. Bünyede bulunan lif boyunun artması ile birlikte yüzey morfolojisinde CaO miktarında artışlar gerçekleşmiştir (Resim 4.12 ve Çizelge 4.10).



**Resim 4.11** 1U1290 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü (x250, x750 büyütme).



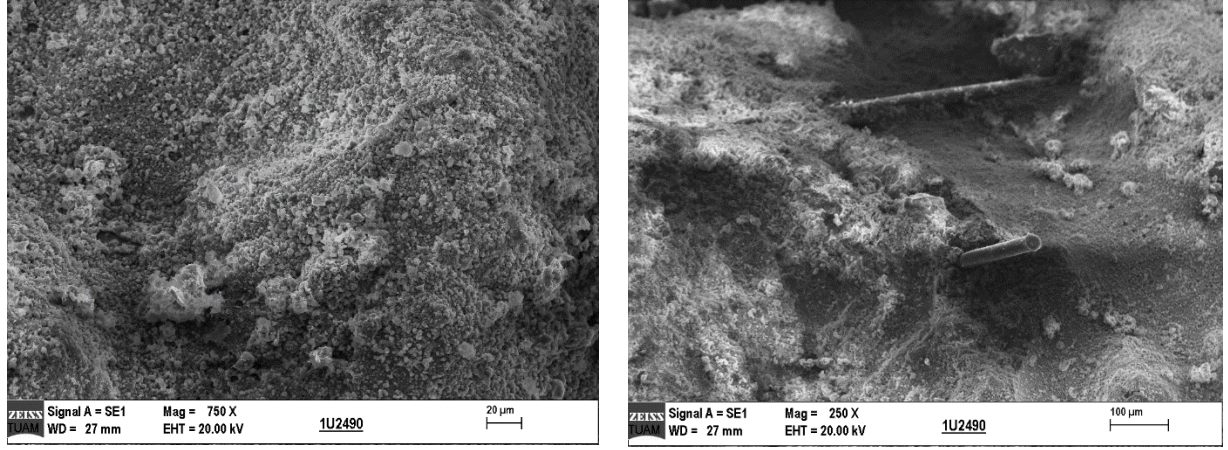
**Resim 4.12** 1U1290 kodlu harç numunesinin SEM-EDX grafiği

**Çizelge 4.10** 1U1290 kodlu harç numunesinin EDX verileri.

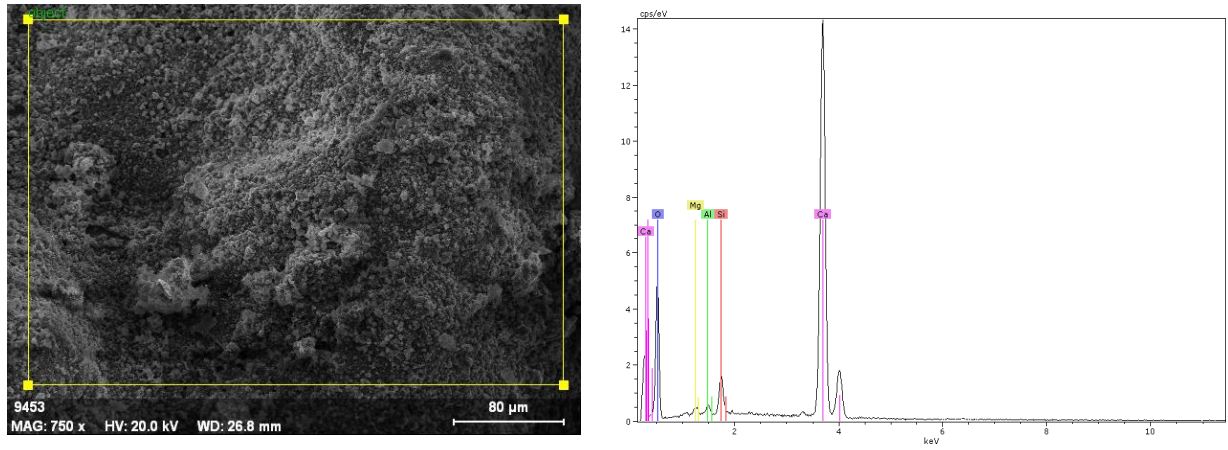
Element	Net	unn. C [ağırlıkça.- %]	norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Magnezyum	423	0.31	0.30	0.26	Mg	0.45
Alüminyum	2694	1.58	1.56	1.23	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.37
Silis	13099	6.97	6.87	5.20	SiO <sub>2</sub>	21.82
Sülfür	754	0.40	0.39	0.26	SO <sub>3</sub>	1.45
Kalsiyum	54198	35.10	34.61	18.34	CaO	71.90
Oksijen	9210	57.07	56.27	74.71		43.35

90 günlük % 10 UK ve 24 mm uzunluğunda lif katkıli harç numunelere ait SEM resimleri Resim 4.13'de gösterilmiştir. Bu örneklerde de CaO miktarının artışı devam etmiştir (Resim 4.14 ve Çizelge 4.11).





**Resim 4.13** 1U2490 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü (x250, x750 büyütme).



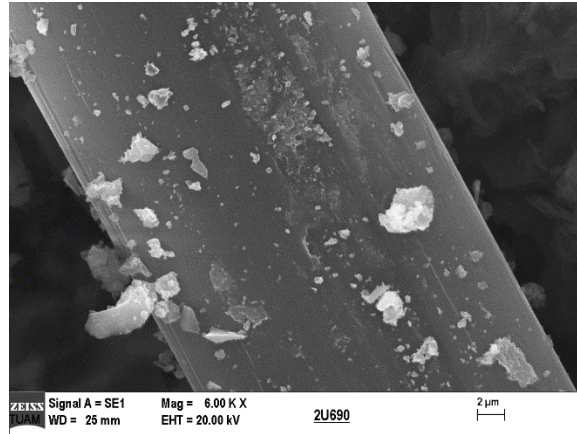
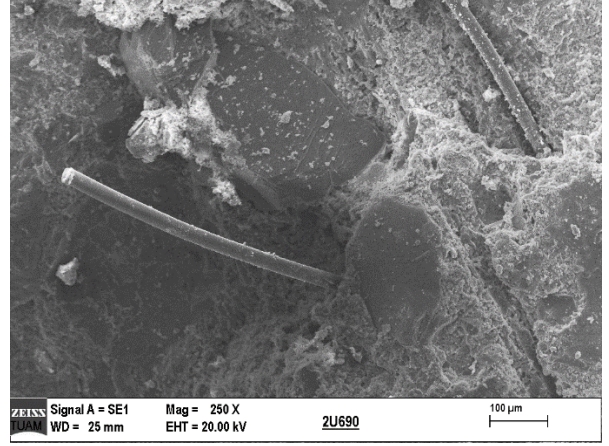
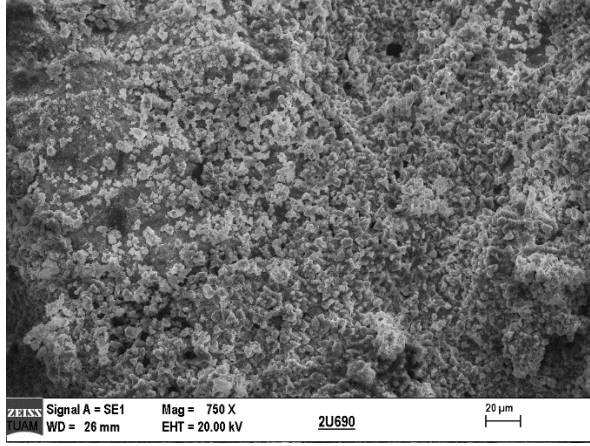
**Resim 4.14** 1U2490 kodlu harç numunesinin SEM-EDX grafiği

**Çizelge 4.11** 1U2490 kodlu harç numunesinin EDX verileri.

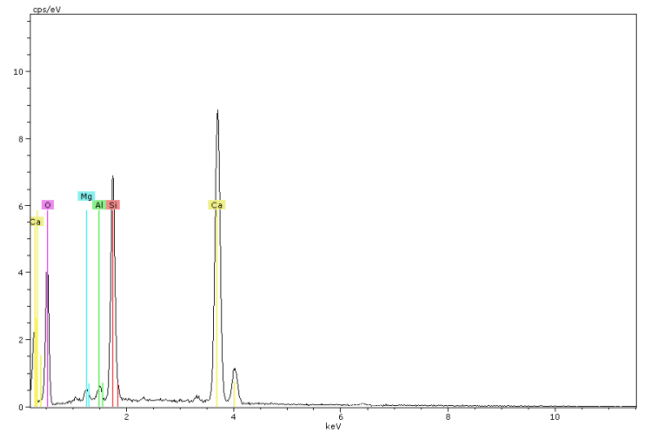
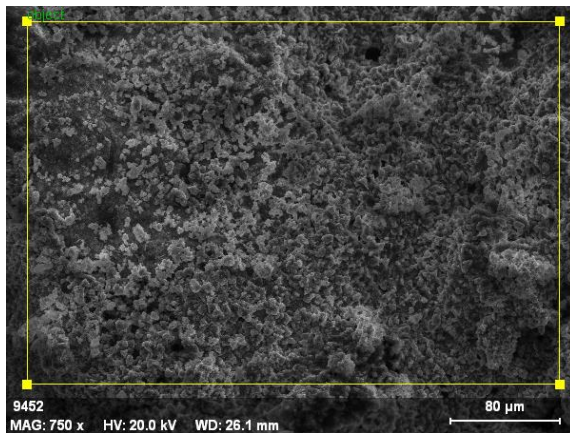
Element	Net	unn. C [ağırlıkça.- %]	norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Magnezyum	282	0.11	0.10	0.09	Mg	0.19
Alüminyum	520	0.17	0.16	0.12	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.55
Silis	5685	1.67	1.56	1.14	SiO <sub>2</sub>	6.19
Kalsiyum	93806	38.50	35.86	18.43	CaO	93.07
Oksijen	18857	66.90	62.32	80.22		59.32

Lif katkılı ve % 20 UK ikameli 90 günlük harç numunelere ait SEM resimleri Resim 4.15, Resim 4.17 ve Resim 4.19'da gösterilmiştir.

SEM – EDX analizlerine örneklerin bünyesinde de; silis, magnezyum, alüminyum, sülfür, kalsiyum ve oksijen minerallerinin varlığı tespit edilmiştir (Çizelge 4.12 - 4.13 - 4.14 ve Resim 4.16 - Resim 4.18 - Resim 4.20).



Resim 4.15 2U690 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü.

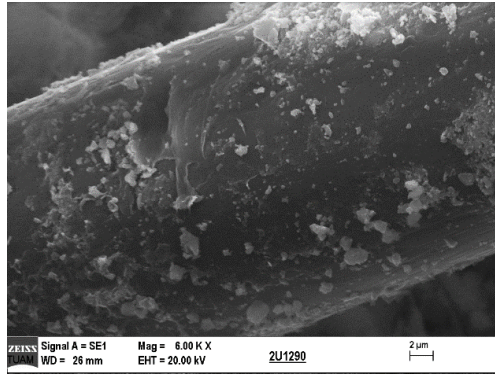
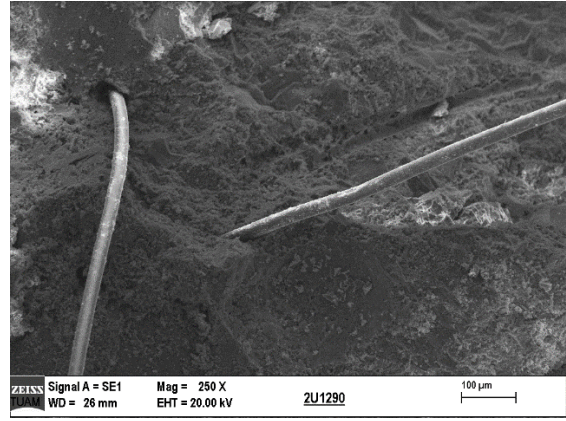
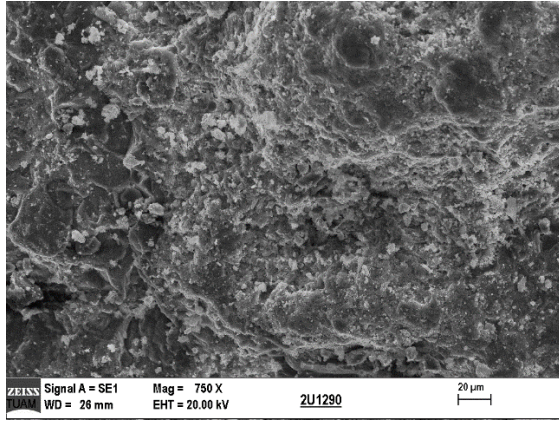


Resim 4.16 2U690 kodlu harç numuneninin SEM-EDX grafiği



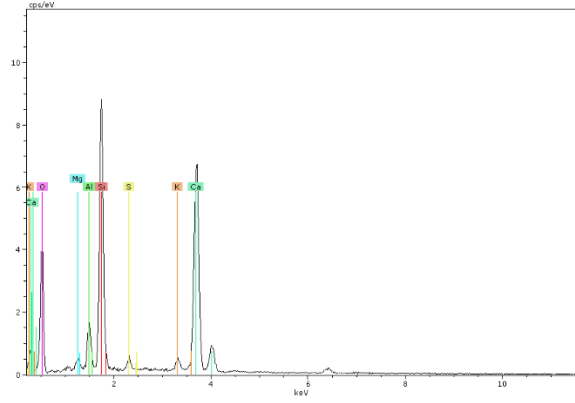
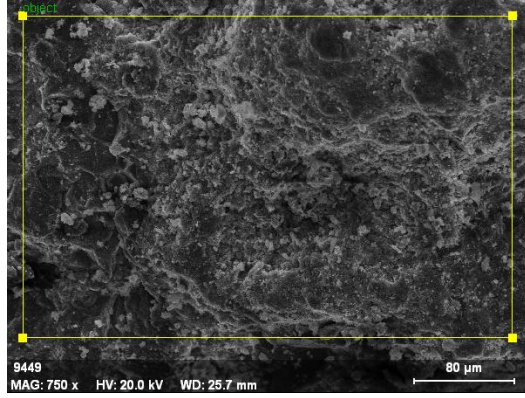
**Çizelge 4.12** 2U690 kodlu harç numunenin EDX verileri.

Element	Net	unn. C [ağırlıkça.- %]	norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Magnezyum	1331	0.87	0.85	0.72	Mg	1.31
Alüminyum	1441	0.74	0.73	0.55	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.13
Silis	27201	12.26	12.04	8.75	SiO <sub>2</sub>	39.71
Kalsiyum	49150	26.83	26.36	13.42	CaO	56.84
Oksijen	14026	61.09	60.02	76.56		44.81



**Resim 4.17** 2U1290 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü.

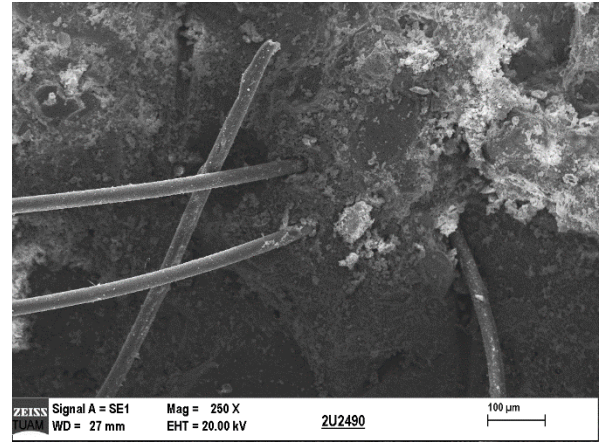
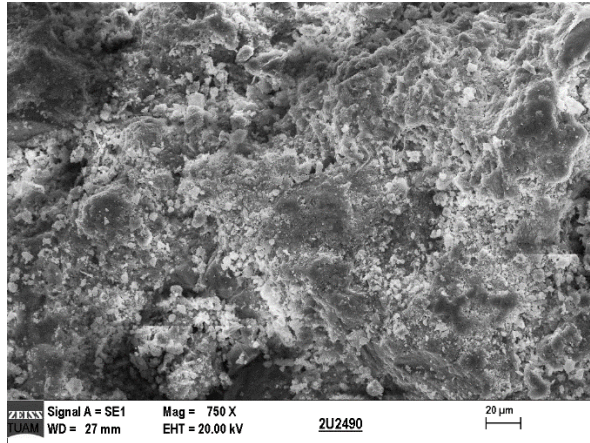




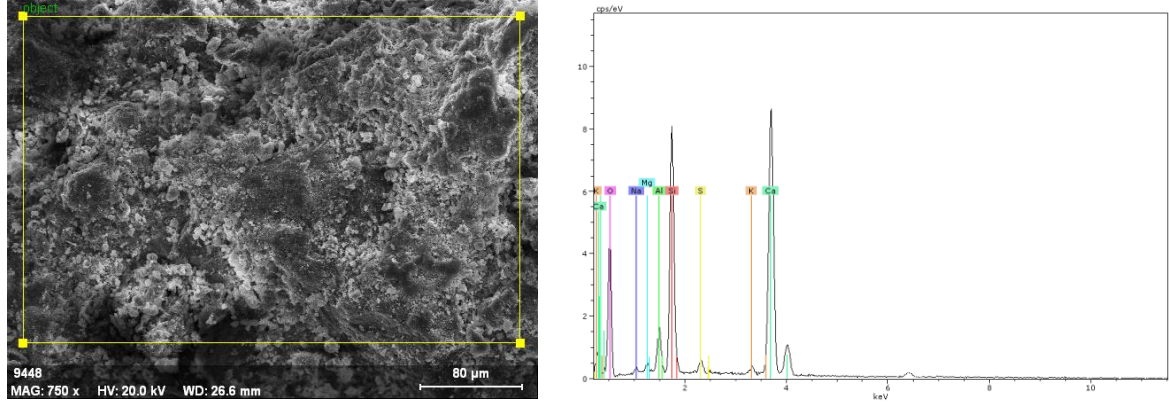
**Resim 4.18** 2U1290 kodlu harç numunenin SEM-EDX grafiği

**Çizelge 4.13** 2U1290 kodlu harç numunenin EDX verileri.

Element	Net	unn. C [ağırlıkça.- %]	norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Magnezyum	941	0.82	0.79	0.68	Mg	1.02
Alüminyum	4672	3.25	3.17	2.44	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.71
Silis	28842	18.33	17.85	13.19	SiO <sub>2</sub>	49.21
Sülfür	1175	0.76	0.74	0.48	SO <sub>3</sub>	2.38
Potasyum	1601	1.00	0.98	0.52	K <sub>2</sub> O	1.51
Kalsiyum	31981	21.74	21.18	10.97	CaO	38.17
Oksijen	11547	56.77	55.29	71.73		29.03



**Resim 4.19** 2U2490 kodlu harç numunesinin SEM görüntüsü (x250, x750 büyütme).



**Resim 4.20** 2U2490 kodlu harç numunenin SEM-EDX grafiği

**Çizelge 4.14** 2U2490 kodlu harç numunenin EDX verileri.

Element	Net	unn. C [ağırlıkça.- %]	norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.- %]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Sodyum	705	0.87	0.83	0.75	Na <sub>2</sub> O	1.46
Magnezyum	964	0.79	0.75	0.64	Mg	0.98
Alüminyum	4715	3.06	2.91	2.26	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.22
Silis	27168	15.95	15.17	11.29	SiO <sub>2</sub>	42.55
Sülfür	1573	0.91	0.87	0.56	SO <sub>3</sub>	2.84
Potasyum	998	0.56	0.54	0.29	K <sub>2</sub> O	0.85
Kalsiyum	40188	25.28	24.05	12.54	CaO	44.11
Oksijen	12583	57.70	54.89	71.67		30.96

#### 4.5. Harçların Gözeneklilik Değerleri

Gözenekli malzemelerin gözenek boyut dağılımının belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan tekniklerden biri tanesi Civa porozimetrisidir. Bu yöntemin çalışma prensibi, civanın yüzey ıslatmayan özelliğine bağlıdır. Civa; birçok sıvının aksine katı yüzeylerin büyük bir kısmı ile 90°'den büyük kontak açısı yapar. Civa bu özelliğinden dolayı belli büyüklüğün altındaki kılcallara (gözeneklere) kendiliğinden ulaşamaz. Bunun için basınçla emdirilme esasına dayanan bir yöntemdir (Şimşek 2008).

Betonların geçirimsizliği uzun zamandır araştırılan konulardan bir tanesidir. Belirlenebilmesi için numunelerin boşluk yapısının bulunması gerekmektedir. Kullanılacak ölçüm aletinin küçük boyutta olmasından dolayı içerisinde iri agrega bulunduran numunelerde doğru sonuçlara ulaşmak mümkün görünmemektedir. Bu

sebeple civalı porozimetre deneylerinin harçlar üzerinde yapılmasının daha doğru olacağı belirlenmiştir (Doğan 2008).

**Çizelge 4.15** Civalı porozimetre deney sonuçları.

<b>Seri</b>	<b>Ortalama Gözenek Çapı (µm)</b>	<b>Medyan Gözenek Çapı (Alan) (µm)</b>	<b>Görünür Yoğunluk (g/mL)</b>	<b>Gözeneklilik (%)</b>
RH90	0.0530	0.0270	2.4200	14.1759
R690	0.0760	0.0144	2.4599	15.2911
R1290	0.0698	0.0097	2.4539	16.8257
R2490	0.0434	0.0265	2.2152	9.9965
1U690	0.0559	0.0115	2.3930	17.3848
1U1290	0.0674	0.0080	2.4270	19.7083
1U2490	0.0520	0.0144	2.4628	15.6220
2U690	0.0458	0.0133	2.4525	17.5430
2U1290	0.0447	0.0101	2.4560	16.7040
2U2490	0.0580	0.0068	2.4318	15.7432

Hazırlanan harç örneklerinden elde edilen basınç dayanım değerlerine göre seçilen toplam 10 seri üzerinde civalı porozimetre deneyi yapılmıştır. Deney sonrasında elde edilen veriler Çizelge 4.15’de verilmiştir. Ortalama gözenek çapı değerleri dikkate alındığında harçların üretiminde kullanılan lif boylarının gözenek çapına lineer bir etki yapmadığı söylenebilmektedir. Medyan gözenek çapı verilerine göre ise harçlara ilave edilen liflerin medyan gözenek çaplarını azalttığı bununla birlikte % 20 UK ikameli harçlarda lif boyunun artmasıyla medyan gözenek çaplarının azaldığı belirlenmiştir.

#### **4.6 Durabilite İndeksi**

Durabilite özelliklerinin normal koşullarda en iyi sonuç vermesi gerçek koşullarda yapılmasına bağlıdır. Fakat bu yöntem durabilite açısından elde edilecek sonucun belli bir zaman almasına neden olmaktadır. Bu nedenle geliştirilen bazı yöntemler ile örneklerin durabilitesi önceden öngörülebilir. Bu yöntemlerden Robinson et al. ve Maage örnek gösterilebilir (Korothe 1997).

Robinson et al. ve Maage (Korothe 1997) yöntemine göre elde edilen durabilite indeksi değerleri Çizelge 4.16'da verilmiştir. Robinson et al. yöntemine göre elde edilen veriler incelendiğinde örneklerin tümünün yeterli donma direnci durabilitesine sahip olduğu düşünölmektedir. Bu noktada referans karışımlara eklenen lif boyunun artması ile durabilite özelliğinin azaldığı, UK oranlarının artması durumunda ise durabilitenin olumlu yönde geliştiği düşünölmektedir.

Maage yöntemine göre elde edilen veriler incelendiğinde ise 70 ve üzeri indekse sahip olan örneklerin durabile direnci olduğu, 55'nin altında olanların ise durabilite açısından dayanıksız olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle 24 mm'lik lif katkılı %100 çimentolu örneklerin belirsiz olduğu ve referans örneğin durumu ise dayanıksız olarak ifade edilebilir. Geri kalan tüm serilerin ise donmaya dayanıklı oldukları düşünölmektedir. Bununla birlikte bu yöntemden elde edilen verilerin 45 ve üzeri olmaları durumunda don yeterliliğinin olduğu da belirtilmektedir (Korothe 1997).

**Çizelge 4.16** Durabilite İndeksi değerleri.

<b>Seri</b>	<b>Robinson et al. yöntemi (Y)</b>	<b>Maage yöntemi (F<sub>c</sub>)</b>
RH90	-3.28	53.705
R690	-3.13	94.731
R1290	-2.52	109.777
R2490	-3.73	63.872
1U690	-3.15	90.62
1U1290	-1.95	110.489
1U2490	-3.41	89.69
2U690	-2.79	87.424
2U1290	-3.22	90.158
2U2490	-3.39	119.425

## 5. SONUÇLAR

Çimento esaslı harç örneklerine ikame edilen uçucu külün ve farklı boyutlarda karışıma ilave edilen mikro fiber lifin (28 ve 90 günlük) örnekler özelliklerinde meydana getirdiği değişimlerin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen bulgulara göre;

- Harçların hazırlanmasında üç farklı mikro fiber ilavesi (6, 12 ve 24 mm) yapılmıştır. Eklenen lif boyları dikkate alındığında 12 ve 24 mm'lik liflerde görünen porozite oranlarının benzer olduğu belirlenmiştir.
- UK ikame oranı ve lif katkısına bakılmaksızın harç örneklerinde su emme oranları % 4.6 - % 7.2 arasında değişkenlik göstermiştir. Genel olarak lif boyunun sonuçlar üzerinde değişken değerler verdiği bununla birlikte 28 günlük numunelerin 90 günlük numunelere oranla su emme oranlarının daha fazla olduğu, 90 günlük numunelerde ise su emme oranlarının %30 UK ikamesi ve üzerindeki oranlarda lineer olarak artış gösterdiği belirlenmiştir.
- Kür süresinin 28 günden 90 güne uzaması durumunda, örneklerin görünen porozitesinin C-S-H fazlarının artması nedeniyle azaldığı gözlenmiştir.
- 28 ve 90 günlük numunelerde UK ikamesi arttıkça örneklerin birim hacim ağırlıklarında azalmalar gözlenmiştir.
- 90 günlük harçlarda 6 ve 24 mm uzunluğundaki liflerin ilave edildiği örneklerde görünür yoğunluklar lineer olarak azalmıştır. 28 günlük harçlarda en yüksek görünür yoğunluk değerleri % 100 çimento (R serisi) ve 12 mm lif katkılı numunelerden elde edilirken; 90 günlük harçlarda ise maksimum görünür yoğunluklar % 100 çimento (R serisi) ve 24 mm lif katkılı numunelerden elde edilmiştir. Nitekim örneklerin yoğunluk değerleri arttığında malzemenin mekanik özelliklerinin ve doluluğunun arttığı, boşluk yapısının azaldığı ve buna bağlı olarak dayanımın arttığı belirlenmiştir.
- Referans harç, % 0 ,% 10 ve % 20 UK ikameli ve 6mm – 12mm -24mm lif katkılı 90 günlük numunelerin SEM-EDX incelemeleri yapılmıştır. Lif katkılı harç numunelere ait SEM resimlerinde görüldüğü üzere lifler harç hamuru ile aderans sağladığı ve bünyede herhangi bir topaklaşma yada çatlak oluşuman sebebiyet vermediği belirlenmiştir.

- 90 günlük referans harç örnekleri ile % 10 UK ikameli harç örneklerine ait SEM-EDX analizlerine göre malzeme bünyesinde bulunan uçucu kül; CaO oranlarının artışına, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının ise azalmasına sebep olmuştur. Bununla birlikte uçucu kül ikameli karışımlara eklenen liflerin boyutu arttıkça oksit miktarlarının da etkilendiği tespit edilmiştir.
- Harç numunelerden elde edilen basınç dayanım değerleri incelendiğinde uygulanan kür süresinin artması ile birlikte numunelerin dayanımlarında artış olduğu belirlenmiştir.
- Harç numunelerinin içerisine ikame edilen UK oranlarının % 30 ve üzeri olduğu numunelerde su emme kapasitesinin arttığı ve bunun sonucu olarak mekanik dayanımın azaldığı tespit edilmiştir.
- Civalı porozimetre deneyi yapılan örneklerde; Medyan gözenek çapı verilerine göre harçlara ilave edilen liflerin medyan gözenek çaplarını azalttığı bununla birlikte % 20 UK ikameli harçlarda lif boyunun artmasıyla medyan gözenek çaplarının azaldığı belirlenmiştir.
- Durabilite indeksi belirlenirken kullanılan Robinson et al. ve Maage yöntemine göre her iki yöntemle göre durabilite indeksinin maksimum olduğu numuneler 2U2490 kodlu numunelerdir.

Sonuç olarak, durabilite indeksi verileri dikkate alındığında bünyeye eklenen UK ikamesinin durabilite özelliklerini geliştirdiği bununla birlikte lif boylarının ise değişken sonuçlar vermekle birlikte durabilite açısından 12 mm'lik lif kullanımının daha uygun olduğu kanaatine varılmış olup genelde örneklerin tümünün yeterli donma direnci durabilitesine sahip olduğu düşünülmektedir. Bu noktada referans karışımlara eklenen lif boyunun artması ile durabilite özelliğinin azaldığı, UK oranlarının artması durumunda ise durabilitenin olumlu yönde geliştiği düşünülmektedir. Ayrıca 90 günlük numunelerde %0 - %20 aralığında kullanılan UK ikame oranlarının basınç dayanımlarını arttırdığı tespit edilmiştir. 28 günlük R1228 kodlu numuneler 46.4 MPa, 90 günlük 2U1290 kodlu numuneler ise 49.1 MPa ile en yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.

## 6. KAYNAKLAR

- Acun, S. (2000). Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Dizayn Parametresi Olarak Lifsel Katkıların İrelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Altun, F., Özcan, M., Vekli, M. ve Karahan, O. (2003). Çelik Lif Katkılı C20 Betonunun Mekanik Özelliklerinin Deneysel Araştırılması, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **4**: 31-40.
- Aran, A. (1990). Elyaf takviyeli karma malzemeler. İstanbul Teknik Üniversitesi. Yayını, İstanbul.
- ASTM A820, (1996). Standart Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete, the American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM C 618, (2000). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standard, No. 04.02
- ASTM C 67-00, (2000). Standard Test Method for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, American Society for Testing Materials, USA.
- Baradan, B. ve Aydın, S. (2013). Betonun Durabilitesi, Hazır beton kongresi.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H. (2010). Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul.
- Barbero, E.J. (1999). Introduction to Composit Materials Design. Edwards Brothers, Ann Arbor, USA.
- Barbosa, R., Lapa, N., Dias, D., and Mendes, B. (2013) Concretes containing biomass ashes: Mechanical, chemical, and ecotoxic performances, *Construction and Building Materials*. **48**: 457–463.
- Bayasi, Z. and Soroushian P. (1991). Fiber Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, **88**: 129-134.
- Benli, A., Karataş, M. ve Gurses, E. (2017). Effect of sea water and MgSO<sub>4</sub> solution on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with fly

- ash/silica fume, *Construction and Building Materials*. **146**: 464–474. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.04.108.
- Betterman, L.R., Quyang C. and Shah S.P. (1995). Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, *Advanced Cement Based Materials*. **2**: 53-61.
- Bicer, A. (2018) Effect of fly ash particle size on thermal and mechanical properties of fly ash-cement composites, *Thermal Science and Engineering Progress*. **8**: 78–82. doi:10.1016/J.TSEP.2018.07.014
- Bunsell, A.R. (1988). Fiber Reinforcement for Composite Materials, Vol:2 Composite Materials Series, Elsevier Science, The Netherlands.
- Chawla K.K. (1998). Fibrous Materials, Cambridge University Pres, Cambridge.
- Çavdar, A. (2014) Investigation of freeze–thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars, *Composites Part B: Engineering*. **58**: 463–472. doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2013.11.013.
- Çelik, Ö. (2004). Farklı İnceliklerdeki Tras ve Uçucu Külün Çimento Dayanımlarına Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **10**: 333-337.
- Demir, İ. ve Sevim, Ö. (2018). Physical and permeability properties of cementitious mortars having fly ash with optimized particle size distribution, *Cement and Concrete Composites*. doi:10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.11.017.
- Demir, M. Beton Bileşimi Optimizasyonu İçin Nitelik Denetim Maliyeti Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Doğan Ü. A. (2008). Beton Bileşim Parametrelerinin Geçirimsizlik Özellikleri ve Gömülü Çelik Donatı Korozyonuna Etkisi, İTÜ, Doktora Tezi.
- Donatello, S., Palomo, A. and Fernández-Jiménez, A. (2013) Durability of very high volume fly ash cement pastes and mortars in aggressive solutions, *Cement and Concrete Composites*. **38**: 12–20. doi:10.1016/J.CEMCONCOMP.2013.03.001.
- Ekincioğlu, Ö. (2003). Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı Bir Optimum Tasarım, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Ekincioğlu, Ö. (2002). Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışının incelenmesi. *Sika Teknik Bülten*, **3**: 10-11.



- Erdoğan, T.Y. (2010- Mart). Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık, Ankara
- Ersoy, H. Y. (2001). Kompozit malzeme, Literatür Yayınları: 66, İstanbul, Türkiye.
- Erşan, H. (1996). Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerine Etkisi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, 75 s. İstanbul.
- Gikunoo, E. (2004). Effect of Fly Ash Particles on the Mechanical Properties and Microstructure of Aluminium Casting Alloy A534, Master of Science, University of Saskatchewan, The College of Graduate Studies and Research, Saskatchewan, Canada.
- Gönen, B.C. (2012). Hazır Beton Üretiminde Kaliteyi Etkileyen Parametrelerin Spss Yöntemiyle İncelenmesi.Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S. ve Demir, İ. (2008). Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları. Afyon Kocatepe Üniversitesi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*. **2**: 85 -94
- Guler, S. (2018). The effect of polyamide fibers on the strength and toughness properties of structural lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*. **173**: 394–402. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.212.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H. (2005). Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları. Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı.
- Güner, A. (2011). Betonarme Betonunda Boşluklar ve Çeper Etkisi, İMO İstanbul Şubesi Eğitim Seminerleri, [http://www.imoistanbul.org.tr/2011-seminer-notlari/10\\_abdurrahman\\_guner.rar](http://www.imoistanbul.org.tr/2011-seminer-notlari/10_abdurrahman_guner.rar).
- Hamalı, Y. (2007). Metakaolin ve Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kallel, T., Kallel, A. and Samet, B. (2016). Durability of mortars made with sand washing waste, *Construction and Building Materials*. **122**: 728–735. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.06.086.
- Karlhans, W. (1990). Fly Ash in Concrete, ISBN: 0419157905, Spon Pres., 18-19.

- Kavas, T. ve Sabah, E. (2001). Sepiyolitin Lif Katkılı Çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 18-19 Ekim 2001, İzmir.
- Korothe, S.R. (1997). Evaluation and Improvement of Frost Durability of Clay Bricks, Concordia University, Canada.
- Kozak, M. (2013). Çelik Lifli Betonlar ve Kullanım Alanlarının Araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi, *Teknik Bilimler Dergisi*, **5**: 26-35.
- Kuyumcu, H.M. (2006). Eylül, Deniz Suyu Ve Sülfatlı Suların Beton Dayanımına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, <http://tr.scribd.com/doc/26727693/57/Sulfat-etkisi>.
- Li, V.C. and Maalej, M. (1996). Toughening in Cement Based Composites, Part II: Fiber Reinforced Cementitious Composites, *Cement and Concrete Composites*, **18**: 239-249.
- Li, V.C. (2003). On Engineered Cementitious Composites (ECC) - A Review of the Material and its Applications, *Advanced Concrete Technology*, **1**: 215–230.
- Mardani-Aghabaglou, A., İnan Sezer, G. and Ramyar, K. (2014). Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point, *Construction and Building Materials*. **70**: 17–25. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.07.089.
- Maria, S. (2010). Methods for porosity measurement in lime-based mortars, *Construction and Building Materials*. **22**: 2572–2578. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.05.019.
- Nadeem, A., Memon, S.A. and Lo, T.Y. (2013). Mechanical performance, durability, qualitative and quantitative analysis of microstructure of fly ash and Metakaolin mortar at elevated temperatures, *Construction and Building Materials*. **38**: 338-347. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.08.042.
- Nagaratnam, B.H., Faheem, A., Rahman, M.E., Mannan, M.A. and Leblouba, M. (2015). Mechanical and Durability Properties of Medium Strength Self-Compacting Concrete with High-Volume Fly Ash and Blended Aggregates, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. **59**: 155–164. doi:10.3311/PPci.7144.

- Odler, I. (2003). Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement, Leas Chemistry of Cement and Concrete, Fourth edition, Pg:241-297.
- Orban, Y.A., Manea, D.L., Aciu, C. and Mustea, A. (2018). Virtual manufacturing and mechanical properties of synthetic fiber-reinforced mortars, *Procedia Manufacturing*. **22**: 262–267. doi:10.1016/J.PROMFG.2018.03.040.
- Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V. and Chindapasirt, P. (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive, *Materials & Design*. **53**: 269–274. doi:10.1016/J.MATDES.2013.07.018.
- Poon, C.S., Kou, S.C. and Lam, L.L. (1999). An Innovative Method in Producing High Early Strength PFA Concrete, *Modern Concrete Materials; Binders, Additions and Admixtures*, 131-138, ISBN: 0727728229, Thomas Telford Pres.
- Saha, A.K. (2018). Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete, *Sustainable Environment Research*. **28**: 25–31. doi:10.1016/J.SERJ.2017.09.001.
- Sim, J., Park, C. and Moon, D. (2005). Characteristics of Basalt Fiber as a Strengthening Material for Concrete Structures. *Composites: Part B*, 36.
- Singh, R., Kumar, R., Ranjan, N., Penna, R. and Fraternali, F. (2018). On the recyclability of polyamide for sustainable composite structures in civil engineering, *Composite Structures*. **184**: 704–713.
- Şahmaran, M. and Li, V.C. (2009). Durability Properties of Micro-Cracked ECC Containing High Volumes Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, **39**: 1033-1043.
- Şengül, Ö., Taşdemir, C., Koruç, Ş. ve Sönmez, R. (2003). Agregatürünün Betonun Donma - Çözülme Dayanıklılığına Etkisi, III Ulusal Kırmataş Sempozyumu Bildirileri, S; 44-50.
- Şimşek, O. (2003), Yapı Malzemesi II, Beta Basım Yayım Dağıtım, İstanbul.
- Şimşek, V. (2008). Amberlit – 35 Katalizörünün Gözenek Yapısının Üç Boyutlu (3D) Rastgele Ağ Modeli Üzerinden Modellenmesi ve Ağ Boyutu Etkisinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

- Teixeira, E.R., Mateus, R., Camões, A. and Branco, F.G. (2019). Quality and durability properties and life-cycle assessment of high volume biomass fly ash mortar, *Construction and Building Materials*. **197**: 195–207. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.11.173.
- Topçu, İ. B. (2006). Beton Teknolojisi, Uğur Ofset A.Ş. Eskişehir.
- Toros, H. (1987). Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi olarak Kullanılması, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yük. Lisans Tezi, 117 s., İstanbul.
- TS EN 196-1, (2002). Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım (Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength). TSE, Ankara – Türkiye.
- TS 10513, (1992). Çelik teller-beton takviyesinde kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 771-1, (2005). Kagir Birimler, Özellikler- Bölüm 1: Kil kâgir birimler (Tuğlalar). TSE, Ankara.
- TS EN 772-4, (2000). Kagir Birimler, deney metotları – Bölüm 4: Tabii taskâgir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile bosluksuz ve bosluklu birim hacim kütlelerinin tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 772-11, (2011). Kagir Birimler-Deney Metotları-Bölüm 1: Agregası ve Doğal Taş Kullanılarak İmal Edilmiş Kagir Birimler-Kılcal Su Emmeye Bağlı Olarak Su Emme Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnas, F. ve Yeğınobalı, A. (2003). Türkiye’de Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TCMB, Ankara.
- Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması Ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı, 2003, Ankara.
- Uysal, F. (1987). Geotechnical Properties of The Fly- Ashes Produced in To Thermal Plants in Turkey, M.E.T.U. Inst. of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Ünal, O., Uygunoğlu, T. ve Gençel, O. (2007). Çelik Liflerin Beton Basınç ve Eğilme Özelliklerine Etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **13**: 23-30.

- Wang, S., Llamazos, E., Baxter, L. and Fonseca, F. (2008). Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests, *Fuel*, **87**: 359–364. doi:10.1016/J.FUEL.2007.05.027.
- Yang, E.H. and Li, V.C. (2008). Fiber-bridging Constitutive Law of Engineered Cementitious Composites, *Advanced Concrete Technology*, **6**: 181-193.
- Yardımcı, A. (2005). Santral çıkışı ile şantiye şartlarında C 20/25 ve C 25/30 hazır beton mukavemetinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 34-36.
- Yardımcı, M. (2007). Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik Mekanik Kırılma Parametrelerinin Araştırılması ve Optimum Tasarımı, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- Yazıcı, H. (2004). Termik Santral AtığıYapay Alçı – Uçucu Kül – Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yazıcı, H. Beton Teknolojisi, Çimento, Yapı Malzemesi II Dersi Sunuları, Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, <http://kisi.deu.edu.tr/halit.yazici/>.
- Yeğinobalı, A. (2003). Yeni bir çağın malzemesi, Çimento, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
- Yıldırım, K. ve Sümer, M. (2013). Effects of sodium chloride and magnesium sulfate concentration on the durability of cement mortar with and without fly ash, *Composites Part B: Engineering*, **52**: 56–61. doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2013.03.040.
- Yıldırım, S.T. (2002). Lif Takviyeli Betonların Performans Özelliklerinin Araştırması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü.
- Zhou, J., Qian, S., Beltran, M.G.S., Ye, G., Van Breugel, K. and Li, V.C. (2010). Development of Engineered Cementitious Composites with Limestone Powder and Blast Furnace Slag, *Materials and Structures*, **43**: 803-814.

## **İnternet Kaynakları**

- 1- [http://www.kordsa.com/media/downloads/urun\\_pdf/kratos-pdf.pdf](http://www.kordsa.com/media/downloads/urun_pdf/kratos-pdf.pdf), 23.03.2019
- 2- [https://howlingpixel.com/i-en/Clinker\\_\(cement\)](https://howlingpixel.com/i-en/Clinker_(cement)) 02.05.2019
- 3- <http://www.pimaks.com/urun-detay-baslik-50> 02.05.2019
- 4- <https://www.dostkimya.com/tr/haberler/cam-fiber-kirpilmis-alkali-dayanimli-02.05.2019>
- 5- <http://bauarchitecture.files.wordpress.com/2011/06/c3b6zel-betonlar.ppt>,23.03.2019

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Esmâ KAVASOĞLU  
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya, 15.04.1993  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon/e-posta) : 0 553 033 72 07, esmakavasoglu@gmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Mehmet Hanife Yapıcı Anadolu Lisesi, (2008-2012)  
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği  
Bölümü, (2012-2016)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, (2016-2019 )