



**T.C.  
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU İKAMELİ ÇİMENTO HARÇLARININ  
HİDRATASYON GELİŞİMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE  
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YUSUF İSLAM ŞAHİN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. YILMAZ KOÇAK**

**DÜZCE, 2022**

**T.C.**  
**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU İKAMELİ ÇİMENTO HARÇLARININ**  
**HİDRATASYON GELİŞİMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE**  
**ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Yusuf İslam ŞAHİN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU

Sakarya Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 30/05/2022

## BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

30 Mayıs 2022

Yusuf İslam ŞAHİN



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında bilgisini ve emeğini esirgemeyerek bana yakın ilgi ve yardımlarıyla yol gösteren, her zaman deneyimleri ile beni destekleyen ve yüksek lisans eğitimim boyunca bana büyük katkısı olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK'a gönülden teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma boyunca yapmış olduğum test çalışmalarında desteklerini esirgemeyen Fibrobeton Yönetim Kurulu Üyesi Sn. Muhammed MARAŐLI, Fibrobeton Ar-Ge ve Laboratuvar Merkezi sorumlusu Sn. Volkan ÖZDAL ve Ar-Ge Merkezi çalışanlarına, Bolu Çimento Fabrikası Genel Müdürü Sn. Yakup Kadri YENİCE, Kalite Kontrol ve EYS Yöneticisi Sn. Kübra DOĞAN ve Baş Laborant Sn. Zafer ÇAKAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma boyunca yapmış olduğum test çalışmalarında Dumlupınar Üniversitesi İLTEM ve Düzce Üniversitesi DÜBİT çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

**30 Mayıs 2022**

**Yusuf İslam ŞAHİN**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER .....	x
ÖZET .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR.....	4
2.1. ÇİMENTO.....	4
2.1.1. Çimentonun Tanımı.....	4
2.1.2. Çimentonun Tarihçesi .....	6
2.1.3. Çimentonun Ana Hammaddeleri.....	7
2.1.3.1. Kalker.....	8
2.1.3.2. Kil .....	8
2.1.3.3. Marn.....	9
2.1.3.4. Alçı Taşı .....	10
2.1.4. Çimento Hammadde Kompozisyonu.....	10
2.1.4.1. Silikat Modülü.....	10
2.1.4.2. Hidrolik Modülü.....	11
2.1.4.3. Alümin Modülü.....	12
2.1.4.4. Kireç Doymuluk Faktörü .....	12
2.1.5. Çimento Hidratasyonu.....	13
2.2. PUZOLANLAR .....	14
2.2.1. Puzolanların Tarihçesi.....	15
2.2.2. Puzolan Sınıflandırması.....	16
2.2.3. Puzolanların Aktivitesi .....	18
2.2.4. Puzolanik Malzemelerin Reaksiyonu Ve Reaksiyon Ürünleri.....	20
2.2.5. Yüksek Fırın Cürufu.....	20
2.3. ÇALIŞMADA UYGULANAN ANALİZLER .....	23
2.3.1. X-Işınları Kırınımı .....	23
2.3.2. Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi.....	24
2.3.3. Termal Analiz .....	26
2.3.4. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) .....	27
3. MALZEME VE YÖNTEM .....	29
3.1. MALZEME .....	29
3.2. YÖNTEM .....	29
3.2.1. Hammaddelerin ve Numunelerin Hazırlanması .....	29
3.2.2. Deneysel çalışmalar .....	31
3.2.2.1. Tane Boyut Analizi.....	31
3.2.2.2. Özgül Yüzey Alanı Analizi.....	31
3.2.2.3. Özgül Ağırlık Analizi.....	31
3.2.2.4. Kimyasal Analizler.....	31

3.2.2.5. Molekül Yapı Analizleri .....	31
3.2.2.6. Mineralojik Analizler .....	31
3.2.2.7. Mikro Yapı Analizleri.....	32
3.2.2.8. Termal Analizler .....	32
3.2.2.9. Standart Kıvam Analizi .....	32
3.2.2.10. Priz Süresi Analizi.....	32
3.2.2.11. Hacim Genleşme Analizi.....	33
3.2.2.12. Basınç Dayanımı Analizi.....	34
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>4.1. MALZEMELERE UYGULANAN ANALİZLER.....</b>	<b>35</b>
4.1.1. Fiziksel Analizler .....	35
4.1.2. Kimyasal Analizler .....	36
4.1.3. XRD Analizleri .....	37
4.1.4. Moleküler Analizler .....	38
4.1.5. Termal Analizler .....	39
<b>4.2. ÇİMENTO HAMURU ÖRNEKLERİNE UYGULANAN DENEYLER.....</b>	<b>40</b>
4.2.1. Su İhtiyacı Deneyi Sonuçları.....	40
4.2.2. Priz Süreleri Deneyi Sonuçları.....	41
4.2.3. Genleşme Deneyi Sonuçları.....	41
4.2.4. Hidratasyon Gelişimleri.....	42
4.2.4.1. XRD analizi ile hidratasyon gelişimleri.....	42
4.2.4.2. FT-IR analizi ile hidratasyon gelişimleri.....	44
4.2.4.3. DTA/TGA analizi ile hidratasyon gelişimleri.....	45
4.2.4.4. Çimento hamurlarının SEM analizleri.....	48
<b>4.3. YÜKSEK FIRIN ÇÜRUFUNUN BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ.....</b>	<b>53</b>
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>55</b>
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>57</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1: Puzolanların sınıflandırılması (Massazza'ya göre) .....	18
Şekil 2.2: Yüksek fırın cürufu üretim aşamaları.....	21
Şekil 2.3: Soğutma şekillerine göre yüksek fırın cürufu görüntüleri.....	22
Şekil 4.1: PÇ ve YFC'nin tane boyut dağılımları.....	35
Şekil 4.2: PÇ ve YFC'nin XRD analizleri.....	37
Şekil 4.3: PÇ ve YFC'nin FT-IR spektroskopisi.....	38
Şekil 4.4: PÇ ve YFC'nin DTA/TGA Analizleri.....	39
Şekil 4.5: Çimento hamurlarının su ihtiyaçları.....	40
Şekil 4.6: Çimento hamurlarının priz süreleri.....	41
Şekil 4.7: Çimento hamurlarının genişleme değerleri.....	42
Şekil 4.8: Çimento hamurlarının XRD analizleri.....	43
Şekil 4.9: Referans ve YFC ikameli çimento hamurlarının FT-IR spektrumları.....	44
Şekil 4.10: Çimento hamurlarının DTA/TGA analizi.....	46
Şekil 4.11: Çimento hamurlarının farklı sıcaklıklara ait ağırlık kayıpları.....	47
Şekil 4.12: Çimento hamurlarının CH içeriği.....	48
Şekil 4.13: Referans çimento hamurunun SEM görüntüsü.....	49
Şekil 4.14: 5YFC kodlu çimento hamurunun SEM görüntüsü.....	50
Şekil 4.15: 10YFC kodlu çimento hamurunun SEM görüntüsü.....	50
Şekil 4.16: 15YFC kodlu çimento hamurunun SEM görüntüsü.....	51
Şekil 4.17: 20YFC kodlu çimento hamurunun SEM görüntüsü.....	51
Şekil 4.18: Çimento harçlarının basınç dayanımları.....	53

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Çizelge 2.1: Çimento İçinde Bulunabilecek Bileşikler.....	5
Çizelge 2.2: Çimento Hammaddelerinin CaCO <sub>3</sub> ve Kil İçeriklerine Göre Sınıflandırılması.....	9
Çizelge 3.1: PÇ ve YFC Harç Numunelerinin Miktar ve Kodları.....	30
Çizelge 4.1: PÇ ve YFC'nin Fiziksel Özellikleri.....	36
Çizelge 4.2: PÇ ve YFC'nin Kimyasal Kompozisyonları.....	36



## KISALTMALAR

A	Alümin, $Al_2O_3$
AM	Alümin modülü
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Kireç, CaO
CH	Kalsiyum hidroksit (Portlandit)
CS	Kalsiyum silikat
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
$C_3S$	Trikalsiyum silikat
$C_2S$	Dikalsiyum silikat
$C_3A$	Trikalsiyum alüminat
$C_4AF$	Tetrakalsiyum alüminaferrit
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetri
DTA	Diferansiyel termal analiz
F	Demir oksit, $Fe_2O_3$
FT-IR	Fourier transformlı kızılötesi spektroskopi
HM	Hidrolik modül
LSF	Kireç doygunluk faktörü
R	Referans
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SM	Silikat modülü
STA	Simultane termal analiz
TGA	Termal gravimetrik analiz
XRD	X-Işını kırınım yöntemi
YFC	Yüksek fırın cürufu

## SİMGELER

cm	Santimetre
g	Gram
keV	Elektronvolt
mg	Miligram
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
Pa	Pascal
$\theta$	Thita
$\alpha$	Alfa
$\mu\text{m}$	Mikrometre
$^{\circ}\text{C}$	Celsius
$\bar{\nu}$	Dalga sayısı



## ÖZET

### YÜKSEK FIRIN CÜRUFU İKAMELİ ÇİMENTO HARÇLARININ HİDRATASYON GELİŞİMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Yusuf İslam ŞAHİN  
Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

Mayıs 2022, 62 sayfa

Çimento ve beton teknolojisinde doğal ve yapay puzolanik malzemeler yoğun olarak kullanılmaktadır. Yapay puzolanların çevre kirliliğini azaltması, enerji kaynaklarını koruması, dayanım ve dayanıklılığa katkı sağlaması ile son zamanlarda kullanımlarının arttığı bilinmektedir. Yapay puzolan sınıfında olan yüksek fırın cürufu ise çimento ve beton sektörüne önemli katkılar sağlamaktadır. Granüle yüksek fırın cürufu, öğütülerek çok ince taneli yapıya sahip olması sonucunda puzolanik özellik kazanmakta ve çimento ile beraber kullanıldığında betonun özelliklerini geliştirmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar ışığında yüksek fırın cürufu kullanımı ile birlikte beton priz süresinin uzadığı ve bu sebeple betonun işlenebilirliğinin arttığı, hidrasyon ısı, terleme ve su geçirimsizliği ve klorür geçirimsizliğini azalttığı bilinmektedir. Ayrıca yüksek fırın cürufu kullanımı ile beton geçirimsizliğinin azaldığı ve basınç dayanımının arttığı yapılan çalışmalar sonucu gözlenmiştir. Ülkemizde yüksek fırın cürufunun bir bütün olarak hidrasyon gelişimlerine yönelik yapılan çalışmaların az olması nedeniyle bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmada ilk aşamada, referans ve yüksek fırın cürufu ikameli (%0, %10, %15, %20 oranlarında) çimentoların su ihtiyacı, priz süreleri ve genişleme deneyleri ile 2, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. İkinci aşamada hidrasyon gelişimlerini daha detaylı inceleyebilmek amacı ile 28 gün sonunda SEM, DTA/TGA, XRD, FT-IR gibi analizler yapılmış ve sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmıştır. Elde edilen veriler sonucunda yüksek fırın cürufu ikame miktarı arttıkça; priz süresi ve su ihtiyacı artarken, genişleme açısından herhangi bir fark oluşmamıştır. 28 gün sonunda yapılan TGA ve XRD analizleri sonucu elde edilen verilere göre hidrasyon süresince oluşan kalsiyum hidroksit (CH) miktarı tüm yüksek fırın cürufu ikameli çimento hamurlarında azalmıştır. Ayrıca kimyasal olarak bağlı su içeriğinin %10 yüksek fırın cürufu ikameli çimento hamurunda, referans çimento hamurunda daha fazla olduğu, dolayısı ile daha fazla hidrasyon ürünleri oluşturarak daha yoğun bir mikro yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, bu puzolanik malzemelerin erken yaşlarda bile mukavemet açısından referans çimentoya çok yakın değerlere sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca 28. günde, yüksek fırın cürufu ikameli tüm çimento harçlarının basınç dayanımı değerlerinin, PÇ 42,5 R tipi çimentonun minimum basınç dayanım değerinin üzerinde olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Çimento, DTA/TGA, FT-IR, Hidrasyon, SEM, XRD, Yüksek fırın cürufu

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HYDRATATION DEVELOPMENT OF BLAST FURNACE SLAG SUBSTITUTING CEMENT MORTARS ON MECHANICAL PROPERTIES

Yusuf Islam SAHIN

Düzce University

Graduate School of Education, Department of Civil Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

May 2022, 62 pages

In cement and concrete technology, natural and artificial pozzolanic materials are intensively used. It is known that usage of artificial pozzolana have recently increased their use due to the fact that they reduce environmental pollution, protect energy sources, contribute to strength and durability. The blast furnace slag, which is in the artificial pozzolana class makes significant contributions to the cement and concrete sector. Blast furnace slag acquires a puzolanic property and improves the qualities of concrete when combined with cement as a result of grinding and having a very fine-grained structure. In the light of the experimental studies conducted; it is known that with the use of YFC, the setting time increase and therefore the workability of concrete increase, the heat of hydration, sweating and water permeability and chloride permeability decrease. Furthermore, it has been observed as a result of the studies conducted that the permeability of concrete decreases and the compressive strength increases with the use of blast furnace slag. This study has been carried out due to the fact that there are few studies on the hydration developments of blast furnace slag as a whole in our country. For this purpose, in the first stage of the study, water demands, setting times and volume expansion tests of reference and blast furnace slag-substituted (%0, %10, %15, %20 rates) cements with 2, 7, 28 and 90-day compressive strength tests were carried out. In order to examine the hydration developments in the second stage in more detail, analyses such as SEM, DTA/TGA, XRD, FT-IR were performed at the end of 28-day and the results were compared with each other. As a result of the data obtained, as the amount of blast furnace slag substitution increased, the setting time and the water demand increased, there was no difference in terms of expansion. The quantity of calcium hydroxide (CH) formed during hydration reduced in all BFS - substituted cement pastes, according to data obtained from TGA and XRD analyses done at the end of 28-day. In addition, it has been determined that the chemically bound water content is greater in 10% BFS-substituted cement paste than in the reference cement paste, so it has a denser microstructure by creating more hydration products. The results show that these pozzolanic materials have values very close to the reference cement in terms of strength even at an early age. In addition, at the 28-day, it was determined that the compressive strength values of all cement mortars with blast furnace slag substituted were reached above the minimum compressive strength value of PC 42.5 R type cement.

**Keywords:** Blast furnace slag, Cement, DTA/TGA, FT-IR, Hydration, SEM, XRD

# 1. GİRİŞ

Beton, inşaat alanında kullanılan yapı malzemelerinin başında gelmektedir. Gerek üniversitelerde gerekse özel sektörlerde betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmek amacı ile artarak sürekli yeni çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmalarda doğal veya yapay mineral katkıları çok fazla kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, tras, zeolit, pomza ve metakaolin gibi mineral katkıları verilebilir [1-7].

Puzolanik malzemeler beton ve çimento sektöründe kullanılmaktadır ve bu malzemelerin reaktif silis değerlerine göre puzolanik aktiviteleri değişkenlik göstermektedir. Puzolanik aktivite, alümina silikatlar ile kalsiyum hidroksitlerin etkileşimi sonucunda ortaya çıkan reaksiyon hızı ve reaksiyon kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Kısa ve uzun dönemde puzolanik aktivite belirli faktörlere bağlıdır. Kısa dönemde yüzey alanları, uzun dönemde ise puzolanın sahip olduğu kimyasal ve mineralojik yapı ve bileşimi önem kazanmaktadır. Puzolanik özelliğe sahip minerallerin istenilen düzeyde puzolanik aktivite ortaya koyabilmesi için belirli özelliklere ihtiyacı vardır. Bu özellikler, düzensiz yapıda olması, yeterli miktarda " $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ " bulundurması ve ince taneli yapıda olmasıdır [8].

Puzolanlar betonun temel bileşenlerinden olmasalar da, bu malzemeler Portland çimento ile mineralojik yapıları, kimyasal bileşimleri ve fiziksel özellikleri bakımından benzer özelliklere sahiptirler. Fakat tek başına kullanıldıkları zaman bağlayıcılık özelliği gösteremezler. Bu nedenden dolayı puzolanlara ikincil bağlayıcı malzeme denilmektedir. Dolgu malzemesi fonksiyonu açısından puzolanlar etkilidirler. Puzolanik davranışları nedeni ile de hidrasyon sırasında etkinlik göstererek, bağlayıcı hamuru yapısında değişiklikler meydana gelmektedir. Bu nedenle puzolanların kullanımı ile beton özellikleri gelişerek daha fazla yoğun bağlayıcı özellikte hamur oluşmaktadır. Puzolanın ikame ya da katkı malzemesi olarak kullanılması ile ekonomik olarak katkı sağlanmaktadır. Dayanımı yüksek betonlar elde edilirken, puzolanik özellikleri yüksek mineral katkıları kullanılabilir [9].

Çimentonun sahip olduğu özellikler, betonun kalitesini doğrudan ya da dolaylı bir biçimde etkilemektedir. Çimento yapısında katı ya da çözelti olarak serbest halde katkıları bulunmaktadır. Çimento hamuru veya çimento bileşenleri ile birleşebilen bu katkıları ayrıca yüzey ile de etkileşime girebilirler. Betonda kullanılan katkı ya da ikame malzemesinin etkileşimi, tip ve boyutuna bağlı olarak betonun hidrasyon ısı, su ihtiyacı, hidrasyon ürünlerinin kompozisyonu, priz süresi, durabilite ve mikro yapı gibi özelliklerini etkilemektedir [9].

Yüksek fırın cürufu (YFC), atık olarak ortaya çıkan mineral katkıları içerisinde çimento ve beton sektöründe çok fazla kullanılmakta ve önemli katkıları sağlamaktadır. Metalurji tesislerinde bulunan fırınlarda demir filizi gangi, kok ve kireç gibi maddelerin 1450-1550 °C sıcaklıkları arasında demir üretimi sırasında ergimiş durumda atık madde olarak meydana gelen ve yapay puzolan olarak sınıflandırılan malzemeye yüksek fırın cürufu denilmektedir [10-12].

YFC, kimyasal bileşim olarak CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiO<sub>2</sub>'den oluşmaktadır. Yüksek fırın cürufunun minerolojik yapısı kimyasal bileşimi kadar önemli bir faktördür. Yüksek sıcaklıktaki fırından çıkan cüruflar eğer yavaş bir şekilde soğutulursa kristal yapıya sahip olurlar ve bu tip cüruflar beton agregası olarak kullanılabilir. Hızlı bir biçimde soğutma uygulandığında ise amorf yapıda ve katı eriyik halde elde edilen cüruflar ise yarı-kararlı amorf yapıya sahip malzeme olarak elde edilmektedir. Bu malzeme ince öğütülerek veya kalsiyum hidroksit ya da sodyum hidroksit aktivatörlerinin kullanılması ile Portland çimentosu hidrasyonu sonucunda elde edilen portlanditle (CH) reaksiyonu sonrasında ikincil C-S-H'ları meydana getirmektedir [12].

İnşaat sektöründe yüksek fırın cürufu, genellikle çimento ve beton içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda beton içerisinde yüksek fırın cürufu kullanımı ile birlikte betonun erken yaş dönemi dayanımında azalmalar meydana gelirken, ileri yaş dönemlerinde dayanımda artış sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca YFC kullanımı ile birlikte priz süresinin uzadığı ve bu nedenle betonun işlenebilirliğinin arttığı, hidrasyon ısı, terleme, su geçirimsizliği ve klorür geçirimsizliğinin azaldığı bildirilmiştir. Yüksek alkali silika direncini ve donatı korozyonu direncini de arttıran YFC, betonun durabilitesine olumlu yönde katkı sağladığı deneysel çalışmalar ile belirlenmiştir [12-18].

Yüksek fırın cürufunun Türkiye’de endüstriyel atık olarak çimento içerisinde ikame malzeme olarak kullanılması, hem atık değerlendirme açısından katkıda bulunacak hem de klinker üretiminin azalması sonucu ekonomik ve ekolojik faydalar sağlayacaktır. Yapılan bu deneysel çalışmada, YFC ikameli çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri standart çimento deneyleri kullanılarak belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Ayrıca yüksek fırın cürufu ikameli çimentoların hidrasyon gelişimlerinin daha net açıklanabilmesi açısından YFC ikameli çimento hamurlarına DTA-TGA, FT-IR, XRD ve SEM gibi modern analiz teknikleri uygulanmış ve ilgili bölümlerde ayrıntılı olarak tartışılmıştır.



## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1. ÇİMENTO

Bu bölüm içerisinde çimento başlığı altında çimentonun tarihçesi, tanımı, özellikleri, üretimi ve hidrasyonu hakkında bilgiler bulunmaktadır.

#### 2.1.1. Çimentonun Tanımı

Çimento üretiminde öncelikle klinker elde edilmektedir. Döner fırında sinterleşme sıcaklığına varıncaya dek kalsiyum, alüminyum, demir oksit ve silisyum bileşenlerini ihtiva eden hammaddelerin karıştırılması ve pişirilmesi sonucunda klinker oluşmaktadır. Çimento ise klinkerin alçı taşı ya da benzer katkı maddesi ile beraber öğütülmesi sonrasında meydana gelen hidrolik bağlayıcıdır [19].

Yontulmuş taş anlamına sahip Latince “Caementum” sözcüğünden, günümüzde kullanılan çimento sözcüğü türetilmiştir. İnşaat sektöründe yapı malzemeleri grubunda bulunan çimento yaygın olarak kullanılmaktadır. Hammadde bileşimi ve klinkerin ısısal işlemleri çimentonun istenilen özellikleri kazanması için önemli olan faktörlerdir. Hammadde karışımının kompozisyonuna klinker bileşimi sıkı sıkıya bağlıdır. Klinkerin bileşimini, kullanılan yakıt cinsi ve yakıt içerisinde kül meydana getiren maddeler etkilemektedir [20].

Kireç taşı ve kil çimentonun temel ham maddeleridir. Çimento üretimi yapabilmek için büyük tesisler gerekmektedir. Silis, çimento üretimi sırasında alümin ve demir oksitle birleşebilmektedir. Çimento üretilirken bu ham maddeleri belirli oranda karıştırmak ve yüksek sıcaklıklarda (1350-1500 °C) pişirmek hedeflenir. SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kilden meydana gelirken, CaO kireç taşından meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklıklarda birleşen bu maddeler, çimentonun bağlayıcılık özellik kazanmasını sağlayan silikat ve alüminatları oluşturmaktadır. Klinkere çimento üretimi sırasında %3-6 oranında alçı taşı (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) eklenmekte ve alçı taşı ile klinker birlikte öğütülmektedir. Katkı maddesi olarak klinker öğütme işlemi sırasında %5'e kadar kireç taşı ya da bir başka minör ilave katkı maddesi de eklenebilmektedir. Klinkere kıyasla kireç taşının öğütülmesi daha kolaydır. İyi öğütülebilen ve klinkere kıyasla daha ince taneli yapıya sahip olabilen

kireç taşı, bu sayede boşlukları doldurmakta ve bu sayede mukavemetin ve işlenebilirliğin artmasına katkı sağlamaktadır [20].

TS EN 197-1'e göre üretilen çimentolara CEM çimentosu adı verilmektedir. Çimentolar; CEM I Portland, CEM II Portland Kompoze, CEM III Yüksek Fırın Cürufu, CEM IV Puzolanlı ve CEM V Kompoze Çimento olarak 5 ana sınıfa ayrılmıştır. Çimento içinde bulunabilecek bileşikler ve sınır değerleri Çizelge 2.1'de görülmektedir [21].

Çizelge 2.1: Çimento İçinde Bulunabilecek Bileşikler.

Malzeme	Kısaltma	Sınırlamalar
PÇ klinkeri	K	$C_3S+C_2S \geq \%66,7$ $CaO/SiO_2 \geq \%2,0$ $MgO < \%5$
Granüle yüksek fırın cürufu	S	Camsı faz miktarı $\geq \%66,7$ $CaO+SiO_2+MgO \geq \%66,7$ $(CaO+MgO)/SiO_2 > \%66,7$
Doğal puzolan	P	Reaktif $SiO_2 \geq \%25$
Silisli uçucu kül	V	$KK \leq \%5$ Reaktif $CaO \leq \%5$ Reaktif $SiO_2 \geq \%25$
Kireçli uçucu kül	W	$\%5 \leq$ Reaktif $CaO \leq \%15$ Reaktif $SiO_2 \geq \%25$ $KK \leq \%5$ Hacim genişlemesi $< 10$ mm Reaktif $CaO \leq \%15$ $G \geq 10 N/mm^2$ $KK \leq \%5$ Hacim genişlemesi $< 10$ mm
Pişirilmiş şeyl	T	$G_{28} \geq 25 N/mm^2$ Hacim genişlemesi $< 10$ mm
Kalker	L	$CaCO_3 \geq \%75$ Kil miktarı $\leq 1,2 g/100g$ Organik madde miktarı $\leq \%0,2$
Silis dumanı	D	$\%5 \leq$ Reaktif $CaO \leq \%15$ Amorf $SiO_2 \geq \%85$ $KK \leq \%4$ Özgül yüzey (BET) $\geq 15 m^2/g$

Kızdırma kaybı ve çözünmeyen kalıntı, çimentoya yapılan kimyasal analizlerde çok sık bahsedilen ifadelerdir. Ağırlığı  $(1\pm 0,05 g)$  olarak belirlenen çimento numunesi  $950\pm 25$  °C sıcaklık ile kızdırılması sonucu meydana gelen ve ağırlıkça % olarak belirtilen kayıp, kızdırma kaybı olarak adlandırılmaktadır. Çimento ya da agrega için standartlarda

belirtilen hidroklorik asit konsantrasyonu sonucunda çözünmeyen kısmın oranı ise çözünmeyen kalıntı olarak ifade edilmektedir [22].

### 2.1.2. Çimentonun Tarihçesi

İnsanoğlu medeniyetin başlangıcından itibaren kullanmış olduğu taş ve tuğla gibi malzemelerin birlikte durabilmelerini sağlamak amacı ile malzeme arayışında olmuşlardır. Eski çağlara baktığımızda, bu tarz bir malzemenin yapılar için çeşitlilik ve esneklik getireceği söylenebilirdi. Çamur en eski bağlayıcılardan biridir. Günümüzde hala dünyada farklı yerlerde saman ya da başka bitki lifleri kullanılarak elde edilmiş malzemelerle inşa edilen yapılar bulunmaktadır. Piramitlerin yapımına bakıldığında eski Mısırlıların çimento benzeri ürünlerin kullandığı bilinmektedir. Harç yapımı sırasında volkanik tüf ile kireci karıştıran Eski Yunanlılar ve Romalılar'ın eserleri günümüzde hala ayakta durmaktadır. Su kemeri inşaatlarının duvarlarında, köprü kemerlerinde, set duvarlarında ve Romalılar dönemi boyunca bütün beton inşaatlarda kullanılmıştır. Bu su kemeri ve deniz yapılarının günümüzde hala ayakta durması, kireç ile puzolan kullanılarak yapılan harçların dayanıklılığının bir işaretidir [23].

1976 yılında yakma sonucunda toz haline gelen killi kireç taşı yumruları ile hidrolik çimento elde eden James Parker, bu çimentoyu Roma Çimentosu olarak isimlendirmiştir. 19. Yüzyıl başlarında Fransa'da kireç taşı ve kil kullanılarak elde edilen yapay karışımı yakma denemeleri, Vicat tarafından başarı ile gerçekleştirilmiştir. Fakat çimento üretimi için gerçekleşecek önemli olaylar Fransa'da değildir [23]. Bağlayıcı maddelerin doğası 18. yüzyıla gelindiğinde anlaşılmaya başlanmıştır. Bir Leeds müteahhidi olan Joseph Aspdin'in öncü çabalarından sonra 1824 yılında Portland çimentosunun patentini almayı başarmıştır. Daha sonra tüm Avrupa ve Kuzey Amerika'da hidrolik bağlayıcıların kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu nedenle Portland çimento üretiminde kullanılan ekipmanlarda gelişmeler yaşanmıştır [24].

Bağlayıcı üreten Aspdin, üretim esnasında gerekli yüksek sıcaklıklarda pişirme işlemi yapamadığından, ürettiği bağlayıcı günümüzde kullanılmakta olan Portland çimentosunun özelliklerine tamamen sahip olamamıştır. Çimento elde edilirken yüksek sıcaklıklarda kil ve kalker karışımı hammaddelerin pişirilip öğütülmesi işlemi, ilk olarak bir İngiliz olan Isaac Johnson tarafından 1845 yılında gerçekleştirilmiştir [25].

1877 yılında İngiltere'de döner fırın ile ilgili gelişmeler başlamıştır. 1855 yılında Fredrick Ransome ilk döner fırın patentini alan kişi olarak anılmıştır. O yıllarda

Ransome'nin ürettiği fırın, çimento dünyası açısından devrim niteliğinde gözükse de daha kullanışlı döner fırın ancak uzun yıllar sonra üretime girmeyi başarmıştır. Bazı öncü Amerikan mühendisleri Ransome'nin döner fırın keşfinden birkaç sene sonra döner fırını çocukluk çağından çıkartmışlardır. 1895 yılında Hury ve Seaman Atlas Çimento Fabrikası tarafından Amerika'daki ilk ekonomik döner fırın üretilmeye başlanmıştır [24].

Günümüzde yaygın biçimde en fazla Portland çimentosu kullanılmasına rağmen katkılı olarak farklı çimento türleri ile ilgili pek çok AR-GE çalışması yapılmaktadır. Çalışmalar yapılırken ana amaç sadece kaliteli çimento üretmek ile sınırlandırılmamaktadır. Çimento üretimindeki ekonomik katkı ve doğal çevreye etkileriyle ilgili konularda da araştırmalar yoğun olarak devam etmektedir [25].

### **2.1.3. Çimentonun Ana Hammaddeleri**

Çimento üretimi sırasında kullanılan ve jeolojide sedimanter kayalar olarak adlandırılan ana ham maddeler kireç taşı, kil veya marndır. Kalker CaO için, kil mineralleri ise SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için temel kaynakları klinker üretimi amacı ile oluşturmaktadır. Eğer yapılan analizler sonucunda Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı düşük çıkarsa uygun oranlarda demir cevheri ilavesi yapılmaktadır. Çimento hammaddesi olarak dört oksidi bünyesinde bulundurabilen Marn gibi malzemeler de kullanılmaktadır [26, 27].

Tek bir hammadde içerisinde bu bileşenlerin istenilen oranlarda bulunması nadir görülür. Böylelikle yüksek kireç oranı içeren bileşen (kalker) ile silis, alüminyum ve demir oksit miktarı fazla olan bir bileşenin (kil) gerekli oranlarda karıştırılması gerekir. Kalker ile kil karışımı ya da kalker ile marn karışımı bahsedilen özelliklere sahiptirler [28].

Çimento üretimi için kullanılması gereken hammaddelerin kimyasal bileşimleri ile uygunluk dereceleri orantılıdır. Hammadde karışımı sırasında kullanılan CaCO<sub>3</sub> içeriğinin %75-79 aralığında olmasına ve mümkün olduğu kadar bu oranın sabit olması için çalışılmaktadır. Bu oranın sabit tutulmasındaki amaç CaCO<sub>3</sub> içeriğinde meydana gelen ufak bir değişim, klinkere ait dikalsiyum silikat ve trikalsiyum silikat oranlarının değişmesine neden olduğundan çimento mukavemetinde ciddi anlamda sapmalara yol açmaktadır [28].

### 2.1.3.1. Kalker

Kalker, kimyasal, mekanik veya organik çökelmeler sonucunda deniz veya tatlı sularda oluşmaktadır. Ayrıca yeraltı sularında da travertenlere benzeyen biçimde kalker yatakları oluşmaktadır. Kalkerin, oluşum süreçlerinden de anlaşılacağı üzere 3 ana gruba ayrıldığı görülmektedir. Yaygın biçimde meydana gelen kireçtaşları çoğunlukla kimyasal, organik ve kırıntılı materyallere sahiptirler.

Kalker (kireç taşı), kimyasal bileşimi analiz edildiğinde en az %90 oranında  $\text{CaCO}_3$  (kalsiyum karbonat) barındıran kayalara denilmektedir. Doğa şartlarında saf halde oluşan kalker tipine kalsit denilmektedir. Doğa şartlarında kalsit ve aragonit kristallerinden meydana gelen kayaç olarak bulunabilen kalker, dolomit  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  şeklinde de bulunabilir. Özgül ağırlığı 2,5 – 2,7 aralığında olan kalkerin sertlik derecesi ise 3'tür [26, 29].

### 2.1.3.2. Kil

Çimento üretimi için gerekli olan en önemli temel hammaddelerden biri kildir. Minerolojik bileşimleri açısından %90 oranında kil minerallerine sahip kayaç da kil olarak isimlendirilebilir. Endüstriyel ortamda tam anlamıyla saptanarak kullanılmamış olmasına rağmen hammadde olarak kullanım alanı fazladır. Kimyasal bileşiminde alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) bulundurması ve sulu alüminyum silikatlardan oluşması, kil minerallerinin temel özelliğidir [27].

Bünyesinde alkali bulunduran alüminyum silikat hidratlar, kili oluşturan ana maddelerdir. Kilin içeriğinde kuvars, feldspat, turmalin ve mika gibi maddeler bulunabilir. Kilin rengini kazandıran maddeler, içeriğinde bulunmaktadır. Demir oksit miktarı fazla olan killer daha kırmızı olmaktadır. Sarı killerde alüminyum oksit bulunurken, mavimsi ve sarımsı killerde ise organik maddeler bulunmaktadır. Kaolen grubu, montmorillonit grubu ve alkali ihtiva eden grup olmak üzere kil mineralleri 3 gruba ayrılmaktadır [30, 31].

Killerin genel özellikleri;

- Suyla temas ettikleri zaman plastik özelliği kazanmaları ve istenilen şekli alabilmeleri,
- Su kaybettiklerinde rijit hale geçtikleri, fakat su ile tekrar temas halinde olduklarında tekrar plastiklik özelliği kazanmaları,

- Pişirilme işlemiyle rijit bir bünyeye sahip olmaları, tekrar su ile temas halinde artık plastik özelliklerini kaybetmeleri şeklinde sıralanabilir [32].

Kilin çimento hammaddesi olarak kullanılmadan önce kimyasal ve mineralojik yapı özelliklerinin incelenmesi gerekmektedir. Kızdırma kaybı, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub> yüzdelere, kimyasal analizler sonucu ulaşılabilmektedir. Kil minerallerinden bağımsız var olan safsızlıkları oluşturan unsurlar ve % oranları ise mineralojik analizler sonucunda elde edilebilmektedir [33].

### 2.1.3.3. Marn

Doğa şartlarında bulunabilen marn kayaçları, %50-70 oranında kalker ve %30-50 oranında kil karışımı ile meydana gelmektedir. Doğa şartlarında çok fazla yaygın olarak bulunabilen marn, bu özelliğinden dolayı çimento hammaddesi olarak sıklıkla kullanılabilir. Ortalama %70 oranında kalker ve %30 oranında kil bulunan malzemenin iyi öğütülmesi ve sonrasında yüksek sıcaklıkta pişirilmesi sonucunda çimento klinkeri oluşturulabilir. Marn kendi doğal yapısı itibarı ile istenen bileşime yakın özellikte olduğundan çimento hammaddesi için idealdir. Marn, kalker ile kıyaslandığında daha yumuşak özelliğe sahip olduğu için kırma-öğütme adımları sırasında kullanılan enerji daha düşük olmaktadır [26, 29].

Çimento hammaddelerinin CaCO<sub>3</sub> ve kil içeriklerine göre sınıflandırması Çizelge 2.2’de verilmektedir.

Çizelge 2.2: Çimento Hammaddelerinin CaCO<sub>3</sub> ve Kil İçeriklerine Göre Sınıflandırılması.

Hammadde	CaCO <sub>3</sub> (%)	Kil (%)
Kalker	96-100	0-4
Marnlı kalker	90-96	4-10
Kalkerli marn	75-90	10-25
Marn	40-75	25-60
Killi marn	10-40	60-90
Marnlı kil	4-10	90-96
Kil	0-4	90-100

#### 2.1.3.4. Alçı Taşı

Deniz suyunun çorak ve kuru iklim şartlarına maruz kaldığı ve buharlaşması sonucu tortul kayaç olarak ortaya çıkan taşlara alçı taşı denilmektedir. Alçı taşı doğada iki tipte bulunabilmektedir. Birincisi içerisinde iki molekül kristal suya sahip formdaki jips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), diğeri ise su içermeyen kalsiyum sülfat anhidrit minerali şeklindedir. Jips ve anhidrit doğa şartlarında asla saf halde bulunmazlar. Kararsız yapıya sahip olan bu iki mineral bir birine dönüşebilmektedir. Çimento üretimi sırasında kullanılan alçı taşı harca katılarak priz süresini uzatmaktadır [27, 33].

#### 2.1.4. Çimento Hammadde Kompozisyonu

Portland çimento üretebilmek için gerekli hammadde bileşenlerinin içinde başlıca  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  bulunmaktadır. Çimento üretimi için uygun hammadde karışımı elde etmek amacı ile genel olarak kalker ve kil karıştırılır ve bu karışıma az miktarda düzeltici malzeme eklenir. Hazırlanan ve fırına verilmek üzere olan bu hammadde karışımlarına farin adı verilmektedir. Çimento üretim aşamasında bileşik sayısının az olması tercih edilmektedir. Bunun nedeni hem üretici açısından hem de verimlilik açısından önemlidir. Fakat çimento hammaddesi için uygun kompozisyona sahip tek başına bir bileşiğin varlığı doğada pek olası değildir. Böylelikle marn-kalker, kalker-kil ya da marn-kalker-kil karışımları ile uygun bileşimler ortaya çıkmaktadır [35].

Çimento hammadde kompozisyonunun araştırılmasındaki neden, döner fırından çıkan klinkerin istenilen kimyasal ve mineralojik kompozisyonda oluşturmaktır. Kil ve kalker karışım oranlarının çimento üretimi için istenilen oranlarda belirlenebilmesi için bir takım kimyasal modüller kullanılmaktadır. Üretilmiş olan Portland çimentosunun fiziksel özelliklerini ve mukavemet değerlerini, hazırlanan farinin sahip olduğu kimyasal bileşimin özellikleri önemli derecede etkilemektedir. Bu yüzden farini oluşturan bileşenlerin uygun oranlarda olması gerekmektedir. Alümin modülü, hidrolik modül, silikat modülü ile başta kireç doygunluk faktörü ve klinker bileşimindeki ana bileşenlerin arasındaki oranlar kontrol edilmektedir [33]. Bu modüllerin tanımları, formülleri ve etkileri başlıklar halinde açıklanmaktadır.

##### 2.1.4.1. Silikat Modülü

Fırın içinde bulunan katı fazın sıvı faza oranı Silikat Modülü (SM) olarak isimlendirilmektedir.

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2.1)$$

Silikat modülü için belirli bir oran söylemek kolay değildir. Karışımın sahip olduğu silis yüzdesinin, demir oksit ile alüminyum oksit toplamına oranı sonucunda silikat modülü tanımlanabilmektedir. Kullanılan hammadde özelliklerine bağlı olarak silikat modülü genelde 1,2-4 aralığında bir değere sahip olabilir. Genel sayılmasa da 2-2,5 arasındaki değerler silikat modülü için tercih edilmektedir.

En önemli hususlardan biri de silikat modülünün, klinkerin kalitesine ve farinin fırın içinde bulunduğu duruma yaptığı etki olarak ifade edilmektedir. Yüksek değere sahip silikat modülü, döner fırında yanma işlemlerini daha zor yapabilir ve kullanılacak yakıt miktarını arttırabilir. Ayrıca sinterleşmenin de daha zor gerçekleşmesine ve daha yüksek sıcaklıklarda pişirilmesine sebep olabilir. Böylelikle ortaya çıkan çimento, daha yavaş priz almakta ve dayanımını daha geç kazanmaktadır [33, 35].

#### 2.1.4.2. Hidrolik Modülü

Hidrolik modül, PÇ bileşiminde olan bazik karaktere sahip kireç yüzdesi ile silisyum dioksit, alüminyum oksit, demir oksit ve diğer asit karakterli oksitlerin yüzdeleri arasında bulunan bağıntıya denmektedir. Hidrolik modül aşağıda bulunan formül ile ifade edilir;

$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2.2)$$

Hidrolik modül değeri genel olarak 1,7-2,3 aralığındadır. Hidrolik modülü 2 olan çimentoların daha kaliteli oldukları bilinmektedir. Çimentoların hidrolik modülünün 1,7'den küçük olduğu durumlarda büyük kısmının dayanım değerlerinin istenilen düzeyde olmadığı belirlenmiştir. Hidrolik modülü 2,4 ve daha yüksek değerde olan çimentoların hacimsel denge açısından çok kötü durumda oldukları sonucuna varılmıştır. Eğer hidrolik modül değeri artarsa üretilen çimentonun erken dayanımı, hidratasyon için gerekli ısı ve klinkerin pişmesi için gerekli sıcaklık değeri de artmakta, kimyasal etkilere karşı olan direnci azalmaktadır [33-35].

#### 2.1.4.3. Alümin Modülü

Çimento bileşiminde bulunan demir oksit yüzdesinin, alüminyum oksit yüzdesi ile oranı alümin modülü (AM) olarak tanımlanmaktadır [33]. Alümin modülü aşağıdaki formül ile ifade edilir;

$$AM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (2.3)$$

Eğer alümin modülü 1,3-1,6 arasında bir değere sahip olursa, istenilen kalitede klinker elde edilebilir ve sinterleşmeyi sağlamak çok daha ekonomik hale gelebilir [33].

#### 2.1.4.4. Kireç Doygunluk Faktörü

Portland çimentosunun sahip olması gerek kalsiyum oksit miktarı teorik bir biçimde bulunabilmektedir. Klinkerin kireç doygunluğunun tam anlamı ile gerçekleşmesi için çimento içerisinde bulunan bütün silisyum dioksitin  $C_3S$  olarak, demir oksidin aynı miktara sahip alüminyum oksit ile  $C_4AF$  olarak ve geriye kalan alüminyum oksidin ise  $C_3A$  olarak bağlanması gerekir. Böylelikle çimentonun içeriğinde olan silisyum dioksit, demir oksit ve alüminyum oksit tarafından bağlanan maksimum kalsiyum oksit miktarına ulaşılabilir [35].

Alüminyum modülünün  $Al_2O_3$  olması durumunda tüm  $Al_2O_3$ , klinker içeriğinde  $C_4AF$  şeklinde bulunmaktadır. Böylelikle klinkerin sahip olduğu maksimum kireç ve kireç doygunluk faktörü (LSF) hesabı için aşağıda bulunan denklem kullanılabilir [34].

$$LSF = \frac{CaO}{2,8SiO_2 + 1,18Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} \quad (2.4)$$

Çimento üretimi sırasında uygun hammadde karışımının sahip olması gereken LSF, 0,85-0,90 değerleri arasındadır. Eğer LSF oranı 1'in üzerinde ise çimento içerisinde serbest kireç bulunduğu anlaşılmaktadır. Alit ( $C_3S$ ) ve belit ( $C_2S$ ) oranı, bu oranı etkilemektedir. LSF değeri serbest kirecin sabit değerlerine karşılık artmaktadır ve belit aleyhine alit miktarının da artmasına neden olmaktadır.

### 2.1.5. Çimento Hidratasyonu

Potansiyel olarak aktif durumda bulunan ve çimentoyu oluşturan klinker bileşikleri su ile kolaylıkla reaksiyona girmekte ve çözünmektedir. Çözelti içerisinde daha sonra hidroliz reaksiyonları oluşmaktadır. Çimentonun su ile yaptığı bu kimyasal reaksiyona hidratasyon adı verilmektedir [34].

Hidratasyon sürecinde ilk olarak plastik kıvama sahip çimento hamuru meydana gelmektedir. Priz başlangıcı itibari ile plastikliğini kaybeden hamur, priz sona ermesi ile sertleşmekte ve dayanım kazanmaktadır [31]. Bu süreç içerisinde iri taneciklere sahip çimento, su içerisinde yavaş bir şekilde çözünmekte ve hidrate durumunda tane yüzeyini jel şeklindeki tabaka halinde kaplamaktadır. Reaksiyona uğramayan klinker bileşiklerinin bu sayede su ile teması önlenmiş olmaktadır. Klinker bileşiklerinin doygun hale gelmesi ile çözünme hızı yavaşlamakta ve hidratasyon hızı da zaman içerisinde azalmaktadır [35].

Çimento bileşiklerinin tam anlamı ile hidrate durumuna geçebilmesi için uzun bir süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu duruma örnek; tanecik yüzeylerinde bulunan hidratasyon penetrasyon derinliği 28. gün sonunda 4 µm olurken, 1 yıl sonunda 8 µm kadar olması olarak verilebilir. Ayrıca 50 µm çapa sahip klinkerin tam anlamı ile hidrate olabilmesi için yaklaşık olarak 5 yıla ihtiyaç vardır [31].

Hidratasyon ısısı, çimentonun içeriğinde bulunan minerallerin su ile yaptığı kimyasal reaksiyon sonucunda ortaya çıkan ısıların toplamıdır. Hidratasyon ısısı birimleri J/g veya cal/g olarak ifade edilebilir. Normal bir Portland çimentosunun sahip olduğu hidratasyon ısısı yaklaşık olarak 120 cal/g (500 J/g)'dır [35].

Çimento bileşenlerinin katılaşması tam bir kimyasal dengeye sahip olmadan gerçekleştiğinden, bileşenler yüksek enerjiye sahiptir. Bu katılaşma esnasında hidratasyon ısısı meydana gelmektedir. Çimentonun kimyasal bileşiminin de etkisiyle hidratasyon boyunca gerçekleşen ısı yayılımını priz süresi ile ilişkilendirilebilir. Çimento bileşenlerinin hidratasyonları tamamen birbirini ile bağımsız değildir. Sülfat iyonları ile kalsiyum silikatların hidratasyonu hızlanırken, kalsiyum alüminatların hidratasyonları gecikmektedir [35].

Beton teknolojisi için hidratasyon ısısı hem yararlı hem de zararlı olabilmektedir. Soğuk hava şartlarında normal sürelerde priz ve dayanım kazanabilmesi için kimyasal reaksiyonlara yardımcı olmaktadır. Sıcak hava şartlarında ise taze betonun kıvam

kaybını hızlandırmaktadır. Kütle betonlarının dış yüzeylerine kıyasla iç bölgelerinde ısının yüksek olması ve bu nedenle ısı farklılıklarının ortaya çıkması sonucunda ısıl gerilmeler ve çatlamlar meydana gelebilmektedir [30].

Çimento hidratasyon aşamaları, çimento bileşimi, iç yapısı ve diğer faktörlerden de etkilenebilmektedir. Örneğin ortamın sıcaklık artışı reaksiyonları hızlandırırken; çimentonun inceliği ise hidratasyon reaksiyonlarını etkilemektedir. Yapılan bazı çalışmalarda 25 µm üzerindeki çimento taneleri, birkaç yıl sonrasında bile tam olarak hidrate olamamaktadır. Bunların yanı sıra jel teşekkülü için gereken miktardan daha fazla yoğurma suyu priz sürelerini ve dayanım sürelerini uzatırken; bayat olarak tabir edilen bekletilmiş çimentoların da priz sürelerini geç aldıkları ifade edilebilir.

Çimento için priz süreleri deney metoduna göre değişebilen göreceli kavramlar olarak nitelendirilebilir. Bu nedenle ülkelerin çoğu vicat metodunu kabul ederek bu konuda görüş birliğini sağlamışlardır. Beton teknolojisinde priz sürelerinin çok önemli olduğu çalışmalarda belirtilmiştir. Örneğin, priz başlama süresinin ardından taze beton işlenebilirliğini kaybetmekteyken, bir diğer açıdan priz zamanında tamamlanmasıyla betondaki sertleşmenin gerçekleşmesi ve zamanında dayanım kazanması istenmektedir. Bu amaçla standartlar çimentonun 52,5, 42,5 ve 32,5 dayanım sınıflarına göre sırasıyla 45, 60 ve 75 dakika olarak priz başlama sürelerini sınırlandırmışlardır. Bu sürelerin istenen seviyelerde elde edilmesi için bu amaçla kullanılan alçı taşı miktarlarının çok dikkatle belirlenmesi gerekmektedir [35]. Ayrıca gerek hava durumu gerekse inşaatın yapım koşullarına göre, çimentonun yanı sıra kimyasal ve mineral (çoğunlukla puzolanik) katkıları da kullanılmaktadır.

## **2.2. PUZOLANLAR**

Yalnız başına bağlayıcılık özelliği olmayan, çok ince tane yapısına sahip olana kadar öğütüldükleri zaman, normal sıcaklık ve nemli ortamlarda kireç ile bir araya geldiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanabilen, alüminyum oksit ve silis bakımından zengin malzemelere puzolan denilmektedir [36, 37, 38].

Ülkelere göre farklı isimlendirmelere sahip olan puzolan terimi, Almanya’da “Tras”, Yunanistan’da ise “Santorin toprağı” olarak adlandırılmaktadır. Türkiye’de ise volkanif tüf karaktere sahip puzolanlar ise “Tras” olarak isimlendirilmektedir [38]. Türkiye doğal puzolanlar bakımından zengin bir ülkedir [38, 39]. Portland çimentosu ile trasın birlikte

kullanılması ile birçok avantaj elde edilebilir. Betonda bulunan mikro boşluklar tras kullanımı ile doldurularak iskelet yapısı değişmekte, bu nedenle de beton dayanımında artış gözlenmektedir [38, 40]. Ayrıca betonda tras kullanımı ile birlikte betonda işlenebilirlik ve sülfat dayanımı artarken; su geçirimsizliği, hidrasyon ısı, terleme ve alkali silis reaksiyonu azalmaktadır [37, 38, 39]. Bunların yanı sıra  $SO_3$  ve  $MgO$  gibi zararlı oksitler fazla miktarda olduklarında hacim genişmesine sebep oldukları için, tras kullanımıyla bu zararlı etkiler azaltılabilmektedir [37,38].

Puzolanik malzemeler köken, yapı, kimyasal ve mineralojik bileşenleri açısından farklılık göstermektedirler. Su bulunan ortamlarda bağlayıcılık özelliğe sahip kararlı yeni hidrasyon ürünleri oluşturabilmek için kireç ile birleşme eğilimi gösterebilirler [41].

Puzolanlar genellikle kimyasal, fiziksel ve mineralojik açıdan benzerlik gösterebilirler. Portland çimentosu  $CaO$  esaslıdır, puzolanlar ise  $SiO_2$  esaslıdır. Bu nedenle çoğu puzolan tek başına bağlayıcı özelliğe sahip değildir [42, 43].

Genel olarak ele alınırsa silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, diatomit, tras, zeolit, pişmiş kil gibi puzolanik malzemelerin kullanımı hem ekonomik, hem teknik hem de ekolojik açılardan birçok fayda sağlamaktadır. Bu faydalı davranışları nedeniyle de gerek çimento gerekse beton teknolojisinde vazgeçilmez ürünler olarak nitelendirilmekte ve birçok çalışmada kullanılmaktadır [1-7].

### **2.2.1. Puzolanların Tarihçesi**

Neolitik çağda Çatalhöyük'te yapılan yapıların üzerindeki harçları inceleyen bilim insanları yapılan araştırmaların sonucunda kullanılan harçların 8000 yıl öncesinde kadar ulaştığını belirlemişlerdir. Yapılan harçların büyük ihtimalle volkanik kül olan toprak malzemeler kullanılarak oluşturulduğu düşünülmektedir. Rodos'ta ve Girit'te yapılan su inşaatları ve mozaik tarzındaki işler 3000-4000 yıl öncesine ait olmasına rağmen günümüze kadar dayanımını kaybetmeden yapısını koruyabilmiştir. Bu ve buna benzer yapılar incelendiğinde, inşaatlarda puzolan ve sönmüş kireçten oluşan bağlayıcıların kullanıldıkları görülmektedir [44, 45].

Puzolan isminin verilmesi ve puzolanik malzemelerin harç ve beton yapılarında kullanılması, Romalılar tarafından MÖ 300 yılı civarında başlamıştır. MÖ 300–200 yılları arasında Marcus Vitruvius Pollio'nun (Romalı ünlü mimar) "Mimarlık Üzerine On Kitap" adlı eserinin ikinci kitabında puzolanlardan bahsedilmektedir. Romalılar

tarafından puzolanların bu sayede keşfedildiği belirtilmektedir. Bu tarz malzemeler pozzolana (puzolan) olarak isimlendirilmiştir. Vitruvius, pişirilmiş kil ya da öğütülmüş tuğla veya kiremit için de puzolonik özelliğe sahip olduğunun Romalılar tarafından bilindiğini belirtmektedir. Romalılar, volkanik kül, volkanik toprak ya da pişirildikleri kili, söndürülmüş kireç ve su ile birleştirmişler, bu sayede de suyun altında bile sertleşme özelliğine sahip bağlayıcılar elde edebilmişlerdir. Ayrıca bu tarzdaki bağlayıcılar ile birlikte taş parçaları kullanarak, günümüzdeki betonlara benzer betonlar elde etmişlerdir. Osmanlılar döneminde sıkça kullanılan “Horasan Harcı”, kilden yapılan ve pişirilen tuğla, çömlek ve kiremit gibi malzemelerin öğütüldükten sonra söndürülmüş kireç ile birlikte kullanılması sonucu yapılmaktadır [46].

Portland çimentosu kullanımı ile beraber puzolanik malzeme kullanımı XIX. yüzyılın sonlarına doğru azalmıştır. 1950 yılından sonra ülkemizde puzolanlar çimento malzemesi olarak kabul edilmiştir. Portland çimento ve puzolanik madde karışımlarının birlikte kullanılmasıyla beton ve harçların bağlayıcılık özelliklerine olumlu etkisinin görülmesi, bu kabulün nedenidir [47].

### **2.2.2. Puzolan Sınıflandırması**

Çimento ile birlikte karıştırılarak ya da çimentoya ilave olarak birçok doğal ya da yapay puzolanik malzeme kullanılmaktadır [48]. Doğal puzolanlara örnek olarak volkanik tüfler, volkanik küller, volkanik camlar ve diatomlu topraklar verilebilir. Doğal puzolanik malzemelere öğütme işlemi dışında bir işlem yapılmasına gerek yoktur. Yapay olarak sınıflandırılan puzolalar ise puzolonik özelliği çok az taşıyan ya da hiç taşımayan malzemelerin kimyasal ve/veya yapısal modifikasyonlarının sonucunda oluşmaktadır [41].

Doğal puzolanların ana oluşumu incelendiğinde volkanik tortul kayalardan oluştuğu görülmektedir. Fakat içeriğinde farklı malzemelerden bir araya gelmiş maddeleri de içerebilirler.

$\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  puzolanların oluşmasında tepkimeye sebep olan oksitlerdir. Sertleşmenin gerçekleşebilmesi için reaktif  $\text{CaO}$  ihmal edilebilmektedir. Puzolanik özelliğe sahip malzemeler su ile birleştirildiklerinde tek başlarına sertleşme göstermezler. Fakat ince taneli olarak öğütülürse su ile birleştikleri zaman çözünmüş olan portlandit ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ile puzolanik malzemelerdeki  $\text{SiO}_2$  birleşerek dayanımı arttıran ilave C-S-H bileşiklerini oluşturmak üzere reaksiyona girerler. Ortaya çıkan bileşikler aslında

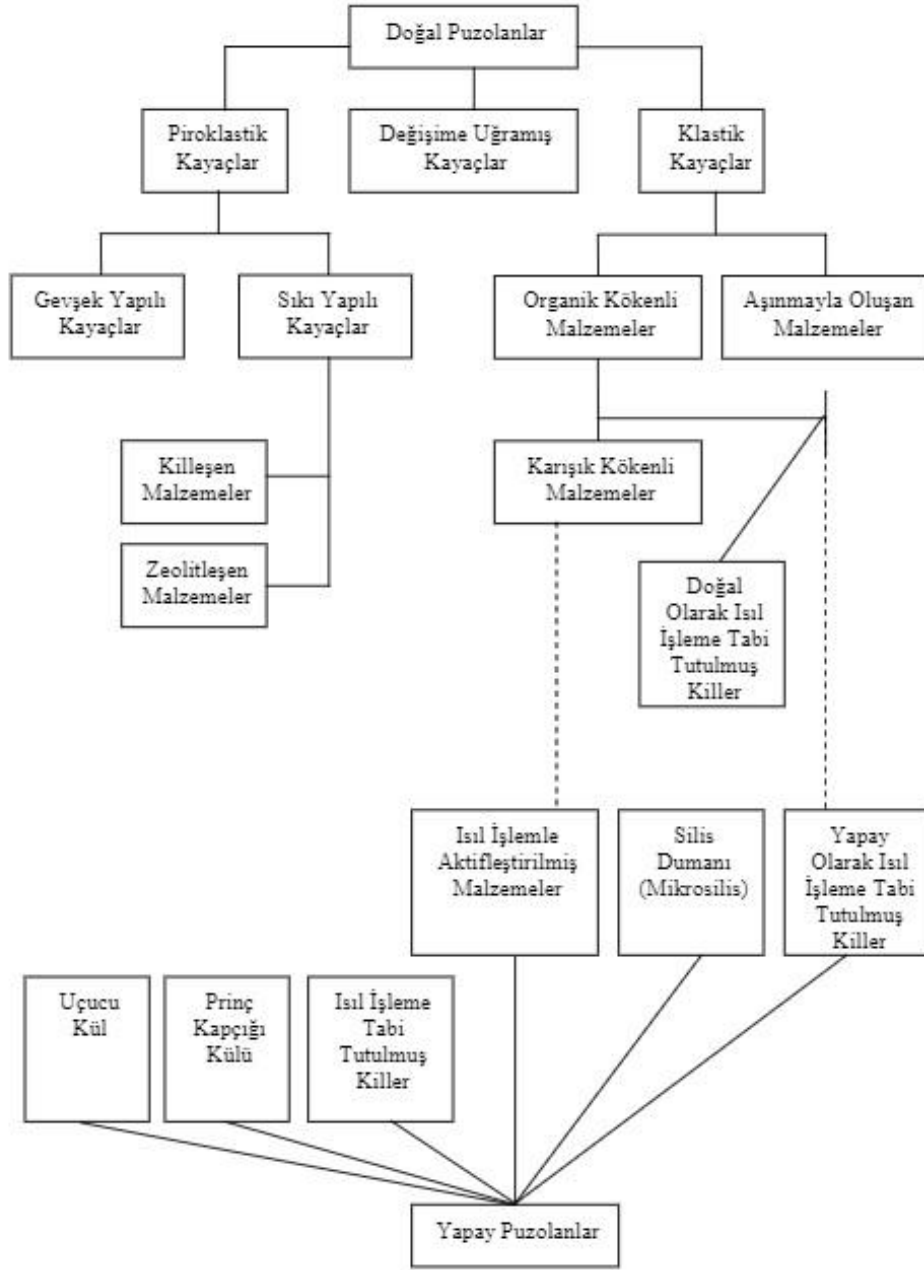
hidrolik maddelerin de sertleşmesi ile elde edilen bileşiklere benzemektedirler [42].

Doğal puzolanlar; klastik kayaç, piroklastik kayaç ve değişime maruz kalmış kayaç olarak üç gruba ayrılmaktadırlar. Kil ve diatomit malzemesini bünyesinde barındıran kayaçlar klastik kayaçlardır. Piroklastik kayaçların oluşumunda, eriyik haldeki magma hızla ve kuvvetle dışarıya fırlamakta, sonra şekil kazanmakta, ardından hızla soğumaya geçmekte ve yüzeyinde kırıntılar meydana gelmektedir. Değişim geçirmiş kayaçlar ise yüksek oranda silis içeren malzemelerden meydana gelmektedir. Portland çimento ile kil malzemesinin kullanılması, kil malzemesinin az olan puzolanik davranışından dolayı olağan değildir. Fakat uygun sıcaklıklarda yapılan ısıtma işlemleriyle kilin sahip olduğu puzolanik özellikler istenilen seviyede artırılabilir [27, 49, 50].

Yapay puzolanlar genellikle endüstriyel atıklardır ve yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı en çok bilinenleri arasındadır. Bazı doğal malzemeler ısıtma işlemiyle birlikte puzolanik özelliği kazanabilir ve yapay puzolan olarak sınıflandırılabilir [27, 49, 50].

Uzmanlar puzolanları farklı şekillerde sınıflandırmışlardır. [27, 50]. Şekil 2.1'de Massazza'ya göre yapılan sınıflandırma şekli verilmiştir.





Şekil 2.1: Pozolanların sınıflandırılması (Massazza'ya göre).

F. Massazza'nın yaptığı ve pozolanların kökenini temel alan sınıflandırma biçimi en popüler olanıdır (Şekil 2.1).

### 2.2.3. Pozolanların Aktivitesi

Pozolanik aktivite deneyi sonucunda olumlu sonuç veren malzemeler, pozolanik özelliğini kanıtlamaktadır. Mekanik ve kimyasal olarak yapılan bu deneyler, doğal ve yapay pozolanlarda gerçekleştirilmektedir. Pozolan-kireç ve pozolan-çimento harç örneklerine yapılan eğilme ve basınç deneyleri mekanik deneylerdir. Pozolan içeren çimentonun su ile gerçekleştirdiği hidratasyon sonucunda çözeltide bulunan reaksiyon

ürünlerinin belirlenebildiği deneyler ise kimyasal deneylerdir. Spektrofotometrik ve kalorimetrik yöntemler kullanılarak puzolanların reaktivitesi belirlenebilir. Çimento hamurundaki özgül yüzey alanı artış hızının ölçülmesi ile de puzolanik maddeler değerlendirilebilir [20].

Puzolanların sahip olduğu aktif amorf silisin, kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girebilme ve sertleşebilme özelliğine puzolanik aktivite denilmektedir. Bu iki özelliğin aynı anda oluşması puzolanik aktivite için çok önemlidir [20].

Hedeflenen düzeyde puzolanik aktiviteye sahip puzolanik malzemeler için belirli kriterler bulunmaktadır. Bu kriterler, malzemenin amorf bir yapıya sahip olması, istenilen miktarda silis, alümin ve demir oksit bulundurması ve ince öğütülmesidir. Puzolanik aktivite hesabı için dayanım aktivite indeksi hesaplanabilir. Aşağıda bulunan hesap yöntemi ile bu değere ulaşılabilir [51].

$$\text{Dayanım aktivite indeksleri} = (A/B) \times 100 \quad (2.5)$$

Burada; A, puzolan içeren harç örneklerinin ortalama basınç dayanımını; B ise referans harç örneklerinin ortalama basınç dayanımını ifade etmektedir.

TS EN 450 – 1 (2012) ve ASTM C 311 (2019) standartlarında referans harç numuneleri ile puzolan içeren harç numuneleri için gerekli malzeme miktarları ve deney yapım aşamaları bulunmaktadır [42].

Puzolanların genel olarak sahip olduğu heterojen yapı ve karmaşık hidrasyon yapılarından dolayı puzolanik aktiviteyi açıklayan bir model geliştirilememiştir. Bu yüzden puzolanik aktivite için genel eğilimler bulunmaktadır. Aşağıda bunların bir kısmı özet olarak verilmiştir [27, 39].

- Zeolitik puzolanlar, camsı puzolanlara kıyasla daha aktiflerdir.
- Kireç ile puzolan karışımının belirli sınırlar içerisinde yapılması halinde kireç/puzolan oran artışı sonrasında  $\text{Ca(OH)}_2$  bağlanmasında artış görülür.
- Farklı puzolanların sahip olduğu camsı fazlar, farklı kireç bağlayabilme özelliğine sahiptirler.
- Puzolanın aktif fazları içerisinde bulunan  $\text{SiO}_2$  miktarı bir puzolanın bağladığı  $\text{Ca(OH)}_2$  miktarı ile ilgilidir.

- Diğer özelliklerin sabit kalması ile puzolanın bağladığı  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  miktarının fazlalığı, bu puzolanın sahip olduğu aktif madde miktarı fazlalığını gösterir.
- Puzolanın uzun dönemdeki aktivitesi kimyasal ve mineralojik kompozisyonu; kısa dönemdeki aktivitesi ise özgül yüzey alanı (Blaine) ile ilişkilidir.
- Puzolan ile kireç karışımında ortamın sahip olduğu su miktarı fazla ise bağlanan kireç miktarında artış görülür.

#### 2.2.4. Puzolanik Malzemelerin Reaksiyonu Ve Reaksiyon Ürünleri

Puzolanik reaksiyon, ince taneli olarak öğütülen puzolanların nemli ortamda CH ile yapmış oldukları reaksiyondur. Kalsiyum hidroksit ile reaksiyona giren puzolan, belli faktörlere bağlı olarak ilişkilendirilir. Bunlar; bileşik miktarı, sıcaklık, katkı malzemeleri, davranış ve incelik gibi parametrelerdir [50].

İnce öğütülmüş puzolan, su ve sönmüş kireç ile birleştiğinde ortaya kimsayal reaksiyonlar çıkmaktadır. Puzolanların birleşiminde silis ve alümin etkin rol oynar. Aşağıda, kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan reaksiyon ürünleri verilmiştir [39].

- Etrenjit ( $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{12}$ ),
- Kalsiyum alüminat monosülfat ( $\text{C}_4\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{12}$ ),
- Hidrate olmuş  $\text{C}_2\text{ASH}_8$  (gehlenit),
- Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H),
- Kalsiyum alüminat hidrat ( $(\text{C}_4\text{ASH}_x)$ ,  $x=9-13$ ),
- Kalsiyum karboalüminat ( $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_{12}$ ).

Yukarıda verilen ürünlerin hepsi aynı anda ortaya çıkmayabilir. Hidratasyon reaksiyonlarının derecesine, kirecin kalsiyum hidroksit kullanabilmesine, puzolanın sahip olduğu kimyasal ve mineralojik bileşenlere ve hidratasyonun gerçekleştiği andaki çevre koşullarına bağlıdır [39, 50].

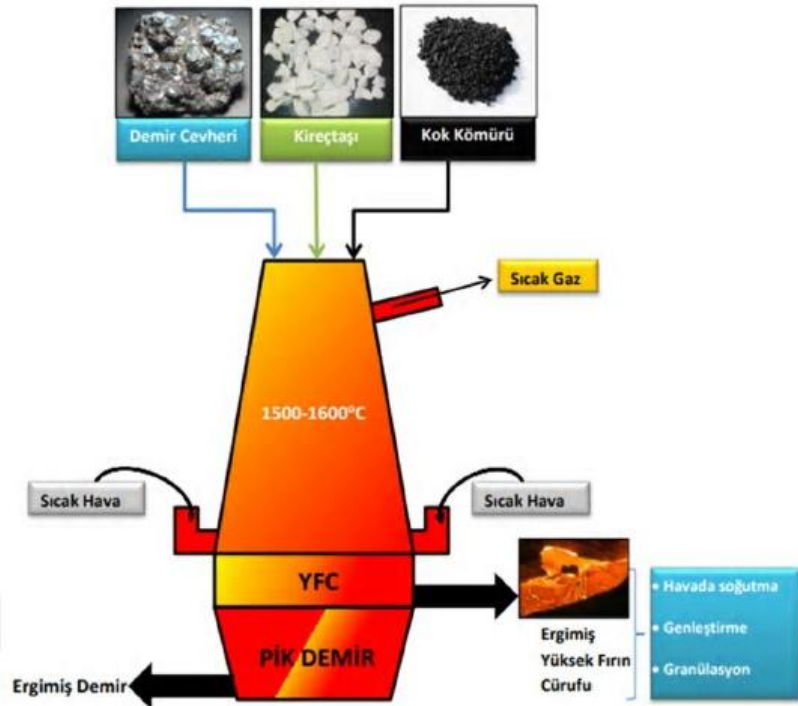
#### 2.2.5. Yüksek Fırın Cürufu

Roma dönemi yapılarındaki yapılan araştırmalardaki kayıtlara göre cürufların o dönemde kullanıldığı bilinmektedir. İngiltere’de 1813 yılında modern yol yapımında cüruflar kullanılmıştır. 1880’li yıllarda ise Avrupa ve Amerika’da yapılan yol kaplama işlerinde yine cüruf kullanılmıştır [52]. “Thurament” adı ile Almanya’da cüruf satışı

yapılmış ve Almanlar bazı baraj inşaatlarında ve çok fazla yapıda cüruf kullanmışlardır [53].

Yüksek fırın cürufunun bağlayıcı özellikte olduğu 19. yüzyılın ikinci yarısında bulunmuş ve cürufu bağlayıcılar ticari amaçlar için üretilmeye başlanmıştır. 1883 yılında yüksek fırın cürufu Portland çimentosunda hammadde olarak, 1892 yılında ise mineral katkı maddesi olarak kullanılmaya başlanılmıştır. Şuan yüksek fırın cürufu pek çok ülkede çimento üretiminde kullanılmaktadır [12].

Yüksek fırın cürufu, çimento ve beton teknolojisine önemli katkılar sağladığından dolayı yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek fırın cürufu yapay puzolan sınıfında yer almaktadır. Metalurji tesislerinde bulunan fırınlarda kok, kireç ve demir filizi gibi maddelerin 1500-1600 °C sıcaklığa maruz kalarak demir üretimi sonrasında ergimiş halde ortaya çıkan atık maddeye yüksek fırın cürufu denir. Yüksek fırın cürufu ana ürün tipine ve üretim yöntemine göre farklı özelliklerde ortaya çıkabilir [10-12]. Şekil 2.2’de yüksek fırın cürufu üretim aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Yüksek fırın cürufu üretim aşamaları.

CaO, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün yüksek fırın cürufunun esas kimyasal yapısını oluşturduğu söylenebilir. Fakat yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi kadar mineralojik yapısı da

önemlidir. Eğer cüruflar yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra yavaş soğutulursa kristal yapıya sahip olurlar ve beton agregası olarak kullanılabilirler. Hızlı soğutulduklarında ise yarı kararlı amorf yapıya sahip olurlar ve katı eriyik halde elde edilirler. Hızlı soğutulan bu cürufların,

- CaO, SiO<sub>2</sub> ve MgO miktarları toplamı minimum 2/3 oranında,
- Camsı faz içerme oranı en az 2/3 oranında,
- Çeşitli hidrolik modüllerden biri olan (CaO+MgO)/SiO<sub>2</sub> oranının 1'den büyük olması tercih edilir [12, 33].

Soğutma şekillerine göre yüksek fırın cüruflarının görüntüsü Şekil 2.3'de verilmiştir [54].



Şekil 2.3: Soğutma şekillerine göre yüksek fırın cürufu görüntüleri.

Çelik endüstrisinde oluşan en önemli yan ürünlerden bir tanesi granüle yüksek fırın cürufudur. Yüksek fırın cürufu, demir çelik fabrikalarında üretilen çeliğin yaklaşık olarak %25-30'u kadar elde edilebilir [55].

Yüksek fırın cürufunun depolanması ve imha edilmesi zor olduğundan dolayı çevre kirliliği açısından büyük sorunlar ortaya çıkabilir. O yüzden bu sorunların çözülmesi gerekmektedir. İnşaat sektörünün kaynak kullanımı ve maliyetleri ele alındığında dünyada büyük pay sahibi olduğu görülür. Bu yüzden yüksek fırın cürufunun beton sektöründe kullanılması ile ekonomik sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Yüksek fırın cürufu üzerinde malzemenin uygunluğunu belirlemek için pek çok laboratuvar çalışması yapılmıştır. İnce öğütülerek beton ile birlikte kullanılan yüksek fırın cürufu, çimento hamurunda daha az boşluklar elde edilmesine ve betonun kalıcılığının artmasına yardımcı olur [56].

Yüksek fırın cürufu, öğütülmesi ile çok ince taneli yapıya sahip olduğunda puzolanik özellik kazanır ve beton ile beraber kullanıldığında betonun özelliklerini geliştirir. Cüruf kullanılan betonun, cürufsuz betona kıyasla dayanımı daha fazladır. Portland

çimentosunun hidrasyon gelişimi ile kıyaslandığında, yüksek fırın cürufunun hidrasyon hızı daha yavaştır. Bu sebeple dayanımını daha geç kazanmaktadır. Yüksek fırın cürufunun hidrasyon hızı belli etkenlere bağlıdır. Bunlar; cürufun katılma oranı, ortamın nem ve sıcaklığı, cürufun ve Portland çimentosunun kimyasal kompozisyonlarıdır. Hidrasyon hızı yavaş olduğundan yüksek fırın cürufu betonların daha fazla küre maruz kalması gerekir. Yapılmış olan çalışmalar, cüruf katkısı ile birlikte betonda işlenebilirlik, mukavemet, durabilite, geçirgenlik ve korozyona dayanıklılık özelliklerinin geliştiğini göstermektedir [57].

Kil ve silt, yüksek fırın cürufunun kompozisyonunda bulunmaz. Yüzeyinin pürüzlü olması ve sürtünme özelliklerinin de iyi olmasından dolayı yüksek fırın cürufunun aderansı yüksektir. Donma-çözölmeye karşı direnç yeteneği de fazladır. Düşük su emme yüzdesi, yoğunluk ve ince taneli öğütölüp kullanıldığında bağlayıcılık özelliği göstermesi ve yüksek soyulma direnci gibi avantajlarından dolayı yüksek fırın cürufu karışımlarda tercih edilmektedir. İnşaat sektöründe bu özelliklerinden dolayı puzolan ya da agrega olarak kullanılmaktadır. Beton ve çimentoda puzolan olarak kullanımı üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Ayrıca “Yüksek Fırın Cürufu Çimento” ismi ile çok fazla üretim yapılmaktadır. Duvar bloğu yapı elemanları, yalıtım sektörü ve zemin stabilizasyonu gibi farklı alanlarda da yüksek ilgi görmektedir. Zemin iyileştirme alanında yapılan çalışmalar sonucunda, özellikle kil içeren zeminlerin iyileştirilmesinde yüksek fırın cürufu kullanımı ile olumlu anlamda sonuçlar alınmaktadır [55].

Üretim sonucu olarak Türkiye’de pek çok atık malzeme katı, sıvı ve gaz halde yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır [58]. Atmosfere bırakılan atık gazlar özel filtrelerin kullanımı ile hava kirliliğini önlemektedir. Fakat yan ürün olarak ortaya çıkan atık malzemeler sorun teşkil etmektedir [59]. Yüksek fırın cürufu bu atık malzemelerden biridir ve miktarı oldukça fazladır. Geri dönüşüme de uygun olan yüksek fırın cürufunun kullanımı gelişmiş ölkeler ile kıyaslandığında Türkiye’de daha azdır [11, 58].

## **2.3. ÇALIŞMADA UYGULANAN ANALİZLER**

### **2.3.1. X-Işınları Kırınımı**

Kristal fazın kendine özgü atomik sıralamasına göre yapılan ve ışınların karakteristik düzen içerisinde kırılması ile X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) kullanılmaktadır. Her bir faz üzerine uygulanan kırınım profilleri, sadece o kristali tanımlamaktadır. XRD analiz

yöntemi çok az miktardaki numuneleri bile analiz edebilir. Ayrıca analiz sırasında numuneye zarar vermez [60].

X-ışınları kullanılarak yapılan analizler sonucunda malzemenin kristal içeriği araştırılabilir ve iç yapısına ait morfolojik özellikler belirlenebilir. Sıcaklık ve sinterleşme, X-ışınları analiz yöntemi kullanılarak numunelere gönderilir. Bu sayede ilk çekirdeklenme bölümünden başlanarak, son kristalleşme bölümüne kadar var olan bütün kristallenme aşamalarına ulaşılabilir. X-ışınları analizi, yapılan işlem sırasında numuneler de meydana gelen farklı özellikteki kristal fazların ardışıklığının bulunmasında ve daha uygun sıcaklık kriterlerinin belirlenmesinde büyük fayda sağlamaktadır [60].

### **2.3.2. Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi**

Titreşim spektroskopisi (IR) moleküler bağ karakterizasyonunu belirlemek için kullanılmaktadır. Maddelerin infrared (titreşim) ışınlarını absorplaması amacına uygun kurulmuş olan infrared spektroskopisi, bir spektroskopisi dalı içinde yer almaktadır. Bu fiziksel yöntem hızlı ve ekonomik olmasının yanı sıra yıkıcı değildir. IR tekniği çok yönlü özelliklere sahiptir. Kristal kafes tanımlamalarının fiziksel parametrelerine ait kaynağı belirlemesinin yanında numuneler arası saf deneysel nitel ilişkilerini de belirlemektedir. Katı yüzeyinde bulunan sıvı ve gaz adsorbsiyonunu incelemek amacı ile çok fazla kullanılmaktadır [61, 62].

IR spektrumu, organik ya da inorganik bileşiklerin karakterize olmasında tercih edilen bir araçtır. Maddelerin ortaya çıkardığı atomlar arasındaki bağların titreşimi sonunda elde edilen frekanslara karşı gelen adsorbsiyon pikleri, IR spektrumu ile görülebilir. Maddelerin kendilerine ait spekturumları vardır. Organik maddelerin sahip olduğu spekturumların  $2000\text{ cm}^{-1}$ 'den sonraki bölümü daha ince ayrıntılara sahiptir. Bu bölge "parmak izi bölgesi" olarak anılmaktadır. Parmak izi bölgesinin spektrumu iki kat genişletme sonucu alınmaktadır. Böylelikle madde hakkında daha ince ayrıntılı bilgilere sahip olunabilir [63].

İnfrared rejiminde, kimyasal biçimde bağlı yapıların titreşim hareketleri sonucunda frekanslar ortaya çıkmaktadır. Numunenin etkileşimi öncesi ( $I_0$ ) ve sonrası ( $I$ ), radyasyon topluluğuna ait şiddeti infrared analizi kullanılarak belirlenebilir.  $I/I_0$  diyagramının frekansta bulunan karşılığı infrared spekturumunu belirlemektedir [64].

Moleküllerin sahip olduğu titreşim hareketleri, maddenin monokromatik infrared ışın

bandı ile aydınlatılması sonucunda infrared ışınlar az ya da çok adsorbe edilmektedir. Maddenin karakteristiği deneylerde dalga boyu ile adsorbsiyon arasında çizilen grafiklerdir. Grafik sayesinde madde tanımlanabilmektedir. İnfrared ışınlarının sahip olduğu dalga boyu 1000-300000 nm arasındadır. Fakat infrared spektroskopisinde, dalga boyları genelde 2500-25000 nm arasında bulunan ışınlar kullanılır. Bu aralık, infrared bölgesi ve yakın infrared olarak adlandırılır. Işınlar, dalga boyları yerine dalga sayıları şeklinde infrared spektroskopisinde verilmektedir. Dalga sayısı  $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda}$  ( $\text{cm}^{-1}$ )'dir. Bu denkleme göre dalga boyları aralığı;

$$\bar{\nu} = \frac{1}{2500} \cdot 10^{-7} = 4000^{-1} \text{ ve } \bar{\nu} = \frac{1}{25000} \cdot 10^{-7} = 400^{-1} \text{ 'dir.}$$

400  $\text{cm}^{-1}$ 'den daha az dalga boyuna sahip küçük ışınların enerjileri, rotasyon (dönme) enerjileri seviyesinde olduğundan, havada bulunan moleküller tarafından bile kolay bir şekilde adsorbe edilirler [61, 62].

Taneciklerin yüzeyinde bulunan moleküler toplulukları ifade edebilmek için Fourier Transforms Infrared Spectroscopy (FT-IR) analizi kullanılmaktadır. Silisyum-alüminyum, kükürt, hidroksit ve karbon titreşim ve deformasyon bağında ortaya çıkan titreşim sayısı, infrared spekturumunu oluşturduğu, yapılan çalışmalar sonucunda görülmüştür. Titreşim sayısı arasında bulunan değişiklikler dalga boyunda oluşmaktadır ve 4 bölge şeklinde analizleri yapılmaktadır [65].

Birinci bölge Si ve Al bağlarına denk gelir ve 400  $\text{cm}^{-1}$  ve 1100  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyları arasında bulunmaktadır. Çimentoyu oluşturan kalsiyum silikat titreşimleri 930  $\text{cm}^{-1}$ , 1000  $\text{cm}^{-1}$  ve 1010  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayıları arasında yoğun görülmektedir. Kalsiyum ve karbon titreşimleri ise 2920  $\text{cm}^{-1}$ -2930  $\text{cm}^{-1}$  ve 2850  $\text{cm}^{-1}$ -2855  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyları arasında daha yoğun görülür. Kalsiyum silikat titreşimi bütün çimento tiplerinde görülebilir. Fakat katkısız çimentoların sahip olduğu titreşim daha çok 1000  $\text{cm}^{-1}$  -1010  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyları arasında yoğun görülür [65, 66].

S-O bağı olarak izlenen ikinci bölge, S (kükürt) olarak isimlendirilmektedir. 1100-1300  $\text{cm}^{-1}$ , 1620-1685  $\text{cm}^{-1}$  ve 3100-3600  $\text{cm}^{-1}$  olmak üzere üç dalga sayısı aralığında bulunur. Çimento içeriğinde bulunan S-O bağı, priz süresini ayarlamak için kullanılabilecek taşıdan oluşur [63, 67].

700-1500  $\text{cm}^{-1}$  titreşim dalga sayıları arasında bulunan üçüncü bölge, C (C-O) titreşim bağlarını ifade eder. 2500-3000  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayısı aralığında ise ikinci bağlar olarak

izlenir. Çimentonun karbonasyonu sonucu bu bağlar oluşmaktadır [61, 68].

1620-1650  $\text{cm}^{-1}$  ve 3400-3450  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayısı aralığındaki titreşim ve deformasyon bağları (O-H) dördüncü bölge olarak isimlendirilmektedir. Ayrıca bu bölge su moleküllerini içermektedir. Susuz bileşiklerin varlığını ise 3400-3450  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayısı aralığını gösterir [66, 68].

Minerallerin sahip olduğu moleküler bağ karakterizasyonu, 4 bölgede oluşan dalga sayıları incelenerek bulunabilmektedir [69].

### **2.3.3. Termal Analiz**

İki veya daha fazla termal analiz tekniğinin numune üzerine aynı anda uygulanması simultane (eş zamanlı) termal analiz (STA) sistemi ile yapılabilmektedir. Fark esaslı termal analiz (DTA), termal gravimetri analizi (TGA) ya da fark taramalı kalorimetri (DSC) gibi teknikler kullanılarak simultane termal analiz yapılabilir [27].

Farklı sıcaklıklarda numunelere uygulanan ve numuneleri ısıtarak kontrollü bir biçimde denetiminin yapıldığı analiz metodu DTA tekniğidir. Denetimde toz alüminaya benzeyen asal maddeler kullanılır, çünkü bu maddeler sıcaklık aralığı üzerinde çalışırken tepki vermezler. Numunenin belirli sıcaklıkta reaksiyona uğraması sonucunda numune, ya reaksiyon ısıyı yayarak (ekzotermik) veya dışarıdan ısı alarak (endotermik) sahip olduğu sıcaklık artacak veya azalacaktır. Her maddenin sıcaklık farkını kaydedebilmek amacı ile kullanılan termokupü (ısı çifti), maddenin sıcaklığını ölçer. DTA, hidratasyon zamanında çimentonun bileşiminin dönüşümünü izlemek için kullanılan ideal bir tekniktir. DTA ve TGA aynı anda numuneye uygulanabilmektedir [70].

Sülfatlar, kil mineralleri, zeolitler ve karbonat gibi mineralleri tanımlamak amacı ile DTA çok fazla kullanılan bir tekniktir. Çimentoyu bir araya getiren ana bileşiklerin, hidratasyon sırasında açığa çıkan ısının etkisi sonucunda oluşan dönüşümleri de, DTA yöntemi kullanılarak elde edilebilir. Reaktif olmayan (referans) numune ile reaktif numunenin aralarında bulunan ısı farkı ( $^{\circ}\text{C}$ ), DTA tekniğinde zamanın fonksiyonu olarak belirlenir. Belirlenen ısı farkı ile tepkimelerin termodinamiği, sıcaklıkları ve kinetiği hakkında önemli bilgilere ulaşılabilir. TGA sonucunda ise sıcaklığın fonksiyonu olarak gaz ayrılması ya da adsorpsiyonu sonucunda ağırlık kaybı veya yoğun fazların oluşumu belirlenebilir [61].

25-40 mg aralığındaki bir miktarda numune, belirli bir sıcaklıkta ısıtılması sonucu numunede oluşan ağırlık değişimlerini ölçebilen, ısı nedeni ile bozulan fazların miktarını belirleyebilen ısı analiz yöntemi, TGA tekniğidir. Kalsiyum hidroksitin, sertleşmiş olan çimento bileşimindeki miktarının ölçülmesinde çok fazla kullanılan bir yöntemdir [71].

Numuneyi oluşturan bileşim, uygulanan sıcaklık, ısıtılan fırında kullanılan gaz ve ısıtma hızı numune oluşan kütle değişimini etkileyen faktörlerdir. Ağırlık kaybı, belirli bir ısı sonucunda bir kimyasal içeriğin durumunu özetlemektedir. Numune bileşiğinin miktarı kütle değişim büyüklüğü ile belirlenebilmektedir [69].

Çimentoların farklı sıcaklık aralıklarında tespit edilebilen reaksiyon ürünleri;

- 25 °C–200 °C: C-S-H ve Aft (trisülfoalüminat-4CaO.3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.32H<sub>2</sub>O) fazlarının dehidratasyonu ve ayrışması,
- 400 °C–500 °C: Ca(OH)<sub>2</sub> (CH)'nin ayrışması,
- 500 °C–750 °C: CaCO<sub>3</sub>'ün ayrışması,
- 105 °C–1000 °C: C-S-H jel, CH ve diğer hidratlı ürünlerin dehidrasyonu ve ayrışması su kaybı şeklinde gelişmektedir [72-75].

#### **2.3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)**

İnsan gözü ile malzemeleri çok ince ayrıntılarına kadar incelemek mümkün değildir. Fakat bazı optik cihazlara uygulanan küçük değişimlerin sonucunda malzemeleri ince ayrıntısına kadar görmek mümkün hale gelmiştir. Malzemeleri çok ince ayrıntısına kadar büyütebilmek ve malzemenin görüntüsü üzerinde değişiklikler yapabilme bu cihazların sahip olduğu özellikler nedeni ile sınırlıdır. Ortaya çıkan bu ihtiyaçtan dolayı optik cihazlar üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda yeni sistemler geliştirilmiştir. Yeni geliştirilen sistemler, yüksek oranda büyütme, çok ince ayrıntılara kadar görme imkanı, üzerinde işlem ve analiz yapabilme gibi yeni özellikler kazanmıştır. Yeni cihazlarda bu özellikler, elektronik ve optik sistemin bir arada kullanılması sonucunda kazanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ilk olarak 1965 yılında kullanılmıştır. Ayrıca bu sistem teknoloji ile paralel olarak gün geçtikçe performans olarak ilerleme kaydetmektedir [76].

SEM; optik kolon, numune odası, görüntü sistemi ve vakum sistemi gibi ana kısımlardan meydana gelmektedir. Elektron demeti gönderen elektron tabancası, optik

kolonun yer aldığı kısımda bulunmaktadır. Anot plakası, elektronları analiz edilecek numuneye daha hızlı göndermek için kullanılır. Yoğunlaştırıcı mercekler, elektron demetinin ince yapıda olması için, objektif merceği ise odaklama yapabilmek için kullanılmaktadır. Objektif mercek için farklı çaplarda apatürler bulunur, ayrıca gönderilen elektron demetinin numune yüzeyini tarayabilmesi için bobinler yer almaktadır. Elektron demeti ve manyetik alanı inceltmek ya da odaklanma yapabilmek için mercek sistemi kullanılmaktadır. Numune ve optik kolon için sıkıştırma değeri yaklaşık  $10^{-4}$  Pa olarak tutulmaktadır. Görüntü sistemi içinde yer alan manyetik bobinler, elektron demeti ile görüntü ekranını aynı anda tarayabilmektedir [69].

Alan emisyonlu gun'dan gelen elektronlar kullanılarak, analiz edilen malzemenin yüzeyine gönderilmesi sonrasında oluşan etkileşimlerden yararlanmak, SEM'in çalışma prensibi olarak açıklanır. SEM'in sahip olduğu enerji yaklaşık olarak 200–300 eV'den 100 keV'a kadar değişebilir. Elektron demeti ilk olarak yoğunlaştırıcı elektromanyetik mercek ile toplandıktan sonra objektif mercek sayesinde odaklanabilmektedir. Odaklanmış halde bulunan elektron demeti, analiz edilecek numune yüzeyinde tarama işlemini manyetik saptırıcı bobinler ile yapmaktadır. Elektron demeti ile analiz edilen numunenin yüzey ile oluşturduğu fiziksel etkileşim sonrasında ortaya çıkan sinyallerin toplanması ve incelenmesi elektron mikroskobunun görüntü oluşturmadaki temel prensiptir. Taramalı elektron mikroskobunda oluşan görüntü, yüksek düzeydeki gerilim ile hızlandırılmış elektronların malzeme üzerinde sabit hale getirilmesi, numunenin tarama anında yüzey kısmında bulunan elektronlar ile elektron atomlarının aralarındaki etkileşim sonucunda oluşan tepkilerin algılayıcılarda birikmesi ve sinyal güçlendirici bölümden aktarıldıktan sonra katot ışınları tüpünün monitöre yansıtılması sonucu oluşmaktadır. Algılayıcı kısımdan gönderilen sinyaller, dijital sinyallere teknolojik sistemler ile çevrilebilir ve bilgisayar ekranına gönderilebilmektedir [77].

Optik mikroskobun yeterli büyüme için yetersiz kaldığı durumlarda SEM ilk başvurulan inceleme yöntemidir. Analiz edilecek olan numune üzerine gönderilen elektron ışınları, numune ile etkileşim içerisinde olmakta ve değişik sinyaller meydana gelmektedir. Uygun sinyal toplayıcıları sayesinde toplanan bu ortaya çıkan sinyaller, görüntü elde edilmesi yanında elementel bilgiler de sunmaktadır [64].

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde; kullanılan malzemeler, özellikleri ve uygulanan deney yöntemleri ve aşamaları verilmektedir.

#### 3.1. MALZEME

Bu çalışmada CEM I 42,5 R tipi Portland çimento (PÇ) bağlayıcı olarak, endüstriyel bir atık olan yüksek fırın cürufu ise mineral katkı olarak kullanılmıştır. PÇ, Bolu Çimento Fabrikası tarafından üretilmiştir. YFC ise yine Bolu Çimento Fabrikasından temin edilmiştir. Harç numune üretimi yapılırken TS EN 196-1'e [78] uygun standart kum ve içilebilir özellikte olan Bolu ili Merkez ilçesi şebeke suyu kullanılmıştır.

#### 3.2. YÖNTEM

Bu bölümde hammaddelerin hazırlanmasına, hammaddelere uygulanan analizlere, deneysel çalışmaların yöntemlerine, çimento hamur ve harçlarının hazırlanmasına ilişkin bilgiler yer almaktadır.

##### 3.2.1. Hammaddelerin ve Numunelerin Hazırlanması

Deney ve analizlerde kullanılmak üzere %0 (referans), %5, %10, %15 ve %20 oranlarında YFC ikameli 5 farklı çimento tipi hazırlanmıştır. Hazırlanan bu çimentolar sırasıyla R, 5YFC, 10YFC, 15YFC ve 20YFC olarak kodlanmıştır.

Çimento hamurlarının su ihtiyaçları, priz süreleri ve genleşme değerlerini belirlemek için 500 gram için belirlenen su miktarı karıştırma kabına koyulduktan sonra çimento ilave edilmiştir. İlk olarak düşük hızda 90 saniye olmak üzere karıştırıcı çalıştırılmıştır. Yaklaşık 90 saniye sonra karıştırıcı durdurulmuş ve numune 15 saniye dinlendirilmiştir. Bu sırada karıştırma kabının kenarlarına ve dibine yapışan hamur, plastik bir kazıyıcı yardımı ile karışım ile birleştirilmiştir. 15 saniyelik dinlenmenin ardından karıştırıcı 90 saniye daha düşük hızla çalıştırılmış ve toplamda 180 saniye olan karıştırma işlemi tamamlanarak çimento hamuru hazırlanmıştır.

Çimento hamurlarının hidrasyon reaksiyonlarının XRD, FT-IR, DTA/TGA ve SEM/EDS ile tayini için ise, referans ve YFC ikameli her bir çimento 10 g ağırlıkta tartılmış ve su/çimento oranı %35 olarak çimento hamurları üretilmiştir. 28. gün sonunda kalıplardan çıkartıldıktan sonra bu numuneler agat havan kullanılarak toz haline getirilmiş ve analizleri yapılmıştır. SEM ve EDS analizi için hazırlanan hamurlar kırılmış ve bu yüzey üzerinden görüntüler alınmıştır.

Çimento harçlarının hazırlanması için kullanılan karışım özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1: PÇ ve YFC Harç Numunelerinin Miktar ve Kodları.

Kod	Çimento, g	Çimento, %	YFC, g	YFC, %	Su, g	Standart kum, g	Su/Çimento Oranı
R	450	100	0	0	225	1350	0,5
5YFC	427,5	95	22,5	5			
10YFC	405	90	45	10			
15YFC	382,5	85	67,5	15			
20YFC	360	80	90	20			

Çimento harçları oluşturulurken 40x40x160 mm boyutlarındaki üç gözlü kalıplar kullanılmıştır. Örnekler hazırlanmadan önce kalıplar iyice temizlenmiş ve karıştırıcı çalışır hale getirilmiştir. Karıştırma kabına, belirlenen miktarlarda önce su, sonra da çimento koyulmuştur. Ardından karıştırıcı düşük hızda (140 dev/dk) çalıştırılmaya başlanmıştır. 30 saniye sonu itibari ile 1350 g kum yine 30 saniye içinde eklenmiştir. Kum ilave edildikten sonra karıştırıcı yüksek hız (285 dev/dk) moduna çıkarılmış ve karıştırma işlemi 30 saniye daha devam etmiştir. Karıştırıcı 180 saniyelik süreyi tamamladıktan sonra durdurulmuştur. Karıştırma sırasında kabın etrafına ve dibine yapışmış olan harçlar bir sıyrıcı yardımı ile kabın ortasında toplanmıştır. Daha sonra karıştırıcı tekrar çalışmaya yüksek hızda devam etmiştir ve 60 saniye daha çalıştıktan sonra durdurulmuştur. Hazır olan harç kalıplara iki tabaka olacak şekilde yerleştirilmiştir. İlk tabaka yerleştirilmesinin ardından sarsma tablasında sabitlenen kalıba 60 kere sarsma işlemi yapılmıştır. Aynı yöntemle ikinci tabakaya da sarsma işlemi uygulanmış ve sıkıştırılmıştır. Sarsma işlemleri sonrasında kalıpta bulunan harç fazlalıkları master yardımı ile enine testere yöntemi ile temizlenmiştir. Küre tabi tutulmaya hazır olan kalıpların üstü cam ile kapatılmış ve sıcaklığı  $20\pm 1$  °C, bağıl nemi %90 olan çimento kür kabinine koyulmuştur. Burada 24 saat bekletilen numuneler, bu

süre sonunda kür kabininden alınarak  $20\pm 1$  °C sıcaklıktaki kür havuzuna yerleştirilmiştir.

### **3.2.2. Deneysel çalışmalar**

#### *3.2.2.1. Tane Boyut Analizi*

Referans çimento ve YFC için tane boyut analizinin belirlenmesi, TS EN 196-6 [79] standardına göre Bolu Çimento Fabrikasında gerçekleştirilmiştir. 0,1 g hassasiyete sahip teraziye çimento ve pirinç kabuğu külü ayrı ayrı olarak 10 g tartılmıştır ve 2 dakika boyunca 45 ve 90 µm eleklerden (emiş gücü 2000 Pa) elenmiştir.

#### *3.2.2.2. Özgül Yüzey Alanı Analizi*

TS EN 196-6 standardına uygun olarak özgül yüzey alanı tayini deneyi gerçekleştirilmiştir. Numune miktarı standarda uygun olarak belirlendikten sonra etüvde kurutulmuştur. Numunelerin özgül yüzey alanı değerleri Bolu Çimento Fabrikasında ASTEK marka otomatik Blaine cihazı kullanılarak belirlenmiştir [79].

#### *3.2.2.3. Özgül Ağırlık Analizi*

Özgül ağırlık deneyi Bolu Çimento Fabrikasında Quantachrome/MVP-3 marka ve modele sahip cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

#### *3.2.2.4. Kimyasal Analizler*

TS EN 196-2 standardına uygun olarak Bolu Çimento Fabrikası laboratuvarında çimento ve YFC için kimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Kimyasal analizler için Thermo marka ARL 9900 model XRF cihaz kullanılmıştır [81].

#### *3.2.2.5. Molekül Yapı Analizleri*

Referans ve YFC ikameli çimentoların molekül yapılarını belirlemek için hidratasyona tabi tutularak 28. gün sonunda FT-IR (Shimadzu marka IRPrestige 21 model cihaz) analizi yapılmıştır. Ölçümler Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBİT) laboratuvarlarında ATR cihazı ile  $400-4000\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir.

#### *3.2.2.6. Mineralojik Analizler*

Referans ve YFC ikameli çimentoların mineralojik analizlerini belirlemek adına hidratasyona tabi tutularak 28. gün sonunda X-Işını Kırınım cihazı ile (Rigaku Ultima-IV) Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezi laboratuvarlarında

gerçekleştirilmiştir.

#### *3.2.2.7. Mikro Yapı Analizleri*

Referans ve YFC ikameli çimentolar mikro yapı analizleri 28. gün sonunda DÜBİT laboratuvarında SEM (FEI marka Quanta FEG 250 model) cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

#### *3.2.2.8. Termal Analizler*

Referans ve YFC ikameli çimentoların termal analizleri 28. gün sonunda DÜBİT laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Termal gravimetri analiz (TGA) 25°C/dk ısıtma süresi ile 1000 °C sıcaklığa ayarlanarak yapılmıştır. Analizler, azot gazı ile 25-40 mg'lık numuneler kullanılarak yapılmıştır. DTA/TGA için Shimadzu (DTG 60H-DSC 60) marka cihaz kullanılmıştır.

#### *3.2.2.9. Standart Kıvam Analizi*

Standart kıvam tayini TS EN 196-3 standardına uygun olarak Bolu Çimento Fabrikasında gerçekleştirilmiştir. Hazır halde bulunan hamur cam levha üzerindeki yağlanmış vicat halkasına yerleştirilmiştir. Kalıp üzerinde fazlalık olan çimento hamuru bir spatula yardımı ile alınmıştır. Kalıp ve taban plakasının sondanın tam altındaki merkezde olmasına dikkat edilmiştir. Sonda yavaş bir şekilde hamur üstüne kadar indirilmiştir. Daha sonra ağırlığı ile serbest düşüş yapan sonda, hamurun içerisine batmıştır. Bu süreç sonunda sonda ucu ile taban plaka arası okunmuş ve notu alınmıştır. Her batırma işlemi sonrasında sonda temizlenmiştir. Kıvam için gerekli olan su miktarı sonda ile cam levha arasındaki mesafe  $6\pm 2$  mm olana kadar artırılmış veya eksiltilmiş ve bu aralıktaki su miktarı su ihtiyacı olarak kaydedilmiştir.

#### *3.2.2.10. Priz Süresi Analizi*

TS EN 196-3 standardına uygun olarak Bolu Çimento Fabrikası laboratuvarında priz başlama ve sonu süreleri tespit edilmiştir [80].

İlk olarak Vicat aleti fazla olmamak sureti ile yağlanmış ve göstergesi sıfır olarak ayarlanmıştır. Daha sonra hiç bir sıkıştırma işlemi yapılmadan çimento hamuru vicat halkasına yerleştirilmiştir. Kalıp üzerinde fazlalık olan çimento hamuru bir spatula yardımı ile alınmıştır. Kalıp ve taban plakası iğnenin tam altındaki merkezde olmasına dikkat edilmiştir. İğne hamura değinceye dek yavaş bir şekilde indirilmiştir. Öncelikle hareket halinde olan parçaların hızlı bir biçimde çimento hamuruna inmesini önlemek adına iğne birkaç saniye boyunca bekletildikten sonra serbest bırakılarak kendi öz

ağırlığı ile birlikte çimento hamuruna girmesi sağlanmıştır. İğnenin batma işlemini tamamladığı gözlemlendikten 30 saniye sonra göstergeden değer okuması yapılmış ve not edilmiştir. Her batma işleminden sonra iğne özenle temizlenmiştir.

Aynı numune üzerinde tekrar deney yapılırken, numunenin farklı noktalarına batırılmak şartıyla ve daha önce batırılan yerler ile arasında ki mesafe en az 1 cm olacak bir biçimde ve her deney arasında 10 dakika olacak şekilde tekrarlanmaktadır. Deney başladığı anda not edilen süre ile iğne ve taban plakası arasında okuma alınan değer yaklaşık  $6\pm 3$  cm olduğu zamana kadar geçen süre arasında kalan süre, 5 dakika katları olacak şekilde priz başlangıç süresi olarak not edilmiştir.

Priz başlangıç süresi tespit edildikten sonra içinde numune bulunan vicat halkası ters çevrilmiştir. Kalıp tabanı ile temas eden numune yüzeyi bu şekilde üste getirilmiş ve priz sona erme deneyi yapılmıştır. Vicat iğnesi bağlantı halkası ile tutturularak, küçük batmalar daha net ve doğru bir biçimde gözlemlenmiştir. Priz sona erme süresi belirlenirken priz başlangıç süresindeki yöntem uygulanmıştır fakat batırma işlemleri arasındaki süre 30 dakika olarak yapılmıştır. Priz sona erme süresi, priz başlama süresi tayin edildiği an ile iğnenin ilk defa 0,5 mm kadar hamura girdiği zamana kadar geçen sürenin en yakın 5 dakikaya yuvarlanması olarak not edilmiştir.

### *3.2.2.11. Hacim Genleşme Analizi*

TS EN 196-3 standardına göre hacim genleşme deneyi Bolu Çimento Fabrikası laboratuvarında yapılmıştır [80].

Deneyde kullanılan Le Chatelier aleti 3 cm çapında kesik bir silindire sahiptir ve 15 cm uzunluğunda 2 adet çubuktan oluşmaktadır. Deneyler için her çimentoya ait 2 adet numune hazırlanmıştır.

Deneye başlamadan önce 2 adet Le Chatelier aleti ve cam malzemeler, ince bir yağ sürülerek yağlanmış ve kalıplar cam levha üzerine yerleştirilmiştir. Silindirin sahip olduğu kesik kısmın numune koyulduğu sırada açılmaması için kesik kısım, bir pul yardımı ile bağlanmıştır. Le Chatelier aletinin içine numune koyarken sıkıştırma işlemi yapılmadan koyulmasına dikkat edilmiştir. Numune koyulduktan sonra oluşan fazlalık, bir spatula yardımı ile düzeltilmiştir. Düzeltme işleminden sonra aletin üstüne cam levha koyulmuştur ve  $24\pm 0,5$  saat boyunca  $20\pm 1$  °C ve bağıl nemi en az %90 olan rutubet odasında bekletilmiştir. Pullar  $24\pm 0,5$  saat sonunda çözülmüştür ve çubuklar arasında oluşan açıklık tespit edilmiş ve not edilmiştir. Bir sonraki ölçüm için ise alet

kaynatma suyuna bırakılmadan önce cam levha alınmış ve çubuklar yukarıda olacak şekilde kaynatma suyunun içine bırakılmıştır. 30 dakika içerisinde kalıpların içinde olduğu su ile dolu kaynatma kabı kaynama sıcaklığına ulaştıktan sonra 3 saat bekletilmiş ve çubuklar arasındaki mesafe ölçülüp not edilmiştir. Üçüncü ve son ölçüm için numune kalıpları kaynatma kabı içerisinden alınarak laboratuvar ortamında  $20\pm 1$  °C sıcaklıkta soğumaya bırakıldıktan sonra çubuklar arasındaki mesafe ölçülüp not edilmiştir. Üçüncü ölçüm sonunda bulunan değer ile birinci ölçüm sonunda bulunan değerler arasındaki fark, hacim genişmesi olarak en yakın 0,5 mm'ye yuvarlatılarak kaydedilmiştir.

#### *3.2.2.12. Basınç Dayanımı Analizi*

TS EN 196-1 standardına uygun olarak Bolu Çimento Fabrikası laboratuvarında Atom Teknik marka cihaz kullanılarak çimento harç örneklerine basınç dayanım deneyi uygulanmıştır [78].

Numuneler deney yapılmadan en geç 15 dakika önce sudan çıkartılmıştır ve deney anına kadar nemli beze sarılmış bir şekilde tutulmuştur. Her bir prizma numune için  $50\pm 10$  N/s kuvvet uygulanmış ve numune ortadan kırılıncaya dek kuvvet artırımı yapılmıştır. Numune kırıldıktan sonra iki parça numune basınç dayanımı deneyi için muhafaza edilmiştir. Basınç dayanımı sırasında numune, cihazın plakalarından 10 mm taşacak şekilde koyulmuştur.  $2400\pm 200$  N/s hıza sahip kuvvet uygulanarak deney başlatılmış ve numune kırılıncaya dek kuvvet artırımı yapılmıştır. Kırılma yükü değerleri kullanılarak basınç dayanımı değerleri hesaplanmıştır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

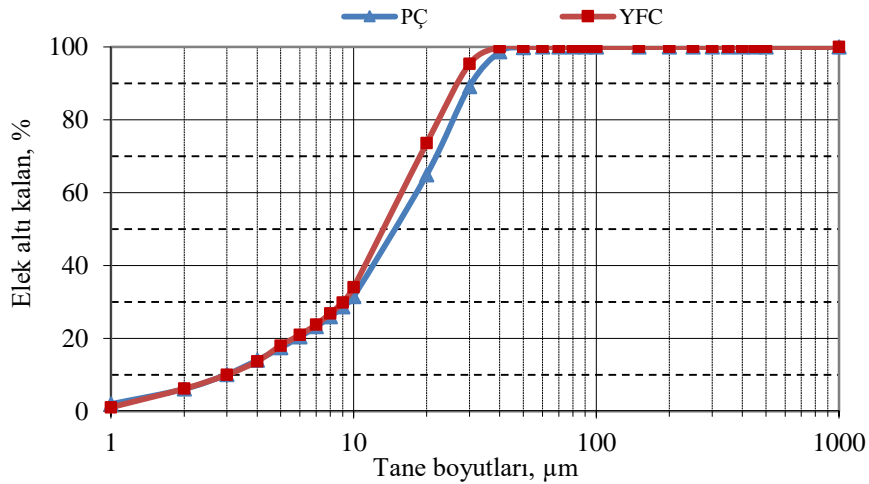
Dördüncü bölümün ilk etabında, çalışmada kullanılan hammaddelerin fiziksel ve kimyasal açıdan özellikleri ile molekül ve mineralojik yapıları belirlenmiştir. İkinci etabında, referans ve YFC ikameli çimento hamurlarına uygulanan deney ve analizlerle hidrasyon reaksiyonları tespit edilmiştir. Üçüncü etapta ise çimento harçlarının basınç dayanımı belirlenmiştir.

### 4.1. MALZEMELERE UYGULANAN ANALİZLER

PÇ ve YFC için uygulanan analiz sonuçlarını gösteren çizelge ve şekiller bu bölümün ilgili kısımlarında verilmiştir.

#### 4.1.1. Fiziksel Analizler

PÇ ve YFC'ye ait tane boyut dağılımı Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1: PÇ ve YFC'nin tane boyut dağılımları.

Elde edilen analiz sonuçlarına göre YFC'nin PÇ'ye kıyasla tane boyutu açısından daha ince olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.1). PÇ ve YFC'nin %90 elek altındaki oranlara göre sırasıyla 30 ve 27 µm, %50 elek altındaki oranlara göre 16 ve 14 µm boyutlarda olduğu görülmektedir. Elde edilen veriler, YFC'nin puzolanik özellik gösterebilmesi için yeterince küçük tane yapısına sahip olduğunu göstermektedir.

PÇ ve YFC'ye ait fiziksel özellikler Çizelge 4.1'de görülmektedir.

Çizelge 4.1: PÇ ve YFC'nin Fiziksel Özellikleri.

Malzemeler	Boyut aralığı (elek üstü), %		Özgül ağırlık	Özgül yüzey alanı (Blaine), cm <sup>2</sup> /g
	>45 µm	>90 µm		
PÇ	3,6	0,3	3,17	3882
YFC	0,1	0	2,85	5295

Elek analizi sonuçlarına göre YFC'nin, PÇ'ye göre nispeten daha küçük tane yapısında olduğu izlenmektedir. Ayrıca YFC'nin ASTM C 989 standardında belirtilen 45 µm elek bakiyesi olarak verilen maksimum %20 sınır değerini sağladığı belirlenmiştir [12]. PÇ'nin özgül ağırlığı 3,17, Blaine değeri ise 3882 cm<sup>2</sup>/g iken, YFC'nin özgül ağırlığı 2,85 g/cm<sup>3</sup>, Blaine değeri ise 5295 cm<sup>2</sup>/g dir (Çizelge 4.1). Bu verilere göre, daha düşük özgül ağırlıklı ve daha yüksek Blaine değerine sahip YFC ikameli çimentolar elde edilebileceği ifade edilebilir.

#### 4.1.2. Kimyasal Analizler

PÇ ve YFC'nin kimyasal kompozisyonları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2: PÇ ve YFC'nin Kimyasal Kompozisyonları.

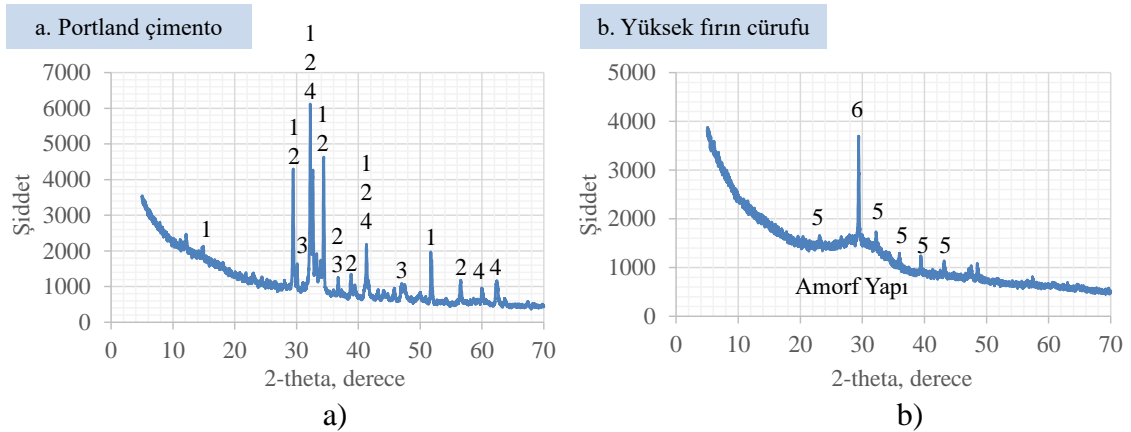
Sembol	Oksit	PÇ	TS EN 197-1	YFC	BS 6699
S	SiO <sub>2</sub>	19,8	-	41,08	-
A	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,38	-	10,08	-
F	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,35	-	0,97	-
C	CaO	63,39	-	34,64	-
M	MgO	1,35	< %5,0	6,16	< %13,0
- S	SO <sub>3</sub>	2,79	< %3,5	0,83	< %2,5
N	Na <sub>2</sub> O	0,18	-	0,52	-
K	KO	0,64	-	0,97	-
	Cl <sup>-</sup>	2,79	< %0,1	0,83	< %0,1
	Kızdırma kaybı (C+ M)/ S	2,67	< %5,0	1,16	< %3,0
	Çözünmeyen Kalıntı	1,08	-	0,993	> 1
	Serbest CaO	0,86	-	-	-

Çizelge 4.2'de görüldüğü üzere PÇ'nin kimyasal yapısı (MgO, SO<sub>3</sub>, Cl<sup>-</sup> ve kızdırma kaybı) TS EN 197-1'de belirtilen sınırlar içerisindedir [21]. YFC SiO<sub>2</sub>, CaO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

ana bileşenlerinden oluşmaktadır. Ağırlıkça  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (S/A) oranı 2,54'tür. YFC'nin hidrolik özelliklerinin belirlenmesindeki önemli parametrelerden birisi olan kimyasal kompozisyonundaki (C+M)/S oranının 0,993 oranı ile minimum 1 olan sınır değerine çok yakın olduğu, (C+M+A)/S oranının 1,239, yani 1'den büyük olması, YFC'nin tercih edilen hidrolik modül sınırları içerisinde olduğunu göstermektedir [12]. Ayrıca YFC'nin kimyasal yapısı ( $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Cl}^-$  ve kızdırma kaybı değerleri) BS 6699 standardındaki sınır değerleri içinde olduğu ve dolayısı ile dayanım ve dayanıklılığa olumsuz bir etkisinin olmayacağı düşünülmektedir (Çizelge 4.2) [12].

#### 4.1.3. XRD Analizleri

PÇ ve YFC'nin mineralojik yapısını belirlemek için gerçekleştirilen XRD sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2: a) PÇ ve b) YFC'nin XRD analizleri.

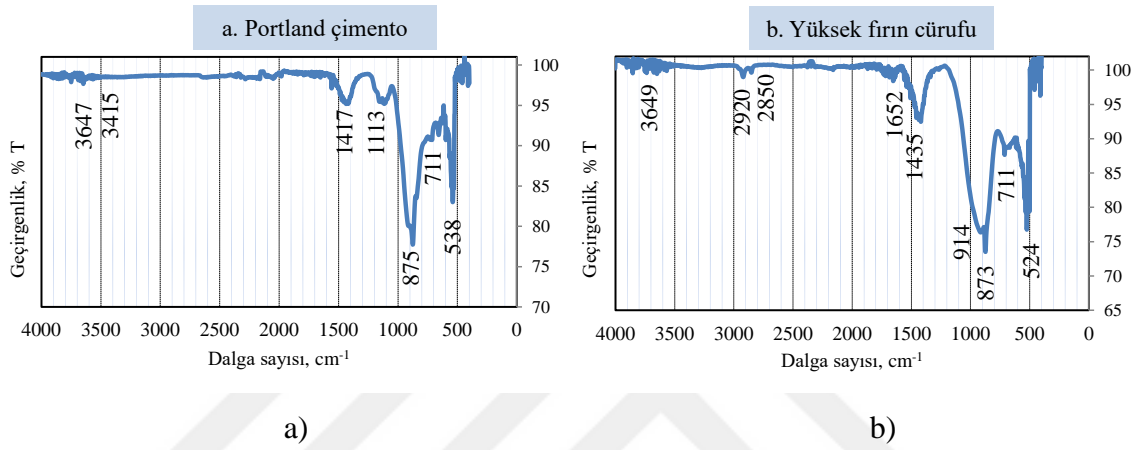
[1:  $\text{C}_3\text{S}$ -Alit ( $3\text{CaOSiO}_3$ ), 2:  $\text{C}_2\text{S}$ -Belit ( $2\text{CaOSiO}_3$ ), 3:  $\text{C}_3\text{A}$ -Triksiyum alüminat ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), 4:  $\text{C}_4\text{AF}$ -Tetrakalsiyum alüminaferrit ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), 5: Anhidrit ( $\text{CaSO}_3$ ), 6: Gehlenite ( $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$ )]

PÇ'nin XRD analizinde ana bileşen olarak alit, belit, triksiyum alüminat ve tetrakalsiyum alüminaferrit tespit edilmiş olup, çimentosunun XRD desenin tipik bir PÇ'ye uygun kristallenmiş yapıda olduğu görülmektedir (Şekil 4.2-a) [83, 84]. YFC'nin XRD analizinde en belirgin piklerin gehlenit ve anhidrit olduğu izlenmekte olup Çizelge 4.2'deki kimyasal bileşime uygun oksit ve bileşiklere rastlanmıştır. Aynı zamanda YFC'nin camsı fazının  $2\theta$ 'nın 20-38 derece arasında maksimum duruma geldiği ve  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  den oluşan amorf (düzensiz) yapı şeklinde kendini gösterdiği izlenmektedir (Şekil 4.2-b) [12, 85, 86]. Camsı faz miktarı YFC'nin hidrolik özelliklerini belirleyici en önemli unsurlardan birisi olup, camsı faz miktarıyla dayanım

arasında, kabaca da olsa doğrusal bir ilişkinin olabileceği belirtilmektedir [12].

#### 4.1.4. Moleküler Analizler

Malzemelerin taneciklerindeki molekül gruplarının tanımlanması için fourier dönüşümleri kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) tekniği kullanılmaktadır. Çimento ve mineral katkıları ile ilgili çalışmalar için infrared spektrumu temel olarak Si-Al, S, C ve OH olarak dört geniş band bölgesinde ele alınmakta ve buna göre yorumlanmaktadır [85]. Çalışmadaki malzemeler için elde edilen veriler Şekil 4.3’de görülmektedir.



Şekil 4.3: a) PÇ ve b) YFC'nin FT-IR spektroskopisi.

Şekil 4.3’de pikler incelendiğinde, 500-1600 cm<sup>-1</sup> bölgesinde katı kafesleri oluşturan atomların titreşimleri, 1600-3000 cm<sup>-1</sup> bölgesinde molekül titreşimleri gözlemlenebilir.

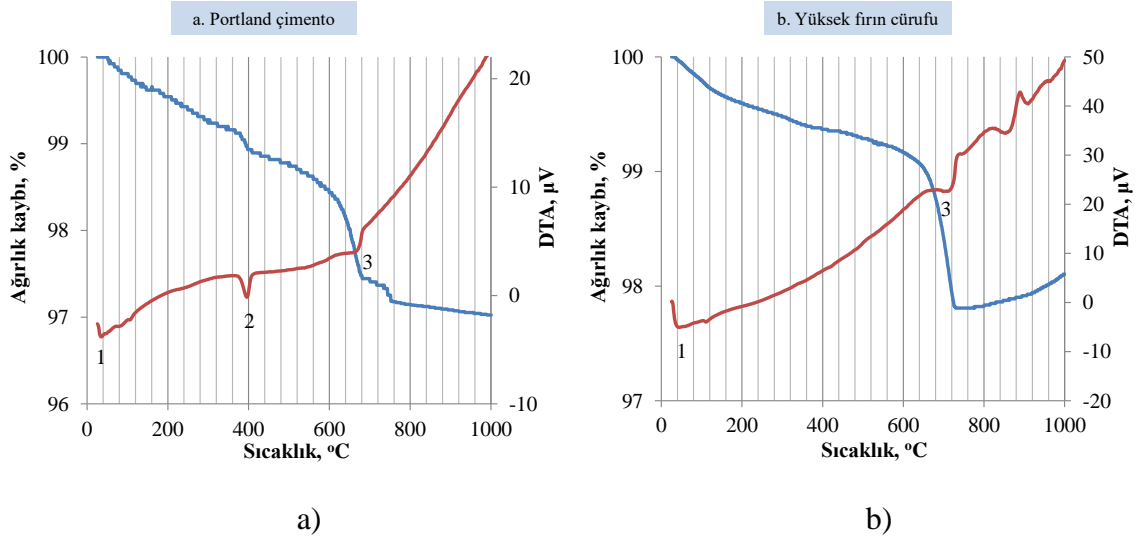
PÇ’nin FT-IR analizine göre 538, 711, 875, 1113, 1417, 3415 ve 3647 cm<sup>-1</sup> dalga sayılarında titreşim piklerine sahip olduğu izlenmektedir. Buna göre, 538 cm<sup>-1</sup> dalga sayısında Si-O ile birlikte Al-O bağları, 875 cm<sup>-1</sup> dalga sayısında Si-O bağı titreşim piki şeklinde görülmektedir. PÇ’de alçıyı belirten S-O (kükürt-oksijen) bağları 711 ve 1113 cm<sup>-1</sup>, C-O bağları ise 1417 cm<sup>-1</sup> dalga sayılarında izlenmektedir. Su moleküllerinin yer aldığı 3400-3600 cm<sup>-1</sup> dalga sayıları aralığındaki belirgin bir pik vermediği, yapısındaki su iyonları ve moleküllerine ait titreşim pikleri ise 3400 ve 1645 cm<sup>-1</sup> dalga sayılarında izlenmektedir (Şekil 4.3-a) [68, 87].

YFC’nin FT-IR analizine göre 542, 711, 873, 914 ve 1435 cm<sup>-1</sup> dalga sayılarında titreşim pikleri görülmektedir. Buna göre Si-O-Si bağları 524 cm<sup>-1</sup>, Si-O ile birlikte bulunan Al-O bağları 711 cm<sup>-1</sup> ve Si-O bağları 914 cm<sup>-1</sup> dalga sayılarında titreşim piki şeklinde izlenmektedir. 2920 cm<sup>-1</sup> ve 2850 cm<sup>-1</sup>’de görülen zayıf 2 pik, YFC’nin kalsitindeki karbon harmoniklerine bağlanır. 1435 cm<sup>-1</sup> dalga sayısında titreşim pikleri CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> molekülünün C-O asimetrik gerilme titreşimine atfedilen bu pikin, atmosfere maruz kalan cürufun karbonatlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 1037 cm<sup>-1</sup>

<sup>1</sup>'deki absorpsiyon zirveleri, Si-O gerilme titreşim bantlarının varlığını gösterirken, Si-O-Si bükülme titreşim bantları 693 cm<sup>-1</sup>'de gözlemlenmiştir. 873 cm<sup>-1</sup>'deki absorpsiyon bantları, cürufta bulunan AlO<sub>4</sub> gruplarının asimetrik gerilme titreşimine karşılık gelmektedir (Şekil 4.3-b) [89, 90]. Su moleküllerinin yer aldığı 3400-3600 cm<sup>-1</sup> dalga sayıları aralığında YFC'nin yine PÇ gibi belirgin bir pik vermediği izlenmektedir.

#### 4.1.5. Termal Analizler

Fark esaslı termal analiz (DTA) ile termal gravimetri analizleri (TGA) eş zamanlı olarak tek bir numune üzerine uygulanmış ve elde edilen veriler Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4: a) PÇ ve b) YFC'nin DTA/TGA Analizleri.

[1: Alçıtaşı ve bünyesindeki nem, 2: Portlandit, 3: Karbonat fazları]

DTA, zeolitler, karbonatlar, kil mineralleri, sülfatlar gibi mineraller için yapılan tanımlanmalarda kullanılmaktadır. Ayrıca yine bu teknikle çimentonun ana bileşenlerinin hidrasyon esnasında ısı etkisiyle gerçekleşmekte olan dönüşümler de belirlenebilmektedir. DTA sayesinde reaktif olmayan ve reaktif numuneyle aralarındaki ısı farkları (°C) zamanın fonksiyonu olarak belirlenmekte, ayrıca tepkimenin sıcaklığı, kinetiği ve termodinamiğiyle ilgili dikkate değer bilgiler sağlanabilmektedir. TGA sayesinde ise, gaz adsorpsiyonu veya ayrılmasıyla yoğun faz oluşumları veya ağırlık kayıpları belirlenebilmektedir [62]. PÇ'nin DTA/TGA analizlerine göre çimento üretiminde priz düzenleyici olarak kullanılan alçıtaşından (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) ve bünyesindeki nemden kaynaklanan ağırlık kaybı %0,3 (1:25-200 °C), küçük miktarda bulunan portlanditin ağırlık kaybı %0,2 (2:400-500 °C) ve depolama sırasında çimentonun atmosferik hava ile reaksiyonu sonucunda oluşan amorf yapıda kalsit

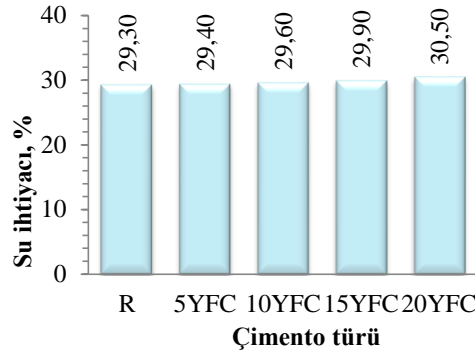
kaynaklı ( $\text{CaCO}_3$ ) karbonat fazlarının ağırlık kaybı ise %1 (3:500-750 °C) olarak belirlenmiştir (Şekil 4.4-a). YFC'nin analizine göre ise bünyesindeki nemden kaynaklı ağırlık kaybı %0,2 (1:25-200 °C) ve depolama sırasında atmosferik hava ile reaksiyonu sonucunda oluşan karbonat fazlarının ağırlık kaybı ise %1,2 (3:500-750 °C) olarak belirlenmiştir (Şekil 4.4-b) [90]. Toplam ağırlık kayıpları ise PÇ'de %2,9, YFC de ise %1,9 olarak belirlenmiştir.

## 4.2. ÇİMENTO HAMURU ÖRNEKLERİNE UYGULANAN DENEYLER

Bu bölümde TS EN-196-3'e [80] göre yapılan su ihtiyacı, priz süreleri ve genleşme deneyleriyle ilgili çizelge ve şekillerin verilmesinin ardından, çimento hamurlarının hidrasyon gelişimlerinin izlenebildiği XRD, FT-IR, DTA/TGA ve SEM teknikleriyle elde edilen veriler ilgili bölümlerde sunulmuştur.

### 4.2.1. Su İhtiyacı Deneyi Sonuçları

Çimento hamurlarının su ihtiyacı Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

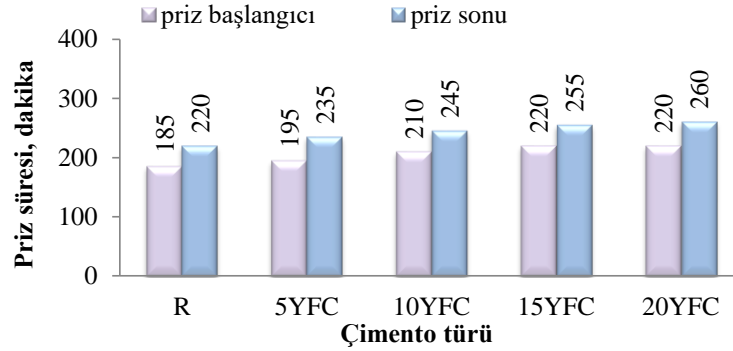


Şekil 4.5: Çimento hamurlarının su ihtiyaçları.

Su ihtiyacını belirlemek için yapılan deney verilerine göre; 5YFC, 10YFC, 15YFC, 20YFC kodlu çimento hamurlarında referans çimento hamuruna göre su ihtiyaçları sırasıyla %0,3, %1,0, %2,0 ve %4,1 oranında artmıştır (Şekil 4.5). Deneylerden elde edilen verilere göre YFC ikamesi ile üretilen çimento hamurlarının su ihtiyaçları, YFC ikamesine bağlı olarak nispeten bir artış gösterse de bu durumun önemli bir etki yaratmadığı düşünülmektedir.

#### 4.2.2. Priz Süreleri Deneyi Sonuçları

Çimento hamurlarının priz süreleri Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

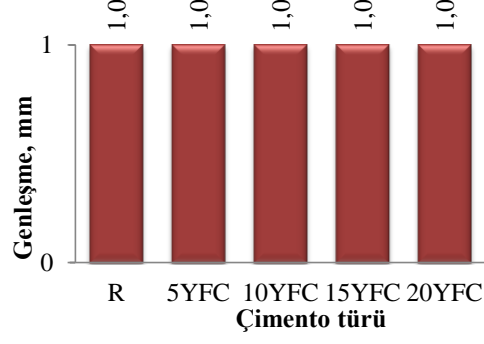


Şekil 4.6: Çimento hamurlarının priz süreleri.

Şekil 4.6’da görülen priz başlama süreleri içerisinde en küçük sürenin 185 dakikayla R kodlu hamurda, en büyük sürenin 260 dakikayla 20YFC kodlu hamurda olduğu tespit edilmiştir. PÇ ile hazırlanan çimento hamurlarına göre, priz başlama sürelerinin 5YFC, 10YFC, 15YFC ve 20YFC kodlu çimento hamurlarında sırasıyla %5,4, %13,5, %18,9 ve %18,9 oranında arttığı belirlenmiştir. Priz sonu sürelerinde de yine en küçük 220 dakikayla R kodlu hamurda, en büyük sürenin 260 dakikayla 20YFC kodlu çimento hamurunda olduğu izlenmektedir. PÇ ile hazırlanan çimento hamurlarına göre, 5YFC, 10YFC, 15YFC ve 20YFC kodlu çimento hamurlarında sırasıyla %6,8, %11,4, %15,9 ve %18,2 oranında gerçekleşmiştir (Şekil 4.6). Elde edilen verilere göre çimento hamurlarının tümünde priz başlama süreleri için, 42,5 MPa dayanım sınıfında en küçük süre olarak belirtilen 60 dakikanın ve 32,5 MPa dayanım sınıfında en küçük süre olarak belirtilen 75 dakikanın üstünde olduğu belirlenmiştir [21]. Bu durumda tespit edilen Priz sürelerinin standartta belirtilen değerler içerisinde olması, işlenebilirlik açısından herhangi bir sorunla karşılaşılmayacağı, dayanımın istenen zaman aralığında sağlanacağı, kalıp sökme sürelerinin ve işlemlerinin herhangi bir soruna neden olmadan gerçekleşebileceği ve betonun özellikle yaz aylarında negatif etkilenmeyeceği ifade edilebilir.

#### 4.2.3. Genleşme Deneyi Sonuçları

PÇ ve YFC ikameli çimento hamurlarının Le Chatelier deneyi ile belirlenen genleşme değerleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7: Çimento hamurlarının genleşme değerleri.

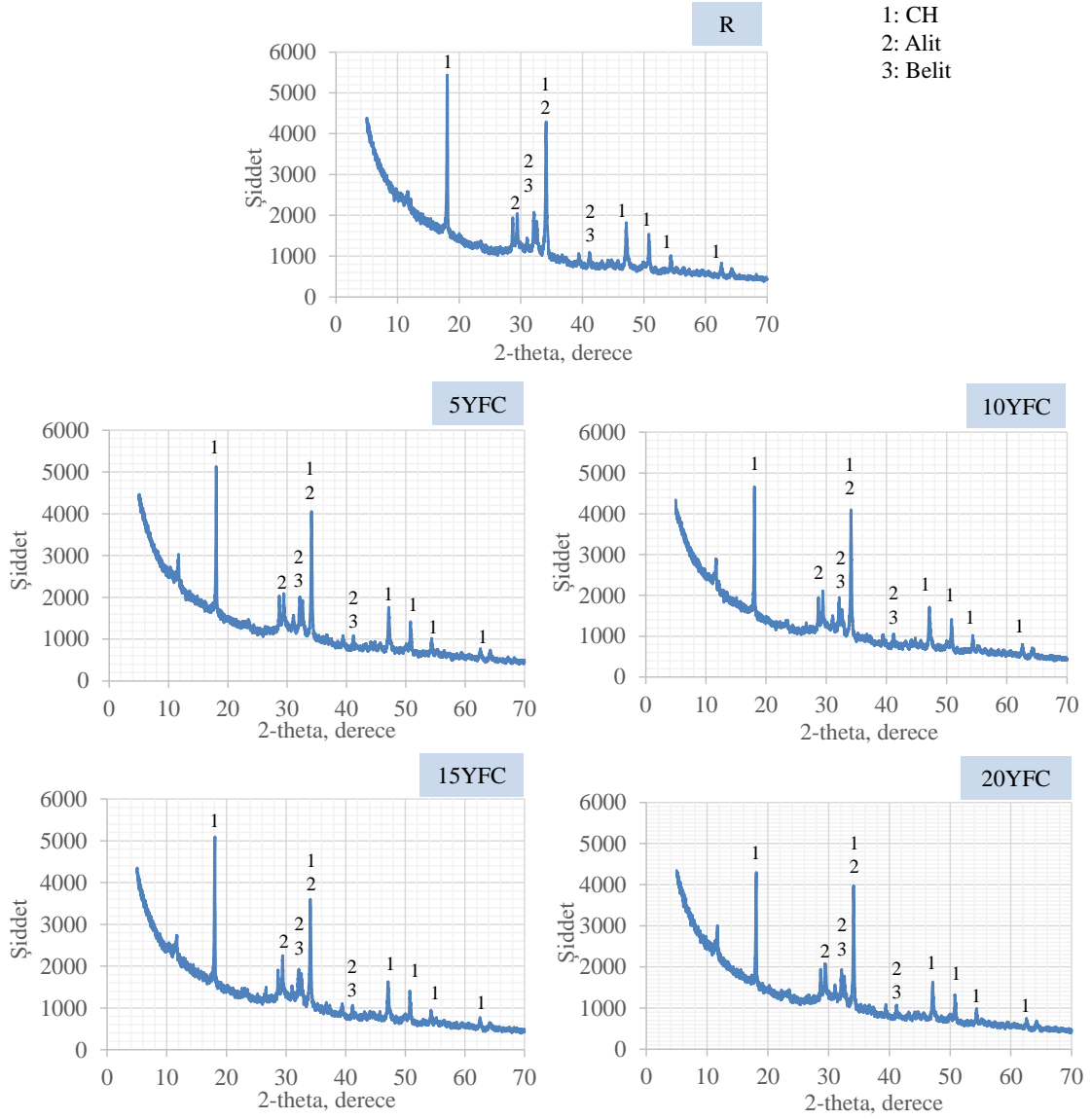
Çimentonun kimyasal yapısındaki MgO ve CaO içeriğinin fazla olduğu durumlarda genleşme meydana gelebilmekte ve bu nedenle de betonda çeşitli düzeylerde hasarlar oluşturabilmektedir. Elde edilen verilere göre tüm çimento hamurlarında genleşme değerleri 1 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.7). Genleşme değerlerin, TS EN 197-1'deki 10 mm olarak belirtilen en büyük değerden küçük olduğu için bir soruna neden olmayacağı ifade edilebilir [21].

#### 4.2.4. Hidratasyon Gelişimleri

Bu bölümde yer alan tüm çimento hamurlarının hidratasyon gelişimleri XRD, DTA/TGA, FT-IR ve SEM teknikleriyle 28. günde izlenmiş olup, elde edilen veriler ilgili şekillerde gösterilmiştir.

##### 4.2.4.1. XRD analizi ile hidratasyon gelişimleri

Çimento hamurlarının faz gelişimlerini incelemek için yapılan XRD analiz sonuçları Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



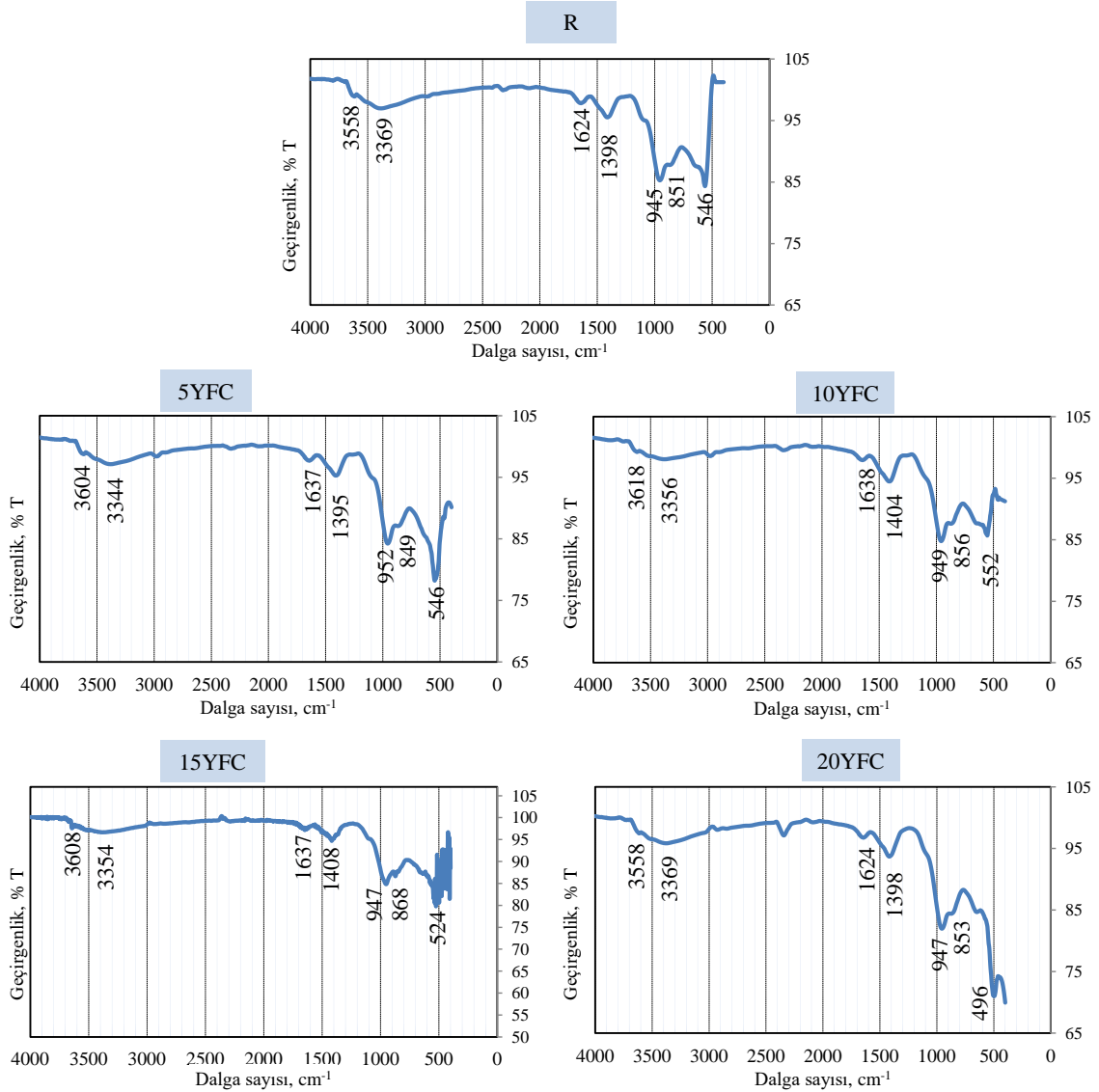
Şekil 4.8: Çimento hamurlarının XRD analizleri.

Şekil 4.8’de, hidrasyon sonucunda yapının portlandit ( $\text{CH}-(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ ) ve hidrate olmamış klinker minerallerinden (alit ( $3\text{CaOSiO}_3$ )) ve (belit ( $2\text{CaOSiO}_3$ )) oluştuğu görülmektedir [91]. Amorf yapısı nedeniyle, XRD analizlerinde kalsiyum silikat hidrat jelinin kırınım bağlarına rastlanamamaktadır. Yine YFC’nin de amorf  $\text{SiO}_2$  içeriğine benzer şekilde rastlanamamaktadır. Elde edilen verilere göre CH’in bütün hamurlarda ana hidrasyon ürünü olduğu ve açıkça tanımlandığı görülmektedir. Ayrıca YFC ikame oranı arttıkça portlandit pik yoğunlukları kademeli olarak azalmaktadır. Bu durum, YFC’nin puzolanik özelliğinden dolayı portlandit ile reaksiyona girdiğini ve çimento benzeri hidratlı ürünlerin oluşumuna katkı sağlayan puzolanik bir malzeme olduğu doğrulanmaktadır Dolayısı ile YFC’nin puzolanik reaksiyon göstererek ileriki yaşlarda

basınç dayanımına katkı sağlayabilecek bir yapıda olduğu söylenebilir [91, 92-94].

#### 4.2.4.2. FT-IR analizi ile hidrasyon gelişimleri

Çimento hamurlarının kafes ve molekül yapılarına ait FT-IR grafikleri Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Referans ve YFC ikameli çimento hamurlarının FT-IR spektrumları.

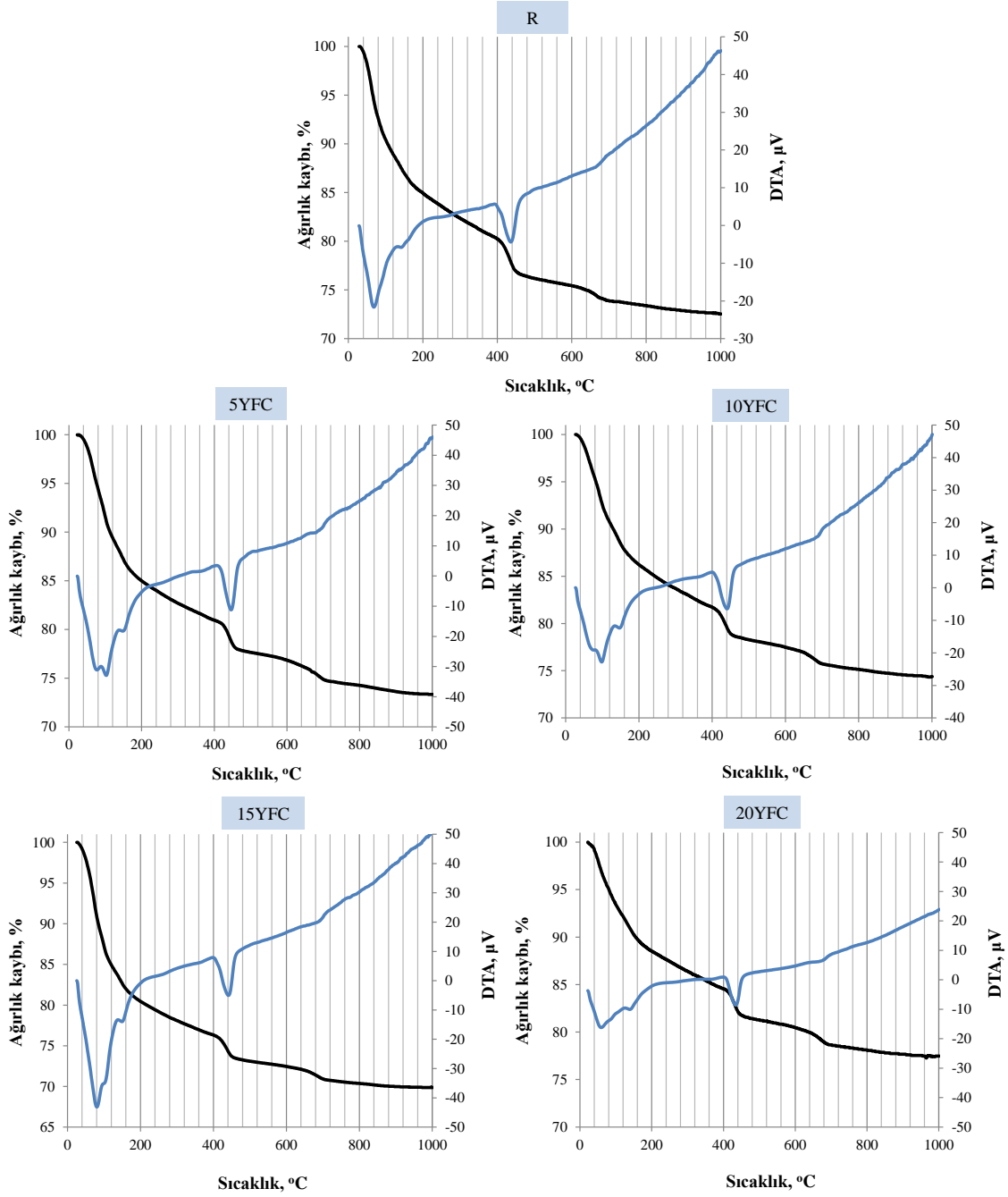
FT-IR tekniği ile elde edilen piklerin şiddetleri ve değerleri dikkate alındığında 3558-3618 cm⁻¹ aralığındaki bölgeler, bağlanmış ve absorbe edilmiş su ile C-S-H'nin kalsiyum hidroksit bağlarını göstermektedir. 3344-3369 ve 1624-1638 cm⁻¹ aralığındaki bölgeler yapıya tutunmamış suyu ifade etmektedir [95, 96]. Portlandit'in karbonasyonu kaynaklı karbonat fazları (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) 1395-1408 cm⁻¹, 849-868 cm⁻¹ aralığındaki bölgelerde izlenmektedir [75, 96, 97]. Bunun yanı sıra hidrate olmamış CS'ler 496-552 cm⁻¹ ve

hidrate olmuş CS'ler, 945-952  $\text{cm}^{-1}$  aralığındaki bölgelerde belirginleşmektedirler [96]. 2800-3700  $\text{cm}^{-1}$  aralığındaki bölgelerdeki geniş absorpsiyon bandları  $\text{CaCO}_3$ 'ün varlığını belirtmektedir (Şekil 4.9) [96]. Bu verilerden Referans ve YFC ikameli çimento hamurlarındaki CH piklerinin, XRD analizlerindeki sonuçlar ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

#### 4.2.4.3. DTA/TGA analizi ile hidrasyon gelişimleri

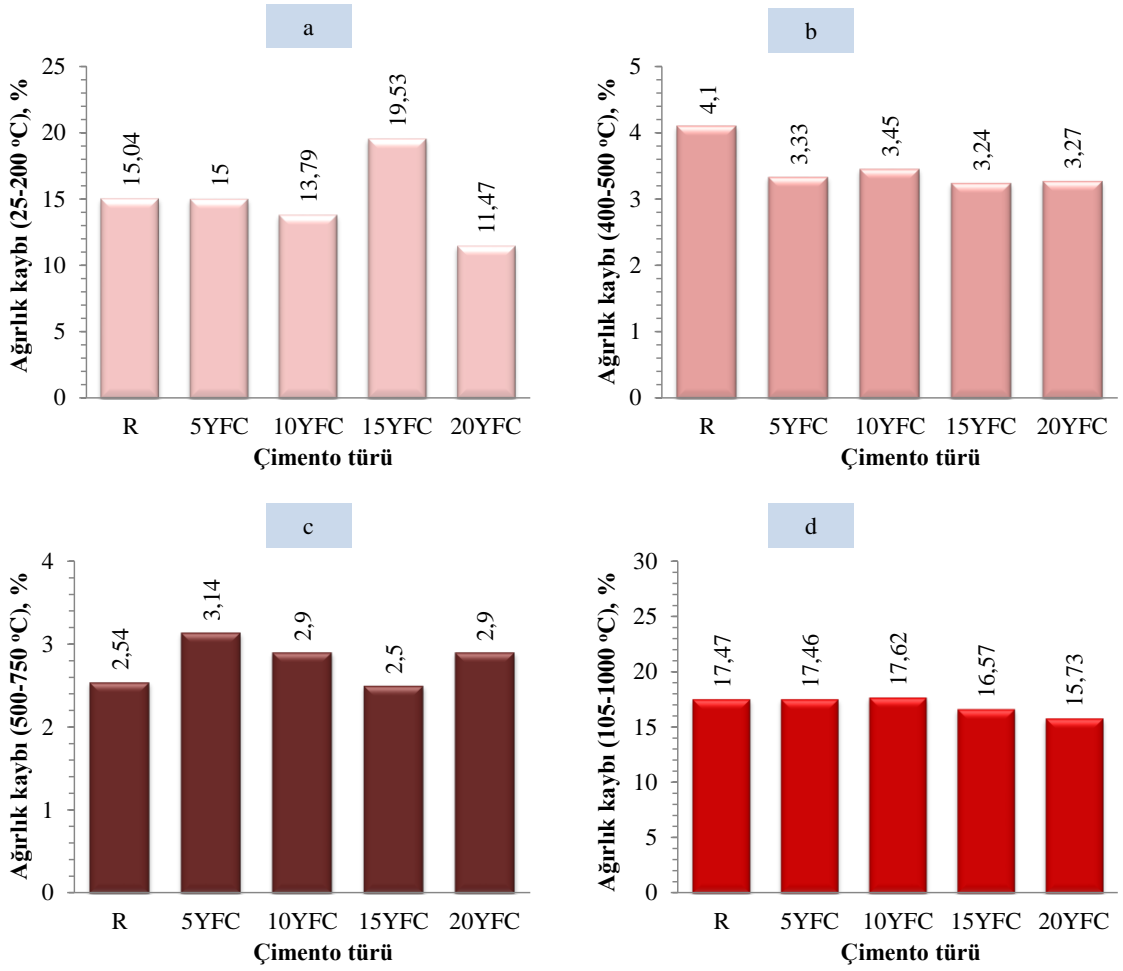
Çimento hamurlarının faz gelişimlerini incelemek için yapılan DTA/TGA analiz verileri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.





Şekil 4.10: Çimento hamurlarının DTA/TGA analizi.

Çimento hamurlarının yapısal ve kristal su, C-S-H ve Etenjit (Aft) fazları, 25-200 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Portlandit'in ayrışması 400 ve 500 °C sıcaklık aralığında gerçekleşirken,  $\text{CaCO}_3$ 'ün ayrışması 500 ve 750 °C aralığında gerçekleşmektedir. C-S-H, portlandit ve diğer hidratlı ürünlerin (kimyasal olarak bağlanmış su veya buharlaşmayan su içeriği) dehidrasyonu ve ayrışması, 105 °C ile 1000 °C sıcaklık aralığındaki su kaybı şeklinde gerçekleşmektedir [72-75]. Şekil 4.10'daki verilerden hesaplanmış olan ağırlık kayıpları Şekil 4.11'de verilmiştir.

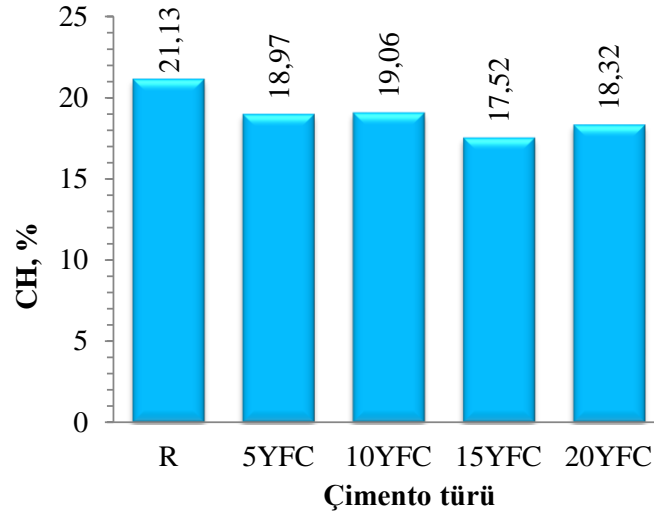


Şekil 4.11: Çimento hamurlarının farklı sıcaklıklara ait ağırlık kayıpları.

Yapılan analiz sonucunda CH'nin bütün içeriği, Denklem 4.1'den CH'ın dehidrasyonu ve CaCO<sub>3</sub> ayrışım kütlesi ile hesaplanabilir:

$$CH(\%) = a_1 * \frac{74}{18} + a_2 * \frac{74}{44} \quad (4.1)$$

Denklemdaki a<sub>1</sub> ve a<sub>2</sub>, sırasıyla CH'nin ve CaCO<sub>3</sub>'ün ağırlık kayıplarını; 74, 18 ve 44 değerleri sırasıyla CH, H<sub>2</sub>O ve CO<sub>2</sub>'nin molekül ağırlıklarını göstermektedir [74, 98]. Denklem 4.1'den hesaplanan tüm CH içeriği Şekil 4.12'de verilmiştir.



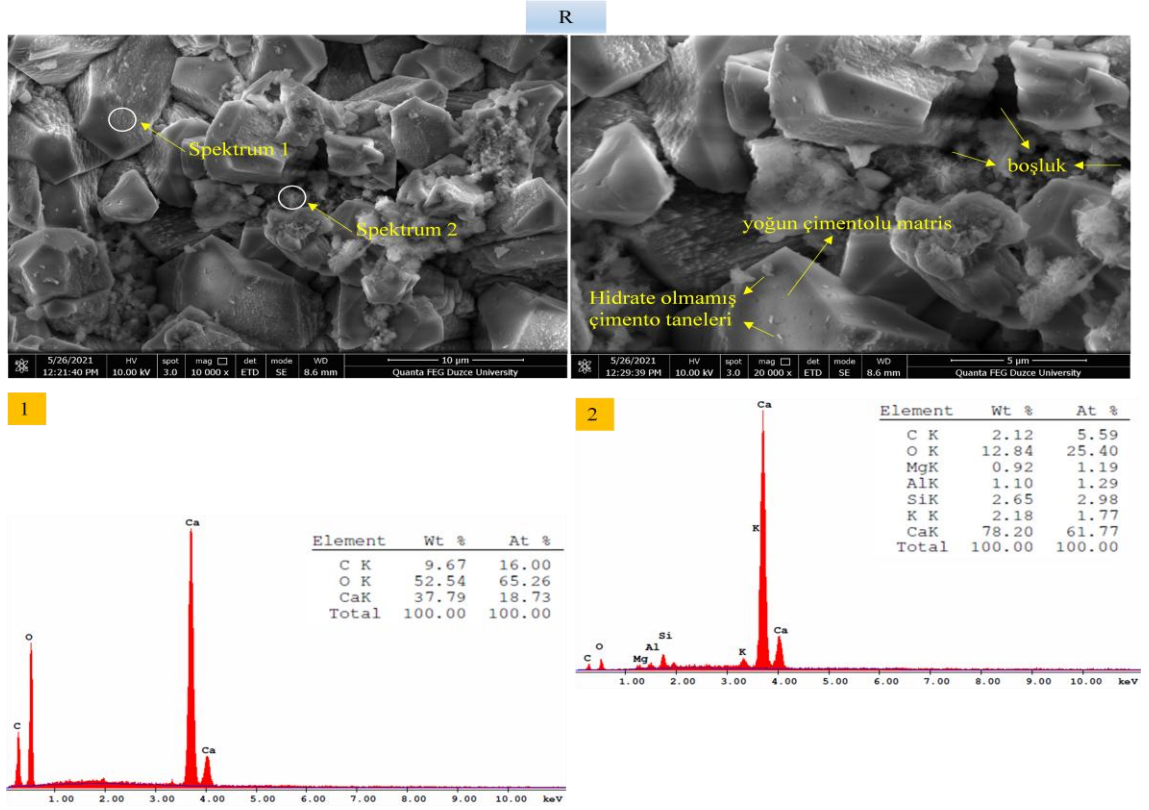
Şekil 4.12: Çimento hamurlarının CH içeriği.

Elde edilen ağırlık kayıplarına göre, 25-200 °C sıcaklık aralığında görülen yapısal ve kristal su ile C-S-H ve AFt fazlarının farklı aşamalarındaki dehidratasyonu R kodlu hamurda %15,04 oranında; 5YFC, 10YFC, 15YFC ve 20YFC kodlu hamurlarda ise sırasıyla, %15,00, %13,79, %19,53 ve %11,47 oranlarında meydana gelmiştir (Şekil 4.11-a). 105 °C ila 1000 °C sıcaklık aralığında C-S-H jel, CH ve diğer hidratlı ürünlerin dehidrasyonu nedeniyle su kaybı R kodlu hamurda %17,47 oranında oluşurken, 5YFC, 10YFC, 15YFC ve 20YFC kodlu hamurlarda ise sırasıyla, %17,46, %17,62, %16,57 ve %15,73 oranlarında gerçekleşmiştir (Şekil 4.11-d). Ayrıca R kodlu hamurda CH'in ve CaCO<sub>3</sub>'ün ayrışmasından kaynaklı kayıplar sırasıyla %4,10 ve %2,54 meydana gelmiştir (Şekil 4.11-b,c). 5YFC, 10YFC, 15 YFC ve 20YFC kodlu çimento hamurlarında ise CH'in ve CaCO<sub>3</sub>'ün ayrışmasından kaynaklı kayıplar sırasıyla, %3,33-%3,14, %3,45-%2,90, %3,24-%2,50 ve %3,27-%2,90 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.11-b,c). Denklemden yararlanılarak hesaplan CH içeriği referans çimento hamurunda %21,13 oranında gerçekleşirken; 5YFC, 10YFC, 15 YFC ve 20YFC kodlu çimento hamurlarında sırasıyla, %18,97, %19,06, %17,52 ve %18,32 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4.12). Bu verilere göre, YFC'nin tüm ikame oranlarında CH miktarını azalttığı ve XRD ve FT-IR teknikleriyle elde edilen verilere uygun olarak sonuç verdiği ifade edilebilir.

#### 4.2.4.4. Çimento hamurlarının SEM analizleri

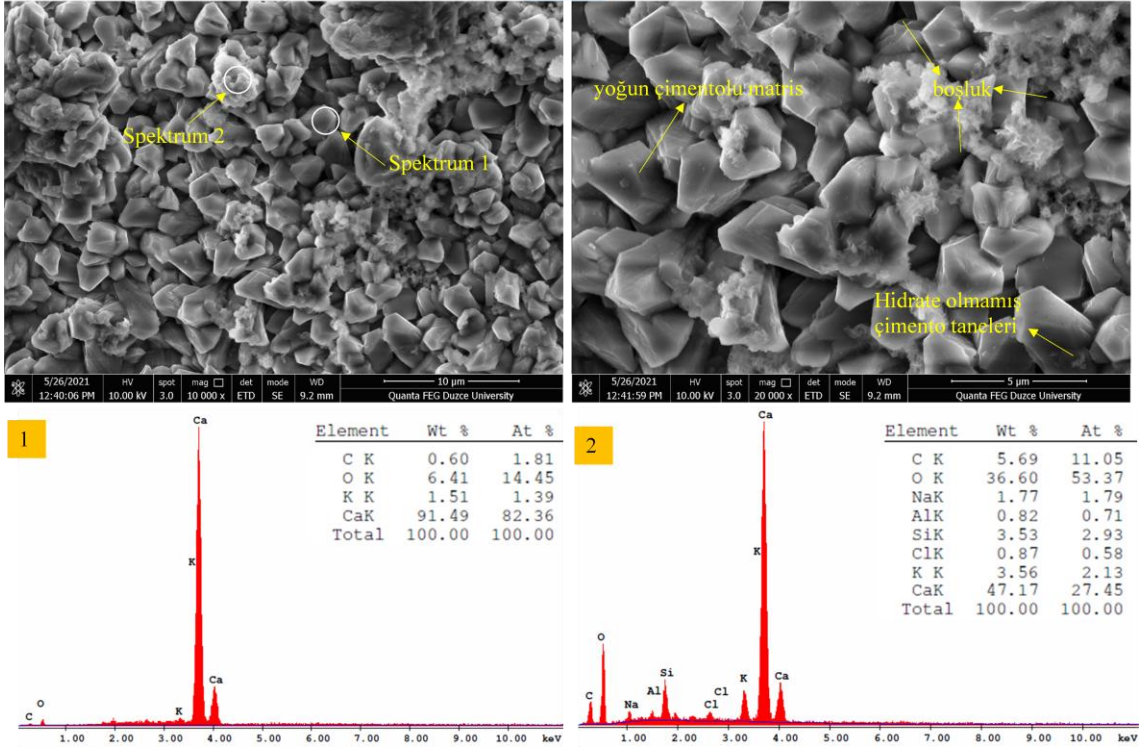
Çimento hamurlarının mikro yapılarını belirlemek için 10000 ve 20000 büyütmede SEM görüntüleri çekilmiş, EDS analizleri bu görüntülerin 2 farklı noktasından elde edilmiştir. SEM resimleri ve EDS analizleri R kodlu hamurun Şekil 4.13'de verilirken;

5YFC, 10YFC, 15YFC ve 20YFC kodlu hamurların Şekil 4.14, 15, 16 ve 17’de verilmiştir.



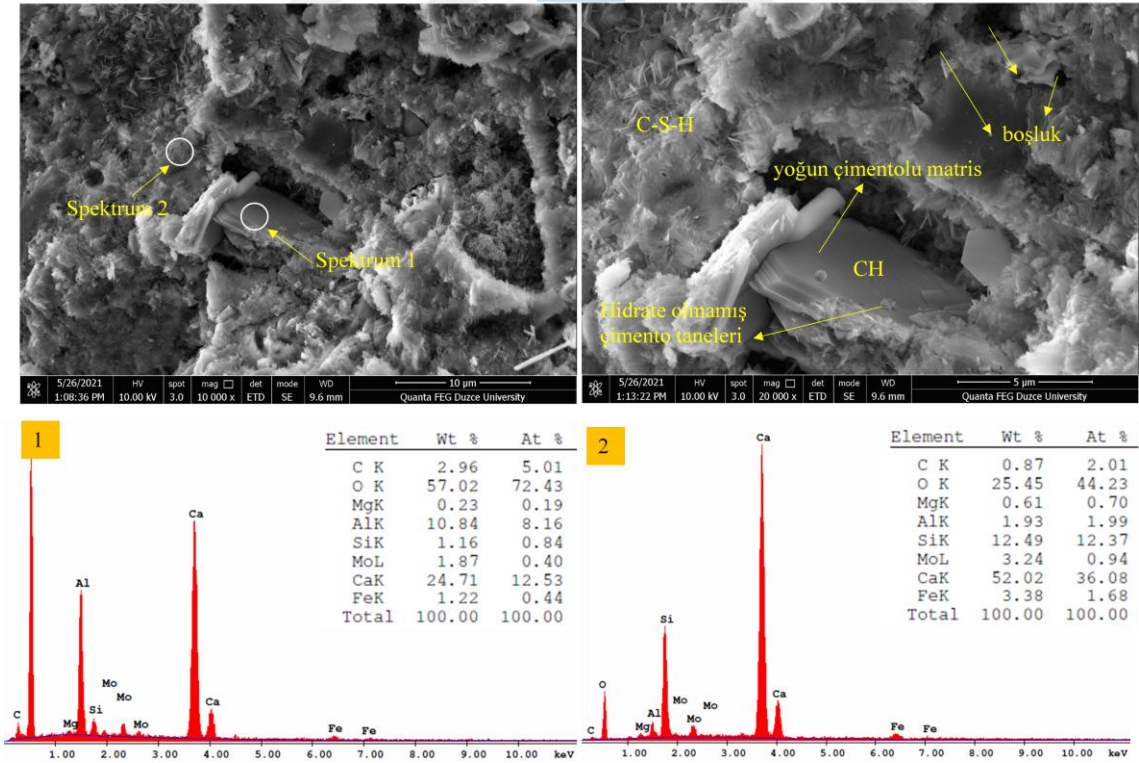
Şekil 4.13: Referans çimento hamurunun SEM görüntüsü.

5YFC



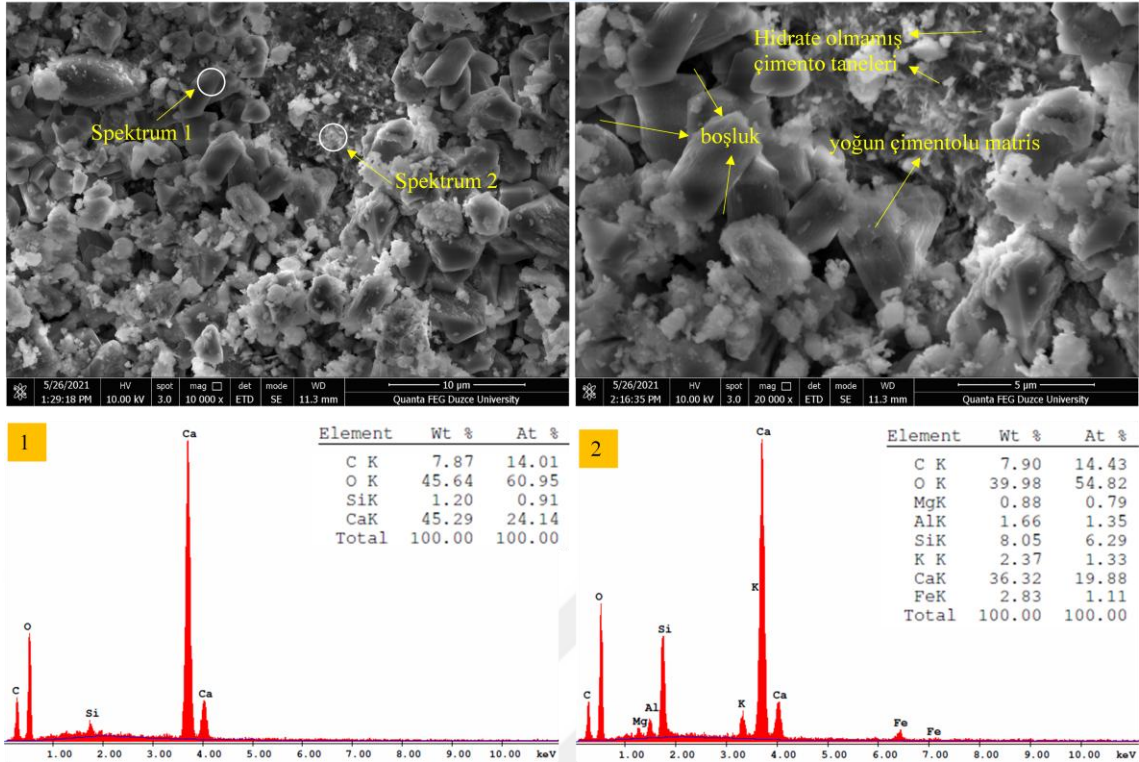
Şekil 4.14: 5YFC kodlu çimento hamurunun SEM görüntüsü.

10YFC



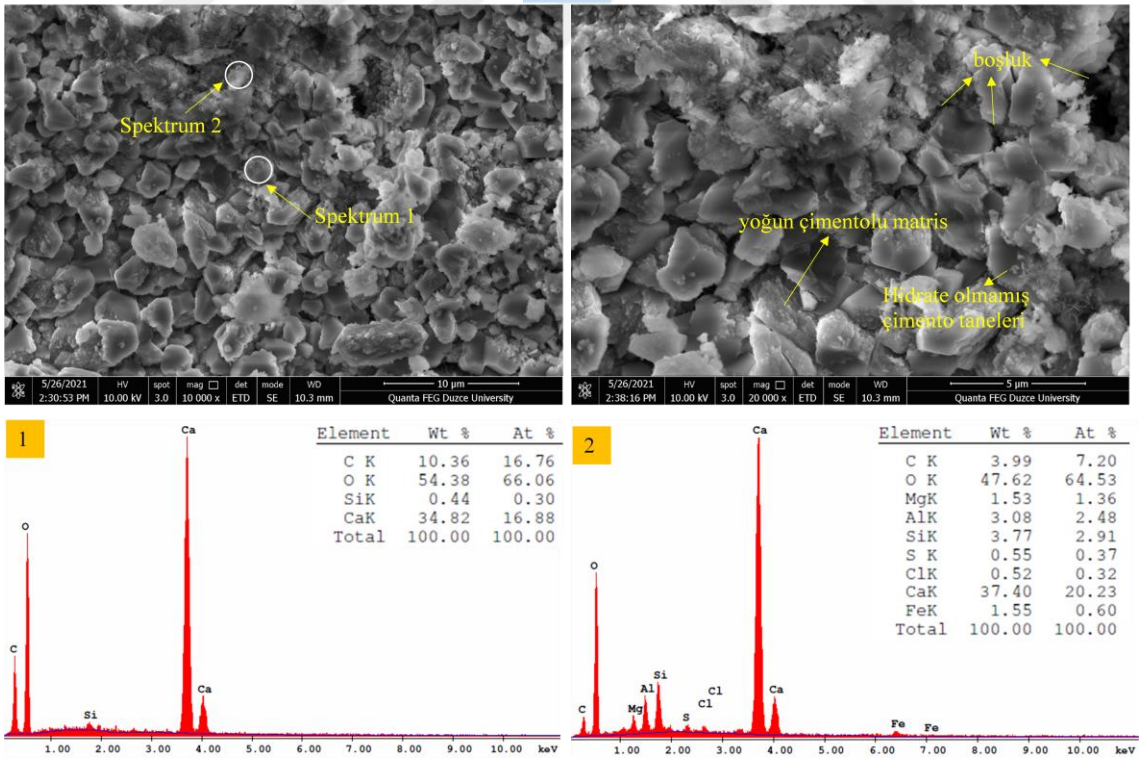
Şekil 4.15: 10YFC kodlu çimento hamurunun SEM görüntüsü.

15YFC



Şekil 4.16: 15YFC kodlu çimento hamurunun SEM görüntüsü.

20YFC



Şekil 4.17: 20YFC kodlu çimento hamurunun SEM görüntüsü.

R kodlu hamurun SEM görüntüsüne göre şekilsiz jel, yapıda hakim fazı oluşturmuş ve boşlukları doldurarak kararlı bir yapı oluşturmuştur. Ancak buna rağmen yer yer 2

mikron civarı boşlukların olduğu ve yer yer hidrate olmamış çimento taneleri görülmüştür (Şekil 4.13). Buna ek olarak R kodlu hamurun spektrum 1'den elde edilen EDS analizine göre, ana elementlerin Ca (Şekil 4.13-1), spektrum 2'ye göre ise Ca ve Si olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 4.13-2).

5YFC kodlu çimento hamurunda boyutları 2-3 mikron arasında farklılık gösteren plakalar yaygın bir şekilde yapı içerisine dağılmıştır. EDS analizi bu plakaların başlıca Ca bileşiminde olduğunu göstermiştir. Bu çimento hamurunda da Referans çimento hamurunda olduğu gibi boyutları yer yer 1-2 mikron arasında farklılık gösteren boşlukların olduğu görülmüştür (Şekil 4.14). 5YFC kodlu hamurun spektrum 1'den elde edilen EDS analizine göre ana elementlerin Ca (Şekil 4.14-1), spektrum 2'ye göre ise Ca ve Si olduğunu göstermektedir (Şekil 4.14-2).

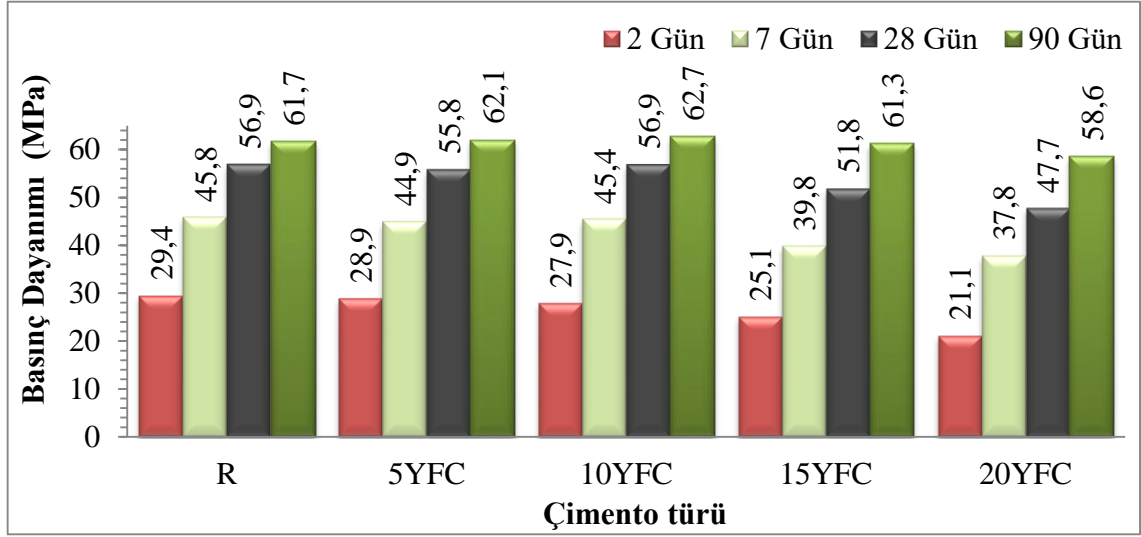
10YFC kodlu çimento hamurunda kaogüle jel yapısı ana fazı oluşturmuş ve puzolan tanecikleri adeta bu faz içerisine gömülmüştür. Bunun yanı sıra klinker ve YFC taneleri, C-S-H'nin lifsi yapısıyla çevrelenerek boşluklar doldurulmaya çalışılmış, ancak yer yer bu hamurda da boşluklara rastlanmıştır (Şekil 4.15). 10YFC kodlu hamurun spektrum 1'den elde edilen EDS analizine göre ana elementlerin Ca ve Al (Şekil 4.15-1), spektrum 2'ye göre ise Ca ve Si olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.15-2).

15 YFC ve 20YFC kodlu çimento hamurlarında klinker ve YFC taneleri, C-S-H'nin yine lifsi yapısıyla çevrelenerek boşluklar doldurulmaya çalışılsa da, yine yer yer boşluklara rastlanmıştır. 15YFC ve 20YFC kodlu hamurlardaki mikro yapıları ile R kodlu hamurun mikro yapısı karşılaştırıldığında, YFC ikame oranı ile doğru orantılı olarak nispeten biraz daha fazla gözenekliliğe ve susuz YFC ve çimento tanesine sahip olduğu, ancak daha az kararlı bir yapıya sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.16-17). 15YFC ve 20YFC kodlu hamurların spektrum 1'den elde edilen EDS analizine göre ana elementlerin Ca (Şekil 4.16-1 ve 4.16-1), spektrum 2'ye göre ise Ca, Si ve Al olduğu izlenmektedir (Şekil 4.17-2 ve 4.17-2).

YFC ikameli çimento hamurlarının mikro yapıları genel olarak değerlendirildiğinde, YFC tanelerinin daha yüksek yüzey alanı ve amorf silika içeriğine sahip olması nedeniyle portlandit ile reaksiyona beklendiği gibi girdiğini ve ikincil C-S-H jeli oluşumunu sağlayarak puzolanik reaksiyona katılmış olduğu ifade edilebilir [99, 100].

### 4.3. YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ

Çimento harçlarının 2, 7, 28 ve 90. günlerinde elde edilen basınç dayanımları Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18: Çimento harçlarının basınç dayanımları.

Yapılan deney sonuçlarına göre 2. günde en düşük basınç dayanımı 21,1 MPa ile 20YFC kodlu harç örneğinde, en yüksek basınç dayanımının ise 29,4 MPa ile referans harç örneğinde olduğu görülmektedir. Referans harç örneğine göre, basınç dayanımlarının 2. gününde 5YFC, 10YFC, 15YFC ve 20YFC kodlu harç örneklerinde sırasıyla %1,9, %5,3, %14,8 ve %28,3 oranlarında bir dayanım düşüklüğü görülmektedir. 7. günde en düşük basınç dayanımı 37,8 MPa ile 20YFC kodlu harç örneğinde, en yüksek basınç dayanımının ise 45,8 MPa ile referans harç örneğinde olduğu görülmektedir. Referans harç örneklerine göre, basınç dayanımlarının 7. gününde 5YFC, 10YFC, 15YFC ve 20YFC kodlu harç örneklerinde sırasıyla %2,0, %0,9, %13,2 ve %17,6 oranlarında bir dayanım düşüklüğü meydana gelmiştir. 28. günde en düşük basınç dayanımı 47,7 MPa ile 20YFC kodlu harç örneğinde, en yüksek basınç dayanımının ise 56,9 MPa ile referans harç örneğinde olduğu görülmektedir. Referans harç örneklerine göre, basınç dayanımlarının 28. gününde 5YFC, 10YFC, 15YFC ve 20YFC kodlu harç örneklerinde sırasıyla %1,9, %0,0, %9,0 ve %16,1 oranlarında bir dayanım düşüklüğü izlenmektedir. 90. günde en düşük basınç dayanımı 58,6 MPa ile 20YFC kodlu harç örneğinde, en yüksek basınç dayanımının ise 62,7 MPa ile 10YFC kodlu harç örneğinde olduğu görülmektedir. Referans harç örneklerine göre, basınç dayanımlarının 90. gününde 15YFC ve 20YFC kodlu harç örneklerinde sırasıyla

%0,6 ve %5,0 oranlarında bir dayanım düşüklüğü görülürken, 5YFC ve 10YFC kodlu harç örneklerinde sırasıyla %0,7 ve %1,6 oranlarında dayanımlarında artış gözlenmektedir (Şekil 4.18).

Genel olarak sonuçlar ele alındığında 28. ve 90. günlerde YFC ikameli harç örneklerinin basınç dayanım değerlerindeki gelişim hızlarının, 2. ve 7. gündeki harç örneklerine kıyasla nispeten tüm ikame oranlarında arttığı izlenmektedir. Bu verilere göre ilk günlerdeki basınç dayanım değerlerinin azalması, puzolanik reaksiyon sonucu hidrasyonun hızının azalmasından dolayı daha az C-S-H ağırlıkça çıkması olarak düşünülmektedir. Ancak ileri yaşlarda daha yüksek yüzey alanı ve amorf silika içeriğine sahip olan YFC'nin portlandit (CH) ile reaksiyona tahmin edildiği gibi girebildiği ve ikincil C-S-H jeli oluşumunu sağlayarak, özellikle 5YFC ve 10YFC kodlu çimento hamurlarının SEM resimlerinde görüldüğü gibi hidrasyon gelişimlerinin yeterince tamamlanması nedeniyle istenen basınç dayanımı değerlerine ulaşıldığı görülmektedir (Şekil 4.14-15). Bunun yanı sıra tüm YFC ikameli harçların standarttaki 2 günlük (20 MPa) ve 28 günlük (42,5 MPa) norm basınç değerinin üzerinde olduğu, dolayısı ile 42,5 R dayanım sınıfını sağladığı görülmektedir [21].

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan analiz ve deneyler sonucundaki bulgular aşağıdaki gibi sıralanabilir. Buna göre;

- YFC'nin fiziksel ve kimyasal açıdan olumlu özellik gösterdiği,
- YFC'nin XRD analiz verilerine göre SiO<sub>2</sub>, CaO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşan yoğun bir amorf yapıya sahip olduğu ve bu durumun dayanım açısından olumlu olduğu,
- YFC'nin FT-IR sonuçlarının literatürle uyumlu olarak elde edildiğini,
- Termal analiz verilerine göre toplam ağırlık kayıplarının PÇ'de %2,9, YFC de ise %1,9 olarak elde edildiği,
- YFC ikamesine bağlı olarak su ihtiyaçlarında nispeten bir artış görülse de bunun önemli bir etki yaratmadığı,
- Genleşme değerlerinin tüm çimento hamurlarında sınır değere nazaran çok küçük olduğu ve genleşme açısından herhangi bir soruna neden olmayacağı,
- Tüm çimento hamurlarının TS EN 197-1'de belirtilen priz başlama sürelerinin 42,5 dayanım sınıfına sahip çimentolar için en küçük süre olan 60 dakikanın ve 32,5 MPa dayanım sınıfına sahip çimentolar için 75 dakikanın üzerinde sağlandığı,
- 28. hidrasyon gününde gerçekleştirilen XRD, TGA ve FT-IR analizleri ile referans hamura kıyasla açığa çıkan CH miktarının YFC ikameli hamurlarda azaldığı,
- SEM görüntülerine göre; YFC'nin portlandit ile tahmin edildiği gibi reaksiyona girebildiği, tanelerinin hidrasyon gelişimlerini yeterince gerçekleştirebildiği ve dolayısıyla ikincil C-S-H jeli oluşumu sağlanarak dayanıma katkı sağlanabildiği,
- Standartta belirtilen hem 2 hem de 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin elde edilmesiyle, 42,5 R dayanım sınıfını sağladığı görülmektedir.

Bu bağlamda, Türkiye'de endüstriyel bir atık olan YFC'nin çimentoya ikame edilmesiyle hem atıkların değerlendirilmesinin söz konusu olacağı hem de daha az klinker üretimi gerçekleşeceği için ekonomik ve ekolojik fayda sağlanabileceği söylenebilir.

Bu çalışmada sadece YFC ele alınarak hidrasyon reaksiyonları ayrıntıları ile incelenmiştir. Ancak yapılacak olan diğer çalışmalarda doğal ya da yapay puzolanik

malzemelerin ayrı ayrı ya da birlikte ikamesi ile üretilen çimentoların hidrasyon reaksiyonlarının anlaşılması açısından da XRD, FT-IR, termal analiz ve SEM gibi analizlerin kullanılmasının yararlı olacağı ve literatüre, çimento ve beton sektörüne katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Y. Koçak, "A study on the effect of fly ash and silica fume substituted cement paste and mortars," *Scientific Reserach and Essays*, c. 5, sayı 9, ss. 990-998, 2010.
- [2] A. Dorum, Y. Koçak, B. Yılmaz ve A. Uçar, "The effects of blast furnace slag on the cement surface properties and hydration," *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, sayı 19, ss. 47-58, 2009.
- [3] Y. Koçak ve S. Nas, "The effect of using fly ash on the strength and hydration characteristics of blended cements," *Construction and Building Materials*, c. 73, ss. 25-32, 2014.
- [4] Y. Koçak, "Tras ikame oranının portland çimentosunun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi," *Engineering Sciences*, c. 5, sayı 3, ss. 564-572, 2010.
- [5] Y. Koçak, E. Taşçı, ve U. Kaya, "The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements," *Construction and Building Materials*, c. 47, ss. 720-727, 2013.
- [6] K. Yıldız, Y. Koçak ve A. Dorum, "Pomza zeolit ve cem I çimentosunun minerolojik moleküler elektrokinetik ve termal uyumunun yüksek dayanımlı betona etkisinin araştırılması," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 25, sayı 4, ss. 867-879, 2009.
- [7] A. Subaşı ve M. Emiroğlu, "Effect of metakaolin substitution on physical, mechanical and hydration process of White Portland cement," *Construction and Building Materials*, c. 95, ss. 257-268, 2015.
- [8] E. Gülbandır ve Y. Koçak, "Predicting the splitting tensile strength of concrete containing zeolite and diatomite under the effect of MgSO<sub>4</sub> by ann," *Materials, Methods and Technologies*, c. 10, sayı 2015, ss. 529-540, 2016.
- [9] H.M. Kuyumcu, "Deniz suyu ve sülfatlı suların beton dayanımına etkisi", Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2006
- [10] Ş. Erdoğan, Ş. Kurbetci, "Betonun performansına sağladıkları etkinlik açısından kimyasal ve mineral katkı maddeleri", *Türkiye Mühendislik Haberleri*, c. 426, sayı 4, ss. 115-120, 2003.
- [11] F.F. Uysal ve S. Bahar, "Cüruf çeşitleri ve kullanım alanları", *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 19, sayı 1, ss.37-52, 2018.
- [12] M. Tokyay ve K. Erdoğan, "Cüruflar ve cürüflü çimentolar, araştırmaların gözden geçirilmesi ve durum değerlendirmesi raporu", TÇMB/AR-GE/Y 97.2, ANKARA, 2011.
- [13] K. Abdelli, M. Tahlaiti, R. Belarbi and M.N. Oudjit, "Influence of the pozzolanic reactivity of the Blast Furnace Slag (BFS) and metakaolin on mortars", *Energy Procedia*, c. 139, ss. 224-229, 2017.
- [14] M.S. Amin, S.M.A. El-Gamal, S.A. Abo-El-Enein, F.I. El-Hosiny and M. Ramadan, "Physico-chemical characteristics of blended cement pastes containing electric arc furnace slag with and without silica fume". *HBRC journal*, c. 11, sayı. 3, ss. 321-327, 2015.
- [15] M.M. López, Y. Pineda and O. Gutiérrez, "Evaluation of durability and mechanical properties of the cement mortar added with slag blast furnace", *Procedia Materials Science*, c. 9, ss. 367-376, 2015.
- [16] J. Zhu, Q. Zhong, G. Chen and D. Li, "Effect of particlesize of blast furnace slag on properties of portland cement", *Procedia Engineering*, c. 27, ss. 231-236,

- 2012.
- [17] M. Emiroğlu, Y. Koçak ve S. Subaşı, “Yüksek fırın cürufunun betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi”, *In 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, c. 1, ss. 113-117, 2011.
- [18] M.Á. Sanjuán, E. Estévez, C. Argiz and D. del Barrio, “Effect of curing time on granulated blast-furnace slag cement mortars carbonation”, *Cement and Concrete Composites*, c. 90, ss. 257-265, 2018.
- [19] T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, “Çimento sektörü raporu,” Türkiye, ss. 5, 2018.
- [20] M. Dayı, “Doğal ve yapay puzolanların kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması,” Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.
- [21] TS EN 197-1, “Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, ss. 2-15, 2012.
- [22] O. Şimşek, *Beton ve Beton Teknolojisi*, 2. baskı, Ankara, Türkiye: Seçkin Yayınevi, 2004, ss. 75-119.
- [23] B. Postacıoğlu, *Bağlayıcı Maddeler*, İstanbul, Türkiye: Teknik Kitaplar Yayınevi, 1986, c. 1, ss. 5-38.
- [24] A. Yeğinobalı, *Çimento Yeni Bir Çağın Malzemesi*, 2. baskı, Ankara, Türkiye: Demo Yayınevi, 2003, ss. 11-14.
- [25] C.C. Eskin, “Çimentoların katkı maddeleri ile birlikte veya ayrı öğütülmesinin beton dayanımı üzerindeki etkileri”, Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, ss. 1-41, 1998.
- [26] Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, “Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayii Hammaddeleri IV (Çimento Hammaddeleri) Çalışma Grubu Raporu”, Ankara, Türkiye, 2001.
- [27] Y. Koçak, “Çimento-puzolan etkileşiminde molüküler ve elektrokinetik davranışların araştırılması,” Doktora tezi, Yapı Eğitim, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2008.
- [28] N. Atar, “Suda çözünen polimerlerin çimento ve beton özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, ss. 2-3, 2006.
- [29] U. Mumcu, “Çimento üretimindeki istikrarlı hammadde bileşiminin sağlanması, kalite ve verimliliğin artırılması,” *Çimento ve Beton Dünyası*, c. 55, ss. 45-49, 2005.
- [30] M. Bulgu, “Perlitin çimentoda puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabilirliği”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, ss. 1-40, 2008.
- [31] H. Yalnız, “Çimento sanayi hammadde ocağı üretim planlaması”, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, ss. 178, 2006.
- [32] A. Ulusoy, “Uçucu kül-tekstil fabrikası atık külü ve bazaltik pomzanın tuğla üretiminde katkı olarak kullanılması”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye, ss. 8-9, 2008.
- [33] H. Yalçın, M. Gürü, *Çimento ve Beton*, Palme Yayıncılık, Ankara, Türkiye, 2006, ss. 17-22, 44, 59, 73, 242.
- [34] M. Ünal, “Atık seramik karoların çimento üretiminde kullanılması”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, ss.

- 1-22, 1998.
- [35] G. Targan, “Kula cürufu, bentonit, kül ve kolomanit atıklarının çimento üretiminde değerlendirilmesi”, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, ss. 12-14, 2002.
- [36] A.G. Türkmenoğlu, A. Tangut, “Use of tuffs from central Turkey as admixture in pozzolanic cements Assessment of their petrographical properties”. *Cement and Concrete Research*, c. 4, sayı 32, ss. 629-637, 2002.
- [37] Ş. Yetkin, A. Çavdar, “Doğal puzolan katkı oranının çimentonun dayanım, işlenebilirlik, katılaşma ve hacim genleşmesi özelliklerine etkisi”, *Fırat Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 17, sayı 4, ss. 687-692, 2005.
- [38] Y. Koçak, “Süper akışkanlaştırıcı ve trasın çimento hidrasyonuna etkileri”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c.23, sayı 3, ss. 184-192, 2017.
- [39] K. Erdoğan, M. Tokyay ve P. Türker, *Traslar ve Trashlı Çimentolar*, 8. baskı, Ankara, Türkiye: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 2009, ss. 16-23.
- [40] MJ Shannag, “High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume”, *Cement & Concrete Composites*, c. 22, sayı 6, ss. 399-406, 2000.
- [41] Ş. Özkan, “Kimyasal etkilere dayanıklı çimento üretimi üzerine bir araştırma”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, ss. 8-9, 2009.
- [42] U. Gündeşli, “Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması,” Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, ss. 11-14, 2008.
- [43] D. Alkaya, “Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanılmasının incelenmesi”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, c. 5, sayı 1, ss. 61-72, 2009.
- [44] Ö. Şengül, M. A. Taşdemir ve O. E. Gjörv, “Puzolanik malzemelerin betonun mekanik özellikleri ve klor iyonu yayılımına etkisi”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, c. 6, sayı 1, ss. 53-64, 2007.
- [45] S. Urhan, “Temel yapı malzemesi çimentonun öyküsü”, *Metallurji-Malzeme Dergisi*, c. 24, sayı 124, ss. 124, 2000.
- [46] S. T. Erdoğan ve T. Y. Erdoğan, “Puzolanik mineral katkıları ve tarihi geçmişleri,” *2.Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 2007, ss. 264-329.
- [47] A. Okucu, “Bigadiç ve turna tepe yörelerindeki zeolitik ve perlitik tüflerin puzolonik özellikleri,” Doktora tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye, 1998.
- [48] M. S. Kırkoğlu, F. Yavuz, U. S. Okyay ve A. Yıldız, *Çimento Hammaddeleri, Ders Notları*, İstanbul, 1990.
- [49] T. Y. Erdoğan, *Beton*, 2. baskı, Ankara, Türkiye: Orta Doğu Teknik Üniversitesi Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 2010, ss. 188-189.
- [50] H. Y. Aruntaş, “Diatomitlerin çimentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği”, Doktora tezi, Mimarlık, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, ss. 4-8, 1996.
- [51] T. Y. Erdoğan, *Beton*, 3. baskı, Ankara, Türkiye: Orta Doğu Teknik Üniversitesi Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 2003, ss. 741.
- [52] I. N. Grubesa, “Characteristics and Uses of Steel Slag in Building Construction”, *Woodhead Publishing*, Germany, 2016.
- [53] O. Assbrock, “Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) as a Concrete

- Additive - Current Situation and Scenarios for its Use in Germany”, *The Federal Association of the German Ready Mixed Concrete Industry*, Germany, 2007.
- [54] Y. Engin, *Yüksek Fırın Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Çimento, Üretimi, Özellikleri, Etkileri*, Yüksek Fırın Cürufu El Kitabı, 2015.
- [55] G. Bilgen, A. Kavak, S.T. Yıldırım, Ö.F. Çapar, 2. Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi (UKAY 2010), Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye, 2010.
- [56] Ö. Okyay, Y. Akkaya, “Yüksek Dayanım ve Yüksek Performanslı Betonlarda Yüksek Fırın Cürufu Kullanımı”, *Beton 2011 Kongresi Bildirileri*, c. 1, ss. 388-394, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [57] C. Bilim, C.D. Atis, “Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren harçların aşınma ve mukavemet özellikleri”, *Politeknik Dergisi*, c. 14, sayı 2, ss. 101-107, 2011.
- [58] S. Baycık, “Granüle yüksek fırın cüruflarının karo sektöründe kullanılabilirliğinin araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, ss. 5-8, 2003.
- [59] Özcan, F., “Silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri ve hızlandırılmış kür ile dayanım tahmini”, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, ss. 40-43, 2005.
- [60] Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezi. (2022, 21 Mart). X - Işınlari Kırınımı tekniği ile yapılan analiz.  
Erişim: <https://iltem.dpu.edu.tr/laboratuvarlar/mineralojik-analiz-laboratuvari/>.
- [61] M.Ç., Karakaya, *Kil Minerallerinin Özellikleri ve Tanımlama Yöntemleri*, Bizim Büro Basımevi, Ankara, Türkiye, 2006.
- [62] T. Gündüz, *Instrumental Analiz*, Bilge Yayıncılık, Ankara, Türkiye, ss. 122-123, 1990.
- [63] T. Büyüksirt ve H. Kuleaşan, “Fourier dönüşümlü kızılötesi (FT-IR) spektroskopisi ve gıda analizlerinde kullanımı,” *Gıda Journal Of Food*, c. 39, ss. 235-241, 2014.
- [64] A. İssi, Tarihi buluntuların karakterizasyon teknikleri, Anadolu Üniversitesi *Ders Notları*, Eskişehir, 2005.
- [65] F. Puertas, A. Fernandez-Jimenz and M.T. Blanco-Varela, “Pore Solution in alkali-activated slag cement pastes. Relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate”, *Cement And Concrete Research*, c. 34, sayı 01, ss. 139-148, 2004.
- [66] F. Puertas and A. Fernandez-Jimenez, “Mineralogical and microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes,” *Cement And Concrete Composites*, c. 25, ss. 287-292, 2003.
- [67] M. Akyol, K. Kıymaç ve A. Ekicibil, “Geçiş metali Dy katkılı  $Zn_{0.80-4y}Dy_yO_x$  bileşiklerinin yapısal ve manyetik özelliklerinin araştırılması,” *Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 26 -2, ss. 173-182, 2011.
- [68] M. J. Varas, M. A. De Buergo and R. Fort, “Natural cement as the precursor of portland cement: Methodology for its identification,” *Cement and Concrete Research*, c. 35, sayı 11, ss. 2055-2065, 2005.
- [69] S. Nas, “Portland çimento ve uçucu kül ikameli çimentoların hidrasyon gelişimleri ile fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Yapı Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2012.
- [70] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff and W. C. Panarese, “Design and Control of concrete mixtures,” *Portland Cement Association*, c. 14, ss. 21-56, 2008.
- [71] L. Turanlı, H. Yücel, C. Göcüoğlu, A. Çulfaz ve B. Uzal, “Doğal zeolitlerin

- inşaat endüstrisinde kullanımı,” Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, s. 17, 2007.
- [72] T. Zhang, S. Shang, F. Yin, A. Aishah, A. Salmiah, ve T. L. Ooi, “Adsorptive behavior of surfactants on surface of Portland cement”, *Cem. Concr. Res.*, c. 31, sayı 7, ss. 1009–1017, 2001.
- [73] G. Skripkiūnas, V. Sasnauskas, M. Daukšys, ve D. Palubinskaite, “Peculiarities of hydration of cement paste with addition of hydrosodalite”, *Mater. Sci. Pol.*, c. 25, sayı 3, ss. 627–635, 2007.
- [74] B. Zhang, H. Tan, W. Shen, G. Xu, B. Ma, ve X. Ji, “Nano-silica and silica fume modified cement mortar used as Surface Protection Material to enhance the impermeability”, *Cem. Concr. Compos.*, c. 92, ss. 7–17, 2018.
- [75] M. E. S. I. Saraya, “Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study”, *Constr. Build. Mater.*, c. 72, ss. 104–112, 2014.
- [76] Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi. (2022, 21 Mart). Taramalı Elektron Mikroskobu. Erişim: <http://dubit.duzce.edu.tr/2929-sayfa-taramali-elektron-mikroskobu>.
- [77] Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, (2022, 21 Mart). Taramalı Elektron Mikroskobu. Erişim: <https://daytam.atauni.edu.tr/?ts-portfolio=taramali-elektron-mikroskopu-sem>.
- [78] Çimento deney metodları - Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 196-1, 2016.
- [79] Çimento deney metodları - Bölüm 6: İncelik tayini, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 196-6, 2020.
- [80] Çimento deney metodları - Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genişleme tayini, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 196-3, 2017.
- [81] Çimento deney metodları - Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 196-2, 2013.
- [82] Y.C. Choi, & B. Park, “Enhanced autogenous healing of ground granulated blast furnace slag blended cements and mortars”, *Journal of Materials Research and Technology*, c. 8, sayı 4, ss. 3443-3452, 2019.
- [83] X. Huang, M. Jiang, X. Zhao and C. Tang, “Mechanical properties and hydration mechanisms of high-strength fluorogypsum-blast furnace slag-based hydraulic cementitious binder”, *Construction and Building Materials*, c. 127, ss. 137-143, 2016.
- [84] H. N. Yoon, J. Seo, S. Kim, H. K. Lee and S. Park, “Hydration of calcium sulfoaluminate cement blended with blast-furnace slag”, *Construction and Building Materials*, c. 268, sayı 121214, 2021.
- [85] M. Yanık, “Farklı incelikte öğütülmüş obsidyen katkılı çimentoların puzolanik özelliklerinin tayini” Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, Türkiye, ss. 13-14, 2019.
- [86] F. Puertas, A. Fernandez-Jimenez, M.T. Blanco-Varela, “Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate”, *Cement And Concrete Research*, c. 34, sayı 1, ss. 139-148, 2004.
- [87] C. E. M. Gomes, and O. P. Ferreira, “Analyses of microstructural properties of va/veova copolymer modified cement pastes”, *Polimeros*, c. 15, sayı 3, ss. 193–198, 2005.
- [88] F. I. Adeniyi and M.B. Ogundiran, “Synthesis of geopolymer binders and mortars from Ijero-Ekiti calcined clay, blast furnace slag and river sand”,

- Earthline Journal of Chemical Sciences*, c. 4, sayı 1, ss. 15-34, 2020.
- [89] A.R. Sakulich, S. Miller and M.W. Barsoum, “Chemical and microstructural characterization of 20-month-old alkali-activated slag cements”, *J. Am. Ceram. Soc.*, c. 93, ss. 1741–1748, 2010.
- [90] R. Gabrovšek, T. Vuk and V. Kaučič, “Evaluation of the hydration of Portland cement containing various carbonates by means of thermal analysis”, *Acta Chim Slov*, c. 53, ss. 159-165, 2006.
- [91] M. M. Younes, H. A. A.- Rahman and M. M. Khattab, “Utilization of rice husk ash and waste glass in the production of ternary blended cement mortar composites”, *J. Build. Eng.*, sayı 20, ss. 42–50, 2018.
- [92] A. Schöler, B. Lothenbach, F. Winnefeld and M. Zajac, “Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder”, *Cement and Concrete Composites*, c.55, ss. 374-382, 2015.
- [93] Y. Zhao, J. Gao, Z. Xu, S. Li, X. Luo and G. Chen, “Long-term hydration and microstructure evolution of blended cement containing ground granulated blast furnace slag and waste clay brick”, *Cement and Concrete Composites*, c. 118, ss. 2-7, 2021.
- [94] D. Y. Lei, L. P. Guo, W. Sun, J. Liu, X. Shu and X. L. Guo, “A new dispersing method on silica fume and its influence on the performance of cement-based materials”, *Construction and Building Materials*, c. 115, ss. 716-726, 2016.
- [95] C. E. M. Gomes, O. P. Ferreira and M. R. Fernandes, “Influence of vinyl acetate-versatic vinylester copolymer on the microstructural characteristics of cement pastes”, *Mater. Res.*, c. 8, sayı 1, ss. 51–56, 2005.
- [96] T. Richard, L. Mercury, F. Poulet and L. D’Hendecourt, “Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy as a tool to characterise water in adsorption/confinement situations”, *J. Colloid Interface Sci.*, c. 304, sayı 1, ss. 125–136, 2006.
- [97] M. Y. A. Mollah, W. Yu, R. Schennach and D. L. Cocke, “A fourier transform infrared spectroscopic (FT-IR) investigation of the early hydration of portland cement and the influence of Sodium Lignosulfonate”, *Cem. Concr. Res.*, c. 30, sayı 2, ss. 267–273, 2000.
- [98] M. Bhattacharya and K. V. Harish, “An integrated approach for studying the hydration of portland cement systems containing silica fume”, *Constr. Build. Mater.*, c. 8, sayı 114, ss. 1179–1192, 2018.
- [99] M. Jamil, M. Khan, M. Karim, A. Kaish and M. F. M. Zain, “Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar”, *Constr. Build. Mater.*, c. 128, ss. 185–198, 2016.
- [100] P. Türker ve A. Yeğınobalı, “Farklı puzolanik sistemlerin hidratasyon ürünlerinin karşılaştırılması”, *Çimento ve Bet. Dünyası*, c. 8, sayı 46, ss. 52–66, 2003.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yusuf İslam ŞAHİN

Yabancı Dili : İngilizce

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İnşaat Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	Halen
Y. Lisans	İş Sağlığı ve Güvenliği	Kütahya Dumlupınar Üni.	Halen
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Bülent Ecevit Üni.	2018
Lise	Fen Bilimleri	Arsal Anadolu Lisesi	2014

### YAYINLAR

*Y.İ. Şahin, Y. Koçak, "Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimentoların Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, c. 10, sayı 2, 802-814, 2022.*