

**SİLİS DUMANININ PORTLAND ÇİMENTO HİDRATASYONUNA
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

YASEMİN ERDEM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. YILMAZ KOÇAK**

DÜZCE, 2025

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SİLİS DUMANININ PORTLAND ÇİMENTO HİDRATASYONUNA
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

Yasemin ERDEM 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

Doç. Dr. Ümit YURT

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Batuhan AYKANAT

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 23/06/2025

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.

23 Haziran 2025

Yasemin ERDEM

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Standart çimento deneyleri yapılmasında tezimizi destekleyen Ankara Limak Anka Çimento Fabrikası yöneticileri ve özelinde Ar-Ge ve Kalite Müdürü Sayın Hatice CEBECİ, kalite kontrol şefi Sayın Ayşe Gül KAYAALP, laboratuvar sorumlusu Sayın Hakan ÖZKAN, laboratuvar teknisyenleri Ali Can ŞAHİN, Emine Duru DEMİR, Uğur KAYALI, Servet KÖRİCEKLİ ve İlhami KAHRAMAN'a; XRD, DSC-TGA, FT-IR ve SEM analizleri için Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarı çalışanlarına; numunelerin temin edilmesinde Dost Kimya End. Ham. ve Tic. Ltd. Şti firması Satış Yöneticisi Sayın Fatih DUR'a sonsuz teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi tarafından BAP-2024.06.05.1461 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Düzce Üniversitesi BAP birimine en içten dileklerimle teşekkür ederim.

23 Haziran 2025

Yasemin ERDEM

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	5
2.1.3. Çimentonun Ana Hammaddeleri.....	6
2.1.3.1. Kalker.....	6
2.1.3.2. Kil	6
2.1.3.3. Marn.....	7
2.1.3.4. Alçı Taşı	7
2.1.4. Çimento Ana Hammadde Kompozisyonu	7
2.1.4.1. Silikat Modülü.....	8
2.1.4.2. Hidrolik Modülü.....	8
2.1.4.3. Alümin Modülü.....	9
2.1.4.4. Kireç Doygunluk Modülü.....	9
2.1.5. Çimento Hidratasyonu.....	10
2.1.5.1. C ₃ A Ana Bileşenin Hidratasyonu	11
2.1.5.2. C ₄ AF Ana Bileşenin Hidratasyonu.....	11
2.1.5.3. C ₃ S ve C ₂ S Ana Bileşenlerinin Hidratasyonu.....	12
2.2. PUZOLANLAR	12
2.2.1. Pozolanların Tarihçesi.....	13
2.2.2. Pozolanların Sınıflandırılması	13
2.2.3. Pozolanların Aktivitesi	14
2.2.4. Pozolanik Reaksiyon ve Ürünleri	15
2.2.5. Silis Dumanı.....	16
2.3. ÇALIŞMADA UYGULANAN İLERİ TEKNİK ANALİZLERİ.....	19
2.3.1. X-Işınları Kırınımı	19
2.3.2. Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi.....	20
2.3.3. Termal Analiz.....	21
2.3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu.....	22
3. MALZEME VE YÖNTEM	24
3.1. MALZEME	24
3.2. YÖNTEM	24
3.2.1. Hammaddelerin ve Numunelerin Hazırlanması	25
3.2.2. Deneysel çalışmalar	26
3.2.2.1. Tane Boyut Analizleri.....	26

3.2.2.2. Özgöl Yüzey Alanı Analizleri	26
3.2.2.3. Özgöl Ağırlık Analizleri	26
3.2.2.4. Kimyasal Analizler	27
3.2.2.5. Moleküler Yapı Analizleri	27
3.2.2.6. Mineralojik Analizler	27
3.2.2.7. Mikro Yapı Analizleri	27
3.2.2.8. Termal Analizler	27
3.2.2.9. Standart Kıvamların Tayini	27
3.2.2.10. Priz Sürelerinin Tayini	28
3.2.2.11. Hacim Genleşmelerinin Tayini	29
3.2.2.12. Basınç Dayanımlarının Tayini	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	31
4.1. MALZEMELERE UYGULANAN ANALİZLER	31
4.1.1. Fiziksel Analizler	31
4.1.2. Kimyasal Analizler	32
4.1.3. XRD Analizleri	33
4.1.4. FT-IR Analizleri	33
4.1.5. DTA/TGA Analizleri	34
4.1.6. SEM ve EDS Analizleri	35
4.2. ÇİMENTO HAMURU ÖRNEKLERİNE UYGULANAN DENEYLER	37
4.2.1. Su İhtiyacı Deneyleri	37
4.2.2. Priz Süresi Deneyleri	38
4.2.3. Genleşme Deneyi Sonuçları	39
4.2.4. Hidratasyon Gelişimleri	39
4.2.4.1. XRD Analizi ile Hidratasyon Gelişimleri	39
4.2.4.2. DTA/TGA Analizi ile Hidratasyon Gelişimleri	42
4.2.4.3. Çimento Hamurlarının SEM Analizleri	45
4.3. SİLİS DUMANININ BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ	48
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	50
6. KAYNAKÇALAR	53
ÖZGEÇMİŞ	59

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Deneyde kullanılan silis dumanı malzemesi.	17
Şekil 3.1. DeneySEL prosedür.	24
Şekil 4.1. PÇ'nin tane boyut dağılımları.....	31
Şekil 4.2. PÇ ve SD'ye ait XRD analizleri.	33
Şekil 4.3. PÇ ve SD'nin FT-IR spektroskopisi.....	33
Şekil 4.4. PÇ ve SD'nin DTA/TGA analizleri.....	34
Şekil 4.5. PÇ'nin SEM ve EDS analizleri.	35
Şekil 4.6. SD'nin SEM ve EDS analizleri.	36
Şekil 4.7. Çimento hamurlarının su ihtiyaçları.	37
Şekil 4.8. Çimento hamurlarının priz süreleri.....	38
Şekil 4.9. Çimento hamurlarının genleşme değerleri.	39
Şekil 4.10. Çimento hamurlarının XRD analizleri.	40
Şekil 4.11. Çimento hamurlarının FT-IR spektrumları.....	41
Şekil 4.12. Çimento hamurlarının DTA/TGA analizi.....	43
Şekil 4.13. Farklı sıcaklıklara ait çimento hamurlarının ağırlık kayıpları.	44
Şekil 4.14. Referans çimento hamurunun SEM/EDS görüntüsü.	45
Şekil 4.15. 2,5SD kodlu çimento hamurunun SEM/EDS görüntüsü.	45
Şekil 4.16. 5SD kodlu çimento hamurunun SEM/EDS görüntüsü.	46
Şekil 4.17. 7,5SD kodlu çimento hamurunun SEM/EDS görüntüsü.	46
Şekil 4.18. 10SD kodlu çimento hamurunun SEM/EDS görüntüsü.	47
Şekil 4.19. Çimento harçlarının basınç dayanımları.....	48

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. PÇ ve SD ikameli harç numunelerinin kodları ve miktarları.	25
Çizelge 4.1. PÇ ve SD'ye ait fiziksel özellikler..	32
Çizelge 4.2. PÇ ve SD'ye ait kimyasal özellikler.....	32



KISALTMALAR

AM	Alümin modülü
ATR	Zayıflatılmış toplam yansıma
C ₂ S	Belit
C ₃ A	Trikalsiyum alüminat
C ₃ S	Alit
C ₄ AF	Tetrakalsiyum alümina ferrit
C-A-H	Kalsiyum alüminat hidrat
CH	Kalsiyum hidroksit (Portlandit)
CO ₂	Karbondioksit
CS	Kalsiyum silikat
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
DTA	Diferansiyel termal analiz
EDS	Enerji dağılımlı spektrometre
ESEM	Çevresel taramalı elektron mikroskobu
FT-IR	Fourier transformlu kızılötesi spektroskopi
HM	Hidrolik modül
LSF	Kireç doygunluk faktörü
PÇ	Portland çimento
R	Referans çimento
SD	Silis dumanı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SM	Silikat modülü
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
TGA	Termogravimetrik analiz
TMA	Termo-mekanik analiz
XRD	X ışını kırınımı
XRF	X ışını floresan spektrometresi

SİMGELER

°C	Santigrat derece
μ	Mikron
μm	Mikrometre
cm	Santimetre
g	Gram
mg	Miligram
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N	Newton
nm	Nanometre
Pa	Pascal
α	Alfa
β	Beta
θ	Radyasyon açısı
λ	Dalga boyu

ÖZET

SİLİS DUMANININ PORTLAND ÇİMENTO HİDRATASYONUNA VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Yasemin ERDEM

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

Haziran 2025, 61 sayfa

İnşaat sektörü, nüfus artış oranına paralel olarak hızla büyümektedir. Bu büyümeyle birlikte beton ve betonun önemli bir bileşeni olan çimento ihtiyacı da her geçen gün daha fazla artmaktadır. Portland çimento üretimi küresel karbondioksit emisyonlarının %5-7'sinden sorumludur ve ekolojik dengeye önemli ölçüde zarar vermektedir. Ayrıca endüstride tüketilen enerjinin yaklaşık %5'i çimento üretimindedir. Bu yüzden hem ciddi çevresel endişeler hem de enerji maliyetlerini azaltmak için çimento üzerine araştırmalar yoğun olarak devam etmektedir. Bu araştırmalar özellikle endüstriyel atık olarak değerlendirilen puzolanik malzemelerin çimento ikame malzemesi olarak kullanılması üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu malzemelerden biri olan silis dumanı, çimento ve betonun genel performansını önemli ölçüde artırması sebebiyle en çok araştırılan yüksek kaliteli tamamlayıcı çimento malzemeleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, silis dumanı ikameli çimentoların hidratasyon reaksiyonları ve mekanik özellikleri araştırılacaktır. Çalışmanın ilk bölümünde silis dumanı ve CEM I 42,5 R tipinde Portland çimentosunun fiziksel, kimyasal, mineralojik, moleküler ve mikro yapı karakterizasyonları tespit edilmiştir. İkinci aşamada Portland çimento içerisine ağırlıkça %0, %2,5, %5, %7,5 ve %10 oranlarında silis dumanı ikame edilerek 5 tip çimento hazırlanmıştır. Üçüncü aşamada bu çimentolarla üretilen hamurların standart çimento deneyleri ile su ihtiyaçları, priz süreleri ve hacim genleşmeleri belirlenmiştir. Dördüncü aşamada bu hamurların 28. gündeki hidratasyon mekanizmaları X-ışını kırınımı, fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi, eş zamanlı termal analiz, taramalı elektron mikroskopu ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi gibi ileri analitik tekniklerle incelenmiştir. Son aşamada 2., 7., 28. ve 90. günlerde çimento harçlarının basınç dayanımları belirlenmiştir. Sonuçlar, harçların basınç dayanımlarının tüm hidratasyon yaşlarında silis dumanı ikamesiyle iyileştirilebileceğini göstermiştir. Bu durum, nano boyutlu parçacıklara ve geniş yüzey alanına sahip silis dumanının, C₃S ve C₂S'nin hidratasyonunu ve kalsiyum silikat hidrat fazının oluşumunu desteklemesinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte silis dumanı ile serbest kireç reaksiyona girerek ilave kalsiyum silikat hidrat jeli oluşturarak çimentolu kompozitlerin mikro yapısını yoğunlaştırmış ve boşlukları azaltmıştır. Bu bulgular, silis dumanının Portland çimentosuna ikame edildiğinde, çevre dostu, uygun maliyetli ve sürdürülebilir bir çözüm sağlanabileceğini göstermektedir. Ayrıca %10 oranında silis dumanı ikamesi ile üretilen çimentoların, bir üst dayanım sınıfı olan 52,5 R tip çimentonun tüm gereklerini karşıladığı standart deneyler sonucunda belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Mekanik Özellikler, Mikro Yapı, Mineralojik Yapı, Moleküler Yapı, Portland Çimento, Silis Dumanı, Termal Davranışlar.

ABSTRACT

EFFECTS OF SILICA FUME ON PORTLAND CEMENT HYDRATION AND MECHANICAL PROPERTIES

Yasemin ERDEM

Düzce University

Graduate School, Department of Civil Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

June 2025, 61 pages

The construction sector is growing rapidly in parallel with the population growth rate. With this growth, the need for concrete and cement, which is an important component of concrete, is increasing day by day. Portland cement production is responsible for 5-7% of global carbon dioxide emissions and significantly harms the ecological balance. In addition, approximately 5% of the energy consumed in the industry is from cement production. Therefore, research on cement continues intensively in order to reduce both serious environmental concerns and energy costs. This research focuses especially on the use of pozzolanic materials, which are considered as industrial waste, as cement replacement materials. One of these materials, silica fume, is among the most researched high-quality supplementary cement materials due to its significant increase in the general performance of cement and concrete. In this study, the hydration reactions and mechanical properties of silica fume-substituted cements will be investigated. In the first part of the study, the physical, chemical, mineralogical, molecular and microstructure characterizations of silica fume and CEM I 42.5 R type Portland cement were determined. In the second stage, 5 types of cement were prepared by substituting silica fume into Portland cement at the rates of 0%, 2.5%, 5%, 7.5% and 10% by weight. In the third stage, water requirements, setting times and volume expansions of the pastes produced with these cements were determined by standard cement tests. In the fourth stage, the hydration mechanisms of these pastes on the 28th day were investigated by advanced analytical techniques such as X-ray diffraction, fourier transform infrared spectroscopy, simultaneous thermal analysis, scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy. In the last stage, the compressive strengths of the cement mortars on the 2nd, 7th, 28th and 90th days were determined. The results showed that the compressive strengths of the mortars could be improved by substituting silica fume at all hydration ages. This is due to the fact that silica fume, with its nano-sized particles and large surface area, supports the hydration of C_3S and C_2S and the formation of calcium silicate hydrate phase. However, silica fume and free lime reacted to form additional calcium silicate hydrate gel, thus densifying the microstructure of cementitious composites and reducing voids. These findings show that when silica fume is substituted for Portland cement, an environmentally friendly, cost-effective and sustainable solution can be provided. In addition, it has been determined as a result of standard tests that cements produced with 10% silica fume substitution meet all the requirements of the 52.5 R type cement, which is a higher strength class.

Keywords: Mechanical Properties, Microstructure, Mineralogical Structure, Molecular Structure, Portland Cement, Silica Fume, Thermal Behavior.

1. GİRİŞ

İnşaat sektörü, nüfusun artışına paralel olarak hızla büyümektedir. Bu büyümeyle birlikte beton ve betonun önemli bir bileşeni olan çimento ihtiyacı da her geçen gün daha fazla artmaktadır. Küresel olarak toplam Portland çimento (PÇ) üretimi yaklaşık 4,1 milyar tondur ve küresel bazda endüstride tüketilen enerjinin yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır [1], [2].

PÇ'nin 1 ton üretimi için 0,8-1 ton arasında karbondioksit (CO_2) açığa çıkarak küresel ısınmaya neden olarak ekolojik dengeye zarar vermektedir [3].

Çevresel endişeler nedeniyle, CO_2 emisyonlarını ve enerji maliyetlerinin azaltmak için özellikle çimento teknolojisinde birçok bilim insanı yoğun olarak araştırmalarına devam etmektedir. Bu çalışmalarda uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi endüstriyel yan ürünlerin çimentolu malzemeler içerisinde kullanımı ile atıkların bertarafı ve doğal kaynakların korunması için de yoğun çaba harcanmaktadır. Aynı zamanda bu endüstriyel atıkların kullanımıyla hem çimento hem de betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerine önemli katkılar sağlamaktadır [4], [5], [6], [7], [8], [9].

Bu malzemelerden biri olan silis dumanı, betonun genel performansını önemli ölçüde arttırması sebebiyle en çok araştırılan yüksek kaliteli tamamlayıcı çimento malzemeleri arasında yer almaktadır. Silis dumanı (SD), silisyum metalinin ya da ferrosilisyum alaşımlarının elektrik ark fırınlarının üretiminden ortaya çıkan atık üründür. SD'nin Blaine değeri 13000 ile 30000 m^2/kg , ortalama boyutu 0,1-0,30 μm küresel parçacıklar içeren ve esas olarak amorf silisyum dioksitten oluşan ultra ince bir tozdur [10], [11].

Aşırı inceliği ve yüksek silika içeriği nedeniyle SD, oldukça etkili bir puzolanik malzemedir. Bu nedenle SD kullanımıyla betonun basınç dayanımının ve aşınma direncinin iyileştirildiği; geçirgenliğinin azaltıldığı ve bu nedenle betonarme çeliğinin korozyondan korunmasına yardımcı olunduğu ifade edilmektedir [11].

SD'nin çimento hamurlarındaki kalsiyum hidroksit ile hızlı bir şekilde reaksiyona girebileceğini, çimento hamurlarındaki alkali konsantrasyonunu ve alkali-agrega reaksiyonunun etkisini azaltabileceği belirtilmektedir [12].

Amorf silika, PÇ'nin hidratasyonu ile üretilen kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyonu sonucunda ilave kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli oluşturabilir. Dolayısıyla CH miktarının azaltılması ve C-S-H'nin daha yüksek miktarlarda üretilmesi, çimentolu kompozitlerin dayanım ve dayanıklılığının iyileştirilmesine etkili bir şekilde katkıda bulunmaktadır [13], [14].

Çimentolu kompozitlerin özelliklerine bu önemli katkılarının yanı sıra SD'nin herhangi bir karbon ayak izinin olmaması ve yeşil malzeme olarak değerlendirilmesi de önemlidir [10].

Bu önemli avantajları nedeniyle SD ikameli çimento esaslı kompozitlerin özellikle hidratasyon reaksiyonlarının izlenebilmesi için literatürde çok sayıda araştırmaya rastlanmaktadır. Bunun nedeni, SD ikameli kompozitlerin hidratasyon reaksiyonları sonucunda yapılarında meydana gelen değişimlerinin, malzemelerin fizikokimyasal özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermesidir. Son yıllarda gerçekleştirilen araştırmalarda, hidratasyon reaksiyonları sonucundaki fizikokimyasal özelliklerdeki değişimlerin de belirlenmesi, yani hem dayanım hem de dayanıklılık özelliklerini etkileyen reaksiyonların tespitinin önemi vurgulanmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucunda değişim özelliklerinin tespiti için de standart çimento deneylerinin yanı sıra taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM/EDS), fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), eş zamanlı termal analiz (DTA/TGA), X-ışını kırınımı (XRD) gibi ileri analitik tekniklerden yararlanılmaktadır. Bu tekniklerden yararlanılarak puzolanik özellikteki malzemelerin davranışlarının hangi şekilde gerçekleştiği rahatlıkla anlaşılabilmektedir. Ancak bu teknikler ülkemizde bir bütün olarak çok fazla kullanılmamaktadır. Dolayısı ile bu çalışmanın amacı; bu analiz yöntemleriyle çimento veya katkı çimentoların hidratasyon reaksiyonlarının bir bütün olarak araştırılması ve meydana gelen reaksiyonların belirlenmesidir. Bu amaçla gerçekleştirilen araştırmada; CEM I 42,5 R tipindeki PÇ ve inşaat teknolojisinde üstün özelliklere sahip endüstriyel bir atık olan SD ikamesi ile elde edilecek çimentoların özellikleri kapsamlı olarak irdelenecektir. Bu bağlamda gerçekleştirilen tez çalışması beş temel bölümü kapsamaktadır.

Birinci bölüm, çalışmanın önemini, amacını ve neler yapıldığını kapsayan “Giriş” başlığından oluşmaktadır.

İkinci Bölümün ilk etabında “Çimento” başlığı adı altında çimento tanımı, çimento

tarihçesi, çimentoyu oluşturan ana hammadde içerikleri, çimento ana hammadde kompozisyonu ve çimento hidratasyonu hakkında bilgiler verilmektedir. İkinci etabında puzolanlar, tarihçesi, sınıflandırması ve reaksiyonları hakkında bilgiler verildikten sonra çalışmada kullanılan SD ele alınmıştır. Üçüncü etapta ise hammaddelerin ve hidratasyon sırasında ortaya çıkan reaksiyon ürünlerini izleyebilmek için hazırlanan çimento hamurlarının incelenmesinde kullanılan SEM/EDS, FT-IR, DTA/TGA ve XRD gibi ileri analitik teknikler hakkında bilgilere yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde kullanılan malzemeler, özellikleri ve uygulanan deney yöntemleri ve aşamalarına yer verilmektedir. Bu bölümün ilk etabında yer alan “Malzeme” başlığında; kullanılan çimento, SD, agrega ve karışım suyunun nereden elde edildiği belirtilmiştir. İkinci etapta “Yöntem” başlığında; hammaddelerin hazırlanması, hammaddelere uygulanan analizler, deneysel çalışmaların yöntemleri, çimento hamur ve harçları hakkında bilgiler yer almaktadır.

Dördüncü bölümün ilk etabında, çalışmada kullanılan PÇ ve SD’nin fiziksel, kimyasal, mineralojik, moleküler ve mikro yapı özellikleri ilgili analiz teknikleriyle tespit edilmiştir. İkinci etabında, PÇ içerisine ağırlıkça %0, %2,5, %5, %7,5 ve %10 oranlarında SD ile ikame edilen çimento hamurlarının su ihtiyaçları, priz süreleri, hacim genleşmeleri belirlenmiştir. Daha sonra referans ve SD ikameli çimento hamurlarının XRD, FT-IR, DTA/TGA, SEM/EDS gibi ileri analitik tekniklerle hidratasyon reaksiyonları tespit edilmiştir. Üçüncü etapta ise 2, 7, 28 ve 90. hidratasyon günlerinde hidratasyona tabi tutulan çimento harçlarının basınç dayanım değerleri belirlenmiştir.

Beşinci ve son bölümün ilk etabında hammaddelerin tanımlanması ve özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili sonuçlar bir bütün halinde sunulmuştur. İkinci etabında çimento hamurları üzerinde yapılan deney ve analizlere göre elde edilen sonuçlar özet olarak ifade edilmiştir. Üçüncü aşamada ise çimento harçları üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanım sonuçlarıyla ilgili veriler ele alınmıştır. Sonuç etabında ise SD’nin çimentoya ikame edilmesiyle elde edilen verilerin genel değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ÇİMENTO

Bu bölümdeki çimento başlığı adı altında sırasıyla çimento tanımı, çimento tarihçesi, çimentoyu oluşturan ana hammaddeler ve çimento ana hammadde kompozisyonu içeriklerini açıklayacak ve son başlıkta çimento hidratasyonu ile ilgili bilgiler verilmektedir.

2.1.1. Çimentonun Tanımı

Çimento, su ve havayla etkileşimi sonucunda sertleşen, sertleşme sonrasında belirli bir dayanıma sahip hidrolik bir bağlayıcıdır [15].

Çimento üretimi; hammaddenin hazırlanması, pişirilmesi ve ilave katkı maddeleriyle birlikte öğütülmesi gibi üç aşamada gerçekleşmektedir. Hammadde karışım miktarı, %20-25 kil, %75-80 kalker ve gerekli görüldüğünde diğer hammaddelerden oluşmaktadır. Karışımdaki kilden yaklaşık %21-22 oranında SiO_2 , %6-7 oranında Al_2O_3 ve %6-7'si Fe_2O_3 elde edilmektedir. Kalkerden ise yaklaşık %64-65 oranında CaO elde edilmektedir. Kalker kil ve/veya diğer hammaddeler uygun oranlarda karıştırılarak ince olacak şekilde öğütülmektedir. Öğütülen bu hammadde karışımı “farin” kelimesi ile adlandırılmaktadır. Döner fırından gelen yanmış olan gazlar, yüksek ısıya ulaşarak hammaddeleri kurutup, farinin nem oranını %1'e kadar düşürmektedir. Döner fırın içindeki farin, fırın çıkışı tarafında bulunan alev borusu aracılığıyla toz halinde kömür, fueloil veya doğal gaz gibi fosil yakıtlar ile 1450°C civarında pişirilir. Döner fırınlardaki kalsinasyon işlemi, yüksek sıcaklıkla karbonat ve hidratları parçalayarak oksit bileşenlerini ortaya çıkarır. Kalsit minerali birçok aşamalardan geçerek kimyasal reaksiyon sonucunda serbest kirece dönüşür. Bu esnada farin içerisindeki CO_2 uzaklaşır. Karışımdaki oksitler ilk etapta serbest hale gelir, sonrasında sıcaklık arttıkça yeni kristal ürünler oluşmaya başlar. Fırın içerisindeki malzemeler, dışarı doğru akmakta ve çıkışa yaklaştıkça sıvılaşmaya başlamaktadır. Fırın çıkışında ince taneler birleşerek büyük klinker tanelerini oluşturmaktadır. Fırında, klinkerler soğutma ünitelerinde ani olarak soğutulurken klinker stok holünde stoklanır. Çimentonun üretilmesinde kullanılan diğer madde ise alçıtaşıdır. Klinkerler, değirmende alçıtaşı ile birlikte öğütülerek çimentoyu meydana getirmektedir. Ayrıca farklı tip çimentoların elde edilmesinde mineral katkı adı verilen silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, tras, zeolit gibi malzemelerden de

faaydalanılmaktadır. Klinkere ögütme sırasında sadece alçıtaşı katılırsa üretilen çimento “Portland Çimento”, diğerkatkılar eklenirse “Katkılı Çimento” denilmektedir [16].

2.1.2. Çimentonun Tarihçesi

İnsanoğlunun en temel ihtiyaçlarından biri barınmadır. İnsanoğlu barınma ihtiyacını karşılayabilmek için göçebe hayatıyla birlikte yeni yerler de keşfetmiştir [17].

Romalı mimar-mühendis Marcus Vitruvius Pollio birçok eser yazmıştır. Eserlerinden biri olan “De Architectura” adlı eserinde, insan katkısıyla şekil verilerek oluşturulan küçük taş birliğine çimentonun Latince kökeni “caementum” sözcüğünden bahsedilmiştir. Vitruvius, eserinde çimentonun o dönemdeki büyük binaların yapısında bağlayıcı özelliğı kullanılmak istenilerek yapıldığını anlatmaktadır. O dönemdeki duvarların birleştirilmesinde çimento yerine alçı ve kireç kullanılmıştır. İlk bağlayıcı maddeler çimentodan önce alçı ve kireç olmuştur [18].

Göçebe hayat, sürekli değışen iklim koşulları ve yer şekillerinin farklılaşmasıyla daha da zor bir hale gelmiştir. Bu durumlar insanoğlunu yeni ve yaşanılabilir konutlar yapmaya yönlendirmiştir. 1824 yılında Joseph Aspdin (duvarcı ustası) tarafından geleceğeyön verecek bir malzeme keşfedilmiştir. Karışımı doğal killi kalkerden oluşturmak yerine tamamını kil ve kalker kullanılarak oluşturmuştur. Karışım, yüksek sıcaklığa sahip fırında pişirildikten sonra öğütölerek dayanımı ve dayanıklılığı yüksek olan bir bağlayıcı olarak keşfedilmiştir. Bağlayıcının rengi, karışımın ortaya çıktığı Portland yarımadasındaki doğal killi kalkeri andırmasından dolayı ‘Portland Çimento’ ismiyle ifade edilmiş ve patenti 1824 yılında alınmıştır. İlk çimento fabrikası ise 1848 yılında İngiltere’de kurulmuştur. Çimento üretimi için fabrika kurulurken ham maddelerin temini, alım şekli, maliyeti gibi konularda gerekli araştırma ve çalışmalar yapılmalıdır. Türkiye’nin çimento sektörüne girmesi, 34 yıl gecikmeyle de olsa 1910 yılında özel bir sektörle başlamıştır [17].

Ülkemizde çimento sektörü 55 entegre fabrika ve 21 ögütme tesisi olmak üzere toplamda 76 çimento üretim tesisiyle faaliyetini sürdürmektedir [15]. Çimento, çağımızda kullanılan temel inşaat malzemelerinin en önemlilerinden birisidir [19].

Çimento, artan nüfusla ve teknolojinin de gelişmesiyle birlikte hayatımızda vazgeçilemeyen bir bağlayıcı olmuştur ve yapı sektöründe ana hammaddelerden biri olduğundan yaygın olarak kullanılmaktadır [16].

2.1.3. Çimentonun Ana Hammaddeleri

Çimento, marn ve/veya kalker, kil gibi malzemelerin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle elde edilen klinkerin alçı taşıyla birlikte öğütülmesiyle üretilen hidrolik bir bağlayıcıdır [20]. Çimento hammaddeleri hakkında sırasıyla kalker, kil, marn ve alçıtaşı olmak üzere bu bölümde açıklanmaktadır.

2.1.3.1. Kalker

Doğada kalker, kalsiyum karbonat olarak yer almaktadır. Klinker de bulunan kalsiyum oksit, bu bileşenden elde edilmektedir. Kimyasal tepkimesinde en az %90 kalsiyum karbonat içeriğine sahip olan kayalar kireç taşı veya kalker denilmektedir. Doğadaki işlenmemiş haline kalsit denilmektedir [21].

Kalkerler doğada yaygın olarak bulunan, temini de oldukça kolay ve ekonomiktir [22].

Kalkerler sık yapılı, ince taneli ve çoğunluğu kalsit kristallerinden oluşmuştur. Kalkerlerin özgül ağırlığı $2,5-2,7 \text{ g/cm}^3$, sertlik derecesi 3, rengi ise genellikle açık sarı ile kahverengi arasında bir renk skalasına sahiptir [21].

Kalkerden çimentonun kimyasal yapısındaki CaO bileşeni elde edilmektedir. Çimento üretiminde kalkerin kimyasal özelliklerinden daha da önemlisi üretim yapılan tesise yakın olmasıdır. Üretim aşamasında kırma, ezme ve pişirme işlemlerinin basit olması ve hızlı olması önemlidir [23].

2.1.3.2. Kil

Çimento içeriğinde önemli temel hammaddelerden biri kildir [21].

Kil, kimyasal etkileşimlerde hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlar bulunan doğal bir ikincil mineraldir. İnşaat mühendisliğinde temel malzeme olarak, killerde genel olarak dört özellik ön plana çıkmaktadır. Bunlar: kohezyon, plastisite, renk ve rötre. Killer su ile temasında şişen; ısı ile kurduğunda büzülen bir malzemedir [24].

Kil minerali, kimyasal tepkimelerdeki alüminyum oksitin bulunmasını ve sulu alüminyum silikatların da ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Çimentoda hammadde olarak kullanılacak kilin kimyasal analizinde Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O , Na_2O , SO_3 ve kızdırma kaybı yüzdeleri belirlenmektedir. Kilin mineralojik özelliklerini belirlenmesi için yapılan XRD analizlerinde kilin mineralleri ve safsızlıkları belirlenmektedir [25].

2.1.3.3. Marn

Marn, doğada kil ve kalkerin bir arada olduğu bir malzeme oluşumu olup, %35-85 kil ve %15-65 kalker oranlarından oluşmaktadır [25].

Marn, kalsiyum ve silikat mineralleri içeren bir sediment kayasıdır. Marn, klinker yerine alternatif bir hammadde olarak da kullanılabilir. Marnın mineral içeriği, çimentonun hidratasyon reaksiyonlarında çok önemli bir rol oynar ve çimentonun sertleşmesini hızlandırır. Ayrıca, marnın içerisindeki mineraller matris oluşturarak, çimentonun dayanımını ve dayanıklılığını artırır. Marnın içeriğinde bulunan kalsiyum karbonat mineralleri, çimento üretim aşamasında kullanılan kireç taşı hammaddesindeki kalsiyum karbonat mineralleri ile benzerdir. Marn, çimento üretiminde oluşan hidratasyon reaksiyonlarında etkin rol oynamaktadır [26].

2.1.3.4. Alçı Taşı

Alçı taşı (jips) dünya çapında çok geniş yataklara sahiptir. Türkiye’de de farklı bölgelerde alçı taşı yatakları bulunmaktadır ve bu yataklar milyonlarca ton rezervlere sahiptir. Alçıtaşı, kimyasal formülü kalsiyum sülfat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) olan bir mineraldir. Alçıtaşının birçok kullanım alanı vardır. Bu alanlar çimento sanayisi başta olmak üzere farklı özelliklerde alçı üretimi, kimya sanayisi, dişçilik, tıp ve tarım alanları gibi sıralanabilmektedir. Alçı taşının üretimi kuyu-galeri veya açık işletme şeklinde gerçekleştirilebilmektedir. Ocaktan gelen cevherlerin işlenmemiş ve istenilen boyutlarda olmaması, kırıcılarla cevherlerin istenilen boyutlara indirilip sonrasında fırında maksimum 160°C sıcaklıkta 2-3 saat ısıtılarak elde edilmesiyle oluşur. Isıtılan alçı taşı soğutulup istenen boyutlarda öğütülmektedir [27].

2.1.4. Çimento Ana Hammadde Kompozisyonu

Çimento klinkeri, kalker ve kilin uygun miktarlarda karıştırılarak öğütülmesiyle elde edilen, farinin döner fırında uygun sıcaklıkta sinterleşmeye kadar pişirilmesiyle ortaya çıkmakta ve CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşenlerinden oluşmaktadır. Çimentoyu oluşturan bu bileşenler klinker üretimi esnasında yüksek sıcaklıkta birbiriyle etkileşime girerek C_3S ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), C_2S ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), C_3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) ve C_4AF ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) ana bileşenlerini oluşturmaktadır. Çimento üretiminde priz süresini ayarlamak için klinker ile uygun oranda (%3-6) alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) birlikte öğütülmektedir. Ancak çimentonun içindeki her bir bileşenin belli sınırlar ve oranlar içinde tutulması gerekmektedir. Klinker bileşimi sonucunda bulunan bu oksitler, stokiyometrik değerlere,

klinkerin fırında kızdırılma sıcaklığına ve fırın çıkışında soğutma derecesine bağlı olarak farklı oranlara sahip kalsiyum silikat ve alüminyum silikat bileşenlerini oluşturmaktadır [28].

Klinkerin kalitesini tespit edebilen silikat modülü, hidrolik modülü, alümin modülü ve kireç doygunluk modüllerinin tanımları, formülleri ve etkileri başlıklar halinde aşağıda sunulmaktadır.

2.1.4.1. Silikat Modülü

Silikat modülü (SM), fırın içerisindeki katı faz miktarının sıvı faz miktarına oranı olarak Denklem 2.1’de gösterilmiştir [29].

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

Silikat modülü hammadde türüne göre 1,2-4 arasında değerler alabilmektedir. Tercih edilen değer 2-2,5 aralığında değişmektedir [29].

Klinkerin kalitesini SM belirlemektedir [19].

SM’nin ideal değerden çok yüksek olması durumunda, döner fırındaki pişme işleminin yetersiz olması ve daha çok yakıt tüketilip, sinterleşmenin daha zor olmasına neden olmaktadır. Ayrıca uygun olmayan SM değeri, çimentonun priz ve dayanım süresinin daha yavaş olmasına yol açmaktadır. Bu durumların aksine ideal oranlar ve kolay sinterleşme olması halinde dayanım ve priz süresi daha hızlı meydana gelmektedir [21], [29].

2.1.4.2. Hidrolik Modülü

PÇ’nin kimyasal bileşimindeki kireç yüzdesi ile silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit yüzdelерinin toplamına oranlaması sonucu hidrolik modül (HM) oluşmaktadır (Denklem 2.2) [21], [29].

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

HM, ağırlıklı olarak 1,7-2,3 arasında değerler almaktadır. Çimentolarda çoğunlukla 2 civarındadır. HM değeri 1,7’den küçük olan çimentoların dayanımı da düşük çıkmaktadır. HM değeri yükseldikçe klinker için yeterli gelen sıcaklık değeri, ortaya çıkan çimentonun

erken dayanımı ve hidratasyon ısını arttırmaktadır. Tüm bu artışlar sırasında kimyasal etkilere karşı olan direnç azalmaktadır [21], [29].

2.1.4.3. Alümin Modülü

Alümin modülü (AM), alüminyum oksitin, demir oksite oranı olarak tanımlanmaktadır (Denklemler 2.3) [21].

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

Klinkerin kalitesini ortaya çıkarmak ve maliyeti düşük olacak şekilde sinterleşmeyi sağlamak için AM 1,3-1,6 arasında olmalıdır [21], [30].

AM oranının düşük olması, çimentoyu oluşturan bileşiklerin düşük ısılarda ortaya çıktığını ifade etmektedir. Düşük ısılarda kullanılan bileşiklerin yakıt miktarı da daha düşük olmaktadır. Modül oranının yüksek olması kullanılan yakıt miktarının artmasını, pişirme olayının ise daha da zor olacağını göstermektedir. Demir oranı yükseldikçe klinkerin sertlik ve yoğunluğu artmaktadır. Klinkerin sertliğinin artması, öğütmenin zorlaşması ve dolayısı ile maliyetin artmasına neden olmaktadır [21].

2.1.4.4. Kireç Doygunluk Modülü

Çimento üretiminde istenen, kalitesi yüksek olan ve içerik olarak trikalsiyum silikat (C_3S) içeren klinkerin olmasıdır. CaO miktarı düzgünce hesaplanmalı ve çimenton üretiminde en çok dikkat edilmesi gereken kimyasal bir oksittir. Kireç doygunluk modülü (LSF) faktörünün oranının karışımda yüksek çıkması, yakıt miktarını ve bunun sonucunda yapılmak istenen sinterleşmeyi de etkilemektedir. Pişmemiş kireç miktarı olması gereken miktardan fazlaysa, ilk dayanımların yüksek ve ani hacim genleşmelerinin artmasına yol açmaktadır. Çimento dayanımlarının ilk zamanlarda düşük olması içeriğindeki C_3S oranının düşük, dikalsiyum silikat (C_2S) oranının ise yüksek olması durumundan kaynaklanmaktadır [29].

Klinkerin kireç doygunluğunun gerçekleşmesi için çimento içerisindeki SiO_2 oranı tamamıyla C_3S , aynı orana sahip olan Fe_2O_3 ise aynı orandaki Al_2O_3 ile tetrakalsiyum alümina ferrit (C_4AF) oranında, geri kalan Al_2O_3 ise trikalsiyum alüminat (C_3A) ile bağlanmasıyla oluşmaktadır. Çimento üretimindeki LSF'nin uygun oranlara sahip olması gereken değerler 0,85-0,90 arasındadır. LSF oranı 0,90 değerinden daha yüksek bir orana sahip ise çimento içerisinde serbest kirecin mevcut olduğu anlaşılmaktadır. Serbest kireci,

C₃S ve C₂S miktarı etkilemektedir [30]. LSF formülü Denklem 2.4'te verilmektedir [21].

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

2.1.5. Çimento Hidratasyonu

Çimento ve su malzemesinin birleşmesiyle hidratasyon olarak adlandırılan kimyasal reaksiyon hızlıca başlamaktadır. Çimento hidratasyonu tepkimeler dizisini oluşturmaktadır. Hidratasyon seviyesinin istenilen düzeyde gerçekleşmesi su miktarına ve sıcaklık derecesine bağlıdır. Reaksiyon esnasında açığa çıkan ısı, üretimi ve üretimin yapıldığı ortamda önemli sonuçlara sebep olmaktadır. Bundan dolayı oluşacak tüm reaksiyonlar ve bunların ortaya çıkaracakları etkiler iyi bilinmelidir. Çimentonun tane çapının iri olması, su ile karşılaştığında yavaşça çözünmesine neden olmaktadır. Çözeltiye sonradan dahil olan klinker, bileşiklerin su ile temasını engellemektedir. Klinkerin doygun hale gelmesiyle ile hidratasyon hızı ve çözünme hızı azalmaktadır. Hidratasyon uzun bir zaman periyodunda gerçekleşmektedir. Bu durumu örnekleyecek olursak, 50 µm tane çapında bir klinker yaklaşık 5 yılda hidrate olmaktadır [31].

Çimento hamuru ilk birleşimde plastik durumdadır. Çimento hamuru zamanla daha az plastik duruma gelerek sertleşmekte yani priz almaktadır. Priz alma durumundan sonra sertleşmiş çimento hamuruna dönüşmektedir. Çimento prizini tamamladıktan sonra bile reaksiyon hızı yavaşta olsa uzun süre devam etmektedir. Çimento hamuru, betonun içerisinde yer alan agrega tanelerinin birbirlerine temas ettikleri yerlerde oluşan boşlukları doldurmaktadır. Çimento hamuru, küçük boşlukları doldurduktan sonra tanelerin tek bir bütün halinde davranmasını sağlamaktadır. Hidratasyon olayında zaman faktörü oldukça önemlidir. Hidratasyonun gerçekleşme süresi dayanım kazanma süresini de etkilemektedir [32].

Çimento hamuru çok akışkandır ve çimento taneleri su içerisinde askı durumundadır. Karışımın su miktarına göre taneler arasındaki uzaklıklar değişiklik göstermektedir. Çubuk formundaki etrenjit adı verilen yapılar ve iğne şeklinde C-S-H jelleri çimento tanelerinin yüzeyinde oluşmaktadır. Çimento hamuru, ilk hidratasyonun tamamlanmasıyla birlikte priz süresinin sonlanmasıyla sertleşmiş bir hamur haline dönüşmektedir. Hidratasyonun yaklaşık üçüncü gününde çimento hamuru yüksek derecede dayanım kazanmıştır. Çimento hamuru ilerleyen süreçte yoğunlaşmaya devam

edecektir. Hidratasyon esnasında her bir bileşen su ile ayrı ayrı tepkimeye girmekte ve C_3A , C_4AF , C_3S ve C_2S ana bileşenleri oluşmaktadır [31]. Bu bileşenler ile ilgili açıklamalar başlıklar halinde verilmektedir

2.1.5.1. C_3A Ana Bileşenin Hidratasyonu

C_3A bileşeni su ile hızla reaksiyona girdiğinden ortaya çıkan ısı oldukça yüksektir. Reaksiyon sonucunda C_4AH_{14} ve C_2AH_8 gibi ürünler ilk aşamalarda oluşmaktadır. Bu ürünlerin kararlı olması beklenir, fakat kararlı olmadığında $C_3A+6H \rightarrow C_3AH_6$ ürününe dönüşebilmektedir. Dönüşüm, işlenebilme özelliğinin de kaybedilmesine neden olan ani prize neden olmaktadır. Beton, plastik kıvamdaki yapısını kaybettiğinden, ortaya çatılma ve dayanım problemleri çıkar. Bu problemleri kaldırabilmek için öğütme aşamasında klinkerin içerisine alçı taşı eklemek yeterli olacaktır. C_3A ile alçı taşı hidratasyonunda etrenjit ($C_3A+3CSH+26H \rightarrow C_6AS_3H_{32}$) ortaya çıkmaktadır. Etrenjit, görünüm olarak hegzagonal yapıda kısa iğnemsî çubuklar şeklinde kristalleşmektedir. Etrenjit, çimento hamurunda hacim genişlemesini ortaya çıkarır [29].

Reaksiyonların ilerlemesiyle ortamdaki sülfat oranı düşmekte, C_3A hidratasyonu neticesinde etrenjit, monosülfat hidrata ($C_6AS_3H_{32}+2C_3A+4H \rightarrow 3C_4ASH_{12}$) dönüşmektedir. Hidratasyonun ileri günlerinde çimentonun yapısında monosülfat bulunmaktadır. Etrenjitten dolayı bir miktar hacim genişmesi görülür. Ancak bu durum çimentonun plastik kıvamında olduğu için sorun teşkil etmemektedir. Sülfat, betonun sertleşme süresinin tamamlanmasının ardından ortama dahil olmakta ve monosülfat hidrat etrenjite dönüştüğünde ise daha fazla genişleme betonda istenmeyen çatlaklara neden olmaktadır [31].

2.1.5.2. C_4AF Ana Bileşenin Hidratasyonu

$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ formülü ile gösterilen bu bileşen çimento klinkerinde oldukça etkilidir ve miktarı arttıkça çimentonun rengine değişim koyulaşma yönünde olmaktadır. C_4AF 'nin dayanıma katkısı yok denecek kadar az miktardadır. C_4AF hidratasyonu için C_2A ve C_2F bileşiklerinden oluşur. C_3A 'nın hidratasyonundan farkı bir tepkime hızıdır. Bu durum haricindeki diğer farklılık, yapısındaki bir miktar alüminanın yerine demir oksitinin yer almasıdır. Çimento içeriğinde alçı olmazsa veya minimum seviyenin altında kalırsa hidrogarnet ($C_4AF+(6+n)H \rightarrow C_3AH_6+CFH_2$) meydana gelmektedir. Bu aşamadan hemen sonra alçı ortama dahil edildiğinde doğru orantılı olarak sülfat miktarı ile tepkimeye girerek etrenjit ($C_4AF+3CSH+26H \rightarrow C_6A(F)S_3H_{32}$) ve monosülfat hidrat

($C_4AF + CSH + 26H \rightarrow C_4A(F)SH_{18}$) oluşmaktadır. Dolayısı ile alçı miktarı çimento içeriğinde oldukça önemlidir. Alçı hiç kullanılmadığı veya kullanılması gereken miktarın altında olduğunda, C_3A 'ya göre C_4AF 'nin hidratasyon hızı daha az olmaktadır. Sülfat saldırılarına dayanıklı betonlarda olması gereken C_4AF oranı yüksek, C_3A oranı düşük olmasıdır [31].

2.1.5.3. C_3S ve C_2S Ana Bileşenlerinin Hidratasyonu

C_3S ve C_2S 'nin hidratasyonu sırasında gerekli olan su miktarı yaklaşık değer olarak aynıdır. Farklı olan tek nokta C_3S 'nin hidratasyonu sırasında oluşan $Ca(OH)_2$ daha fazla olmasıdır. $Ca(OH)_2$ dayanımına olan katkısı oldukça düşüktür. İleriki aşamalarda C_2S bileşeninin çimento dayanımına önemli katkıları bulunmaktadır. C_2S hidratasyonunda dayanımı en çok etkileyen C-S-H jeli daha fazla, buna karşılık daha az $Ca(OH)_2$ oluşmaktadır. Fakat C_3S 'nin hidratasyonu daha hızlı etkileşime girdiği için, erken yaşlarda dayanımı C_3S 'i etkilemektedir. Betonda kum ve agrega parçacıklarını, C_3S ve C_2S karma oksitleri birbirine bağlar ve ana bağlayıcı olan C-S-H jelidir. C-S-H jeli katı çimento hacminin yaklaşık %60'ını kapsar [32].

C-S-H jeli fiziksel olarak hidratasyon reaksiyonu sırasında değişmektedir. Çimento hidratasyonunun ilk günlerinde C-S-H jeli sıvı uçludur, sonraki günlerde incelendiğinde küçük küreler şeklinde olduğu görülmektedir [33].

2.2. PUZOLANLAR

Puzolanlar, silisli ve alüminli malzemelerdir, bağlayıcılık özelliği bulunmamaktadır [34]. Ancak ince öğütüldüğünde ve rutubetli bir ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğine sahip olabilmektedirler. Puzolanların yapısında büyük miktarda yer kaplayan silisin ve alüminin yanı sıra, diğerlerine oranla daha az miktarda kalsiyum oksit, demir oksit, alkaliler gibi oksitlerde yer alabilmektedir. Puzolanik malzemelerin mineralojik ve kimyasal yapıları farklılık göstermektedir. Puzolanlar, genleşmelere karşı oldukça etkilidir. Puzolan reaktivitesi, alkali-silika reaksiyonunu azaltmada da etkilidir. Bu etkinin çimento yerine kullanılabilecek miktarı da belirlediği görülmektedir [35].

2.2.1. Puzolanların Tarihçesi

Puzolan ilk defa milattan yaklaşık 100 yıl önce, eski Romalılar tarafından, Napoli yakınlarındaki Pozzuoli kasabası etrafında bulunmuştur. Camlaşmış volkan toprağı, Vezüv yanardağı yakınlarında bulunup, günümüzdeki “Puzolan” sözcüğü de kasabanın isminden esinlenilmiştir [34].

Puzolan, 2000 yıl önce Antik Romalılar döneminde volkanik kül içeren karışımı kullanarak yapılmış olan binalar, yollar ve köprüler ayakta kalabilmiştir [18].

Konya-Çatalhöyük’te Neolitik Çağa dayanan evlerdeki harçlar üzerinde yapılan çalışmalarda kullanılan harçların yaklaşık 8000 yıl eskiye dayandığı ortaya çıkmıştır. Harçların içeriğı sadece kil, kireç veya alçıdan oluşturulmuş olup suya karşı dayanıklı olmadıkları ortaya çıkınca, o bölgede yapılan evlerin harçları volkanik kül içeren topraklarla yapılmış olduğu gerçeğini ortaya çıkarmıştır. Rodos, Girit ve birçok yerleşim yerinde yapılmış olan yapılar yaklaşık 4000 yıl önceye dayanmış olmasına rağmen dayanıklılığını korumaktadır. Puzolan kelimesi MÖ 300 yıllarında o dönemdeki Romalılar tarafından harç ve beton yapımında kullandıkları malzemeleri isimlendirmek için kullanılmıştır. Romalıların isimlendirmesiyle hayatımıza girmiş olan puzolanik malzemelerin bağlayıcılığa olan etkisi yine Romalılar tarafından keşfedilmiştir. Romalı mimar Marcus Vitruvius Pollio’nun MÖ 20. yıllarında “De Architectura Libri Decem- Mimarlık Üzerine On Kitap” isimli eserinin ikinci baskısında puzolanlara yer verilmektedir. Vitruvius’un görüşlerine göre, Romalılar çevrelerindeki birçok malzemenin örneğın pişirilmiş kilin, öğütölmüş tuğla ve kiremittin puzolanik özellik gösterdiğinin zamanla farkına varmışlardır. Romalılar zamanla sertleşebilen bağlayıcı hamuru; volkanik küllü toprağı, volkanik külü ya da pişirdikleri kili, söndürölmüş kireç ve su ile birleştirerek elde etmişlerdir. Osmanlılar döneminde oldukça yaygın olarak kullanılan “Horasan harcı” da ince bir şekilde öğütölmüş olan kil, pişirilen kiremit, tuğla, çömlek gibi ürünlerin söndürölmüş kireçle harmanlanması sonucunda üretilmektedir [36].

2.2.2. Puzolanların Sınıflandırılması

Puzolanlar doğal ve yapay olarak iki ana grupta sınıflandırılabilir. Doğal puzolanlar, sıklıkla volkanik kaynaklı tortul kayaçların en az miktarda değişime uğramasıyla meydana gelmektedir. Doğal puzolanlar için öğütme haricinde bir işlem gerekmez. Yapay puzolanlar ise endüstri atığı ürünlerden ya da doğal malzemelerin pişirilmesiyle elde

edilen ürünlerdir [37].

Amerikan Standardı ASTM C618-94 şartnamesindeki puzolan tanımlamasında tek başına bağlayıcı özelliği olmayan fakat küçük parçalara bölünerek ortamdaki nem oranıyla birlikte kireçle birleştğinde bağlayıcı özelliği kazanan yapay ve doğal puzolanlar şeklinde iki sınıfa ayrılmaktadır. Yapay puzolanlar: yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı gibi endüstriyel atıklardan oluşabilmektedir. Yapay puzolanlar sınıfında ısıtıl işlem görmüş doğal malzemeler de yer almaktadır. Doğal puzolanlar, volkanik aktivite sonucu oluşan ve kireçle bir araya getirildiğinde bağlayıcılık özelliği kazanan malzemelerdir. Genel olarak bağlayıcılık kazanabilmesi için ortamda kalsiyum hidroksit içeriğinin olması gerekmektedir [38].

2.2.3. Puzolanların Aktivitesi

Puzolanik malzemenin bağlayıcılık özelliği gösterebilmesi için, içeriğinde yer alan silika ve alümina değerlerinin yüksek olması gerekmektedir. Puzolanik malzemenin ise amorf ve çimento gibi ince taneli yapıya sahip olması gerekmektedir [39].

Puzolanik aktivite, puzolan olarak kullanmak istenen mineral katkı malzemesinin silis ve alümin bakımından yüksek oranda olması, çimentonun hidrasyonunda oluşan serbest sönmüş kirecin hangi derecede bağladığının belirlenmesi konusunda kullanılmaktadır. Ayrıca karışım miktarına eklenen mineral katkının puzolanda kullanılıp kullanılmayacağı kireç miktarı ile reaksiyonun hızına bağlı olarak değişmektedir. Doğal puzolanların puzolanik aktivitesi araştırmalarda sadece inceliğin başlıca etken olmadığını ve puzolanın kimyasal bileşimi, mineral bileşimi, cam içeriği ve magmanın soğuma hızının da puzolanik aktivite için çok önemli olduğu belirtilmektedir. Puzolandaki silika ve alümina içeriği, inceliğe bağlıdır. Puzolanın amorf yapıda olması ise puzolanik aktiviteyi önemli seviyede etkilemektedir. Puzolanik aktiveler: fiziksel, kimyasal, mekanik ve mikro yapısal olmak üzere dört farklı yöntem kullanılarak belirlenmektedir. Fiziksel yöntemde, puzolanik malzeme nitrik-floridik karışım ile karıştırılması ve ortaya çıkan ısıların kalorimetreyle ölçülerek değerlendirildiği yöntemdir. Kimyasal yöntemde, reaksiyon sonucu alkaliler veya asitlerde çözünebilen puzolanlar, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ karışımı puzolan doymuş kireç çözeltisine konularak, zamanla içinde bulunduğu ortamdaki kalsiyum iyon sayılarını azalttığı gözlemlenir. Puzolan+kireç karışımında bulunan Ca(OH)_2 miktarındaki değişim: Fratini testi, doymuş kireç yöntemi, Chapelle aktivite indisi yöntemi ve diğer kimyasal tekniklerle incelenmesidir. Mekanik yöntemde ise kireç-

puzolan ve puzolan-çimento harcının basınç dayanımının ölçülmesi puzolanik aktivitenin tespit edilmesini kolaylaştırır. Puzolanik aktivitenin Mikro yapısal yöntemde, elektron mikroskobu, X ışını floresan spektrometresi (XRF), diferansiyel termal analiz (DTA), termogravimetrik analiz (TGA), X ışını difraktometresi (XRD), gibi yöntemler kullanılarak ölçülmesidir [40].

2.2.4. Puzolanik Reaksiyon ve Ürünleri

ASTM C 618'e göre doğal puzolanların kullanımı için kimyasal bileşimlerde genellikle SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 yüzdelerin toplamı en az %70 olması istenmektedir. Puzolanlar genellikle %60-85 aralığında SiO_2 içerirler. Ana puzolanik reaksiyon, Portland çimentosunun temel reaksiyonu olan kalsiyum silikata benzer kalsiyum silikat hidrate oluşumunu kapsamaktadır [41].

Aşağıdaki Denklem 2.5'te Puzolanik reaksiyon, Denklem 2.6'da Portland Çimento hidratasyonu gösterilmiştir.



Denklemlerde; CH kalsiyum hidroksit, S silikat (SiO_2), CSH ise kalsiyum silikat hidratı ifade etmektedir.

Puzolanik reaksiyonlar oldukça yavaştır. Dolayısı ile dayanım kazanma hızı ve hidratasyon ısısı düşüktür. Puzolanik reaksiyon sayesinde ortamdaki serbest kireç tüketilmektedir. Puzolanik reaksiyonun hızı, ortamın sıcaklığına ve mevcut olan alkaliler ve sülfatlara bağlı olarak farklılık göstermektedir. Puzolanik reaksiyon nedeniyle serbest kireç oluşumunun yavaş olması, mukavemet kazanımını da yavaşlatmaktadır. Kür sıcaklığının artması reaksiyonu hızlandırır. Puzolanik malzemedeki reaktif SiO_2 ile serbest kireç reaksiyonu neticesinde ilave kalsiyum silikat hidrat jeli oluşmaktadır. Bu da mukavemetin özellikle ileriki yaşlarda daha fazla artmasına, serbest kirecin azalması ve hamur boşluk yapısının iyileştirilmesine sebep olmaktadır. Dolayısı ile puzolan kullanılarak zararlı dış etkilere karşı oldukça dayanıklı bir kompozit elemanın ortaya çıkması sağlanmış olmaktadır. Ancak puzolanların aktivitesinin yüksekliğine göre, erken yaşlarda mukavemeti düşük, 56 veya 90 gün gibi sonraki yaşlarda ise mukavemeti yüksek betonların üretileceği de göz önünde bulundurulmalıdır [41].

2.2.5. Silis Dumanı

Kaynak taraması yapıldığında silis dumanı ile ilgili ilk çalışmalar 1950 yıllarında Norveç'te başlamıştır. Çimentoya ikame edilip denenmesi ise 1969 yılında gerçekleşmiştir. Zamanla bu denemeler 1980'li yılların başlarına kadar devam etmiştir ve bu denemeler sonucunda silis dumanının beton özelliklerine olan etkileri gözle görülür şekilde gelişmiştir. Silis dumanının kullanımı çevresel zararları azaltarak, endüstriyel atıkların da betonun her alanında kullanımı sağlayarak ekonomik açıdan olumlu sonuçlar doğurmaktadır [42].

Silis dumanı, alaşım olarak silisyum veya demir silisyumun ergime yöntemi sonucu ana bileşeni 1µm'den çok daha küçük puzolanik aktiviteye sahip küresel ve camsı silis partiküllerinden meydana gelen bir yan üründür. Malzemeye “silis dumanı” veya “yoğunlaştırılmış silis dumanı” denilmesinin nedeni, silikon metali veya silikonlu metal alaşımların üretimden sonra hızlı bir şekilde soğutma aşamasını yoğunlaştırmasıyla yaklaşık olarak %85-98 oranında silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşmasıdır [43].

Elektrik ark fırınlarında ferrosilikon ve metalik silisyum üretim esnasında kömürle kuvars indirgenir, yan ürün olarak silis dumanını ortaya çıkarmaktadır [44].

Elektrik ark fırınlarında yaklaşık 2000°C sıcaklığında SiO₂ oksitlenir ve zamanla dibe çökerek SiO₂ dumanını oluşturur. Fırın bacasına yerleştirilmiş olan filtrele takılan silis dumanı silolarda birikmektedir. Silis dumanı içeriğinde oransal olarak yüksek miktarda puzolanik aktivite bulunmaktadır [42], [44].

Silis dumanıyla üretilen betonların beklenenden daha yüksek oranda dayanım ve dayanıklılığa sahip olunması gereken alanlarda kullanılmaktadır. Yüksek dayanımlı kule yapılarında, erken dayanım, aşınmaya maruz kalan uzun süreli yol kaplamalarında ve döşemelerde, kısmen veya tamamen su kütlesi altındaki hidrolik yapılarda, zararlı kimyasal etkileşimlerinde bulunan yapılardaki betonlarda, yüksek dayanımın yanında yapının hafifliği istenen beton uygulamalarında kullanılmaktadır [42].

Silis dumanı, dünyada katkılı çimento üretiminde kullanılmaktadır. Avrupa ve Türk standartlarında yaygın olarak Portland silis dumanlı çimento türü yer almaktadır. Silis dumanı çimentoya oranla tanecikleri daha küçük olmasına rağmen kimyasal katkı ile birlikte öğütülerek diğer çimentolara oranla daha yüksek dayanım ve performansla sahip çimentolar elde edilebilmektedir [44], [45].



Şekil 2.1. Deneyde kullanılan silis dumanı malzemesi.

Silis dumanı taze betondaki birçok özelliği etkilemektedir. Silis dumanı Portland çimentosuna kıyasla çok daha ince olması, çimento tanelerinin dolduramadığı boşluklara kolayca girerek doldurmaktadır. Çimento taneleri arasındaki boşluklardaki sular, silis dumanı partiküllerinin içeriye girmesiyle dışarı doğru atılırlar. Çimento boşluklarında bulunan suyun atılımı çimento hamuru kıvamını ciddi olarak etkilemektedir. Silis dumanının özgül yüzey alanının çimentoya kıyasla büyük olması, beton için gerekli su ihtiyacını arttırmaktadır. Betondaki su ihtiyacının artması çimento hamurunun kıvamının artmasına da neden olmaktadır. Çimento hamurunun kıvamının artması işlenebilirliğin azalmasına neden olmuştur. Çimentonun ağırlıkça yaklaşık %5 oranına kadar ikame edilen silis dumanı, çimento hamurunun ihtiyaç duyduğu su ihtiyacını, kıvamını ve bunlar neticesinde oluşan işlenebilirliği de çok etkilememektedir. Çimento ağırlığınca %5'ten daha fazla silis dumanının ikame edilmesi çimento hamurunun su ihtiyacını arttıracak ve karışıma ilave su gereksinimi oluşturacaktır. Karışıma sonradan eklenecek olan su, betonda dayanımın azalmasına sebep olmaktadır. Betondaki dayanımı azalacak durumların önüne geçmek adına silis dumanı ile beraber akışkanlaştırıcı ya da süper akışkanlaştırıcı katkıların kullanılması gerekmektedir. Betonda kullanılacak katkının miktarı ve türü; su/bağlayıcı oranına, silis dumanı miktarına göre değişmektedir. Taze betonda silis dumanı kullanımına bağlı olarak oluşan su ihtiyacı, diğer puzolanlara oranla

çok daha fazladır. Silis dumanının kullanımı taze betonda olan ayrışma olayını ve terlemeyi azaltmaktadır. Silis dumanı kullanımına bağlı olarak, terlemeyi azaltması ve çok ince tanelere sahip olması beton yüzeyine yapılacak olan perdahlamayı zorlaştırmaya ve plastik büzülme sonucunda çatlak oluşumuna sebep olmaktadır. Silis dumanının fazladan C-S-H jeli oluşumuna yardımcı olması, çimento hamuru ile agrega ara yüzey bölgesini güçlendirmesi gibi etkilerle sertleşmiş betonun dayanımını arttırmaktadır. Beton dayanımındaki bu artış, silis dumanı ve çimento miktarına, akışkanlaştırıcının türüne, miktarına ve agrega gibi faktörlere bağlıdır. Silis dumanının erken yaşlardaki basınç dayanımı değeri belirgindir. Betondaki normal bakım koşulları altında 3 ile 28 gün içinde kendini göstermektedir. Silis dumanı ikameli betondaki çekme ve eğilme dayanımı, normal Portland çimentosuyla hazırlanmış olan katkısız betonun çekme ve eğilme dayanımına eşit veya daha yüksek bir değerde olabilmektedir. Silis dumanıyla hazırlanan betondaki basınç ve çekme dayanımları arasındaki ilişki, katkısız Portland çimentosu ile hazırlanmış betonun basınç ve çekme dayanımları arasındaki ilişkiyle benzerdir. Betonun zaman içindeki özelliklerinin kaybetmemesi açısından önemli olan dayanıklılık durumlarında silis dumanı, betona zararlı kimyasalların girmesini yavaşlatır ve geçirimsizliği azaltmaktadır. Silis dumanı kullanılarak üretilen betonlardaki geçirgenlik özelliği, bileşenlere ve bakım koşullarına bağlıdır. Silis dumanının ince taneli yapısı betonun gözeneklerini doldurarak daha geçirimsiz hale getirmektedir. Alaşımlarda bulunan silisyum içeriğinin artışı, silis dumanındaki silisyum dioksiti olumlu olarak etkilemektedir. Ferrosilisyum alaşımının içerisinde %50 oranında bulunan silis dumanındaki silisyum dioksit içeriği %61-84 olmaktadır. Alaşımlardan silisyum metalinde silis dumanındaki silisyum dioksit içeriği %98 olmaktadır. Silis dumanı yüzeyleri düzgün ve pürüzsüz, camsı ve küresel tanelerden oluşması beton içinde bulunun hava boşluklarını rahatlıkla kapatabilmektedir. Rengi gri tonlarında değişmektedir. Renk tonundaki değişimin sebebi içeriğinde bulunan karbon miktarının artması ile yorumlanabilmektedir. Silis dumanı içeriğindeki Fe_2O_3 miktarı arttıkça renk olarak hafif kahverengi bir renk tonu ortaya çıkmaktadır. Silis dumanı özgül ağırlığı 2,2-2,3 g/cm³ arasında bir değer alarak değişkenlik gösterebilmektedir [42].

Toz haldeki silis dumanının sektörde kullanımı zor olduğu için taşınmasını kolaylaştırmak için sıkıştırılarak veya sulu formda yapılması gerekmektedir. Silis dumanı ile üretilen betonların normal çimento hamuruna kıyasla suya karşı geçirimsiz bir yapıya sahiptir [45].

Sonuç olarak silis dumanı ikameli betonların, benzer şartlarda üretilmiş katkısız betonlara göre geçirgenliği daha azdır. Betonun Ca(OH)_2 içeriği ve geçirgenliği betonun durabilitesini etkilemektedir. Silis dumanı ikameli betondaki sülfürik asit, laktik asit, amonyum nitrat, asetik asit ve hidroklorik asit gibi kimyasallara karşı direncini arttırmaktadır. Silis dumanı ikameli betondaki sodyum sülfat çözeltisine karşı dayanıklılığı arttırır fakat magnezyum sülfat çözeltisine karşı etkisi olumsuzdur. Silis dumanı çevreden gelen zararları önlemek için boşlukları doldurması ve beton özelliklerini iyileştirmesi iyi kalitede betonların üretilmesini sağlamaktadır [42].

2.3. ÇALIŞMADA UYGULANAN İLERİ TEKNİK ANALİZLERİ

2.3.1. X-Işınları Kırınımı

X ışını kırınım metodunun ana prensibi bir X ışını kaynağından (Cu) üretilen alfa (α) ve beta (β) parçacıkları analizi yapılması istenen numuneye mineraller gönderilmesi ve gönderilen parçacığına maruz kalan numune kristal forma göre hangi açıdan yansıdığının tespitine dayanmaktadır. Açıdan yansıyan tespiti dayalı bu prensip, aynı zamanda X ışını analizlerin ilk çıkış yeri olan Bragg prensibinin de temelidir. Kırınımın özellikleri ölçülerek minerale ait kafes yapısı detayları hakkında veriler elde edilebilmekte ve ölçülen değerler doğrultusunda analizler sonuçlandırılmaktadır. Gönderilen X ışını parçacıklarında sapma gözlenmeyen, kristal kafes sisteme sahip olmayan ya da kristal kafes sistemi büyük olmayan element kökenli minerallerin analizlerinde bu yöntem kullanılmamaktadır. XRD analiz yöntemi farklı açılı ve yönlerde kırılan bir X ışını kullanarak numuneye ait yapının atomik ve moleküler olarak sınıflandırmada kullanılan bir yöntem cihazıdır. Cihaz genellikle polikristalize ya da amorf formundaki inorganik numune içerisinde bulunan katı ya da toz malzemelerin fazını tespit ve analiz edilebilmektedir. Günümüzde X ışını kırınımı kristal haldeki yapıların ve atomik boşlukların incelenmesinde kullanılan yaygınlaşmış standart bir prosedür halini almıştır. X ışını, nano boyuttaki malzemelerde yaygın bir karakterizasyon metodudur. Analiz yöntemiyle farklı metotları tamamlayıcı önemli bilgilerin elde edilmesini ve numuneye ait faz tanımı, numune saflığı, kristaliz boyutlarını öğrenmemizi sağlamaktadır. Genel bir teknik olarak XRD analizi, numunenin çok küçük bir kısmındaki gözlemlerle tamamını temsil edip etmediğini belirlemektir [46].

XRD analizi, malzeme bilimi, yerbilimleri ve kristalografi alanlarında faz kısımlarındaki

analizleri gerçekleştirmenin temel deneylerinden birisi olmuştur. XRD analizlerinde, belirli bir malzemenin iç yapısındaki faz ve kristal yapıların doğru bir şekilde tanımlanmasında kritik bir öneme sahiptir. XRD analizlerinde elde edilen veriler, sonucu oluşturulan desenler, malzemenin içerisindeki atomların düzenine, kristal yapıların özelliklerine göre belirli pik pozisyonlarına ve yoğunluklarına göre ortaya çıkmaktadır. XRD analizi, bu pik pozisyonları ve yoğunluklarına göre malzemenin kimyasal bileşimini ve fazlarının tanımlanmasında oldukça etkili ve önemli bir yöntemdir [47].

2.3.2. Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi

Günümüzde, laboratuvarların tercih ettiği Fourier-dönüştümlü kırmızı-altı (IR) spektroskopisi yaygınlaşmıştır. Bu yöntem, bir interferogram elde etmek için iki ışın arasındaki yol değişimini radyasyon girişimiyle ifade etme fikrine dayanmaktadır. Fourier yöntemi matematiksel olarak, optik yol farkı ve frekansın birbirine dönüştürülebilir olmasına dayanmaktadır. Cihazın temel optik bileşeni, diğer bir söylemle Michelson interferometresi neredeyse bir asıra yakındır bilinmektedir. Ancak tekniğin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi ve doğru sonuçlar alınabilmesi için hesaplamaların gelişmesi gerekmektedir. FT-IR spektrometresinin temel çalışma sistemi kaynaktan çıkan radyasyon, dedektöre ulaşmadan önce bir interferometreden numuneye geçirilir, sonrasında yüksek frekanslı katkılı bir filtre ayıklayarak elde edilen sinyalin genişletilmesi ile veriler analogdan dijital forma dönüştürülmektedir. Dijital formdaki Fourier dönüşümü gerçekleştirilmek üzere bilgisayara aktarılmaktadır. Michelson İnterferometresi, en yaygın olarak kullanılan interferometredir. Çalışma prensibi, düzleme dik yönde hareket edebilen birbirine dik iki düzlem aynaya gelen ışığın %50'sini geçirmekte %50'sini ise yansıtarak ışın ayırıcı bu iki aynanın düzlemlerini ikiye bölmektedir. Işın ayırıcı malzemesi, incelenecek bölgeye göre seçilmelidir. Işın ayırıcılarında en ideal ve yaygın olan, monokromatik ışın demeti iletilirse %50'sini aynalardan birine yansıtması ve geri kalan kısmı diğer aynaya iletmesidir. İki ışını aynalardan yansıtarak tekrardan birleşmesini sağlamak üzere ışın ayırıcıya geri döndürmektedir. Fourier dönüşümü yapılırken ayna frekansı faktörü çıkartılarak örnek moleküllere ait frekanslar belirlenmektedir. Fourier dönüşümü adı verilen ortak bir algoritma olarak bilinen yöntem, her bir ayna konumu için ışık absorpsiyonunu, her bir dalga boyu için ışık absorpsiyonuna dönüştürmek amacıyla bilgisayarda gerekli hesaplamaları içermektedir. Fourier dönüşümü aynanın cm olarak bulunduğu önceki yerini değiştirmesi ile oluşan interferometre verilerini, dalga sayıları (cm^{-1}) olarak

dönüştürmektedir. Fourier dönüşümleri ile interferogram, frekansın şiddete bağlı olarak grafiğe dönüştürmesidir. Fourier dönüşümündeki matematiksel yöntem sayesinde her biri diğerine kolaylıkla dönüştürülmektedir. ATR (zayıflatılmış toplam yansıma) spektroskopisinden geçen değil, örnekler yansıyan ışınlar dedektöre yollanmaktadır. Kristale giren kırmızı altı dalgalar, numune ile kristal arasında bulunan yüzeydeki gelme açısı, kritik açıdan çok daha büyük olduğunda, toplamda iç yansımaya uğramaktadır. Örnekten yansıyan kırmızı altı ışınının şiddeti, soğurmadan dolayı frekansları azalmaktadır. Numunenin soğurduğu frekanslar, zayıflatılmış radyasyon, spektrometre tarafından dalga boyunun bir fonksiyonu olarak ölçülerek belirlenmektedir. ATR, penetrasyon derinliği, dalga boyunun (λ), kristalin kırılma indisinin ve gelen radyasyon açısının (θ) bağlı olan bir fonksiyondur. ATR, farklı tasarımlarıyla hem sıvı hem de katı numuneleri incelemektedir [48].

2.3.3. Termal Analiz

Termal analiz, bir madde sıcaklığa kontrollü olarak maruz bırakıldığında, o maddenin fiziksel bir özelliğini veya reaksiyon ürünlerini sıcaklık faktörüyle ölçülmesini içeren teknikler olarak tanımlanmaktadır. Termal analiz teknikler, kütle değişimi hakkında bilgi veren termogravimetre, entalpi değişiklik oranlarını diferansiyel taramalı kalorimetre ve diferansiyel termal analiz, boyutlardaki değişimi termo-mekanik analiz ve termo-dilatometre; kayıp modülü belirten analiz ise dinamik mekanik analiz ve dielektrik termal analizdir. Ağırlık değişkenlikleri termogravimetre ile belirlenmektedir. Termal analiz çalışmaları, hareketsiz yüzey atmosferinde ve basıncında değişken olmayan ısıtma hızında statik olarak gerçekleştirilir. Isıtma hızlarının değişkenlik göstermesi reaksiyon sıcaklık aralığını da azaltmaktadır. Termal analiz, polimer biliminde ve plastik teknolojisinde araştırma ve ticari amaçlı olarak kullanılmaktadır. Termal analizlerde kullanılan analizlerin çoğunluğu organik, inorganik veya polimerik tüm malzemeler için uygulanabilmektedir. Diferansiyel termal analiz (DTA), kömürlerin termal davranış ve reaksiyonlarını incelemekte kullanılan bir termo-analitik araçtır. DTA, değişken olmayan hızda ısıtılan bir sistemde, zamana (t) ve sıcaklığa (T) bağlı olarak çizilen faz diyagramlarını oluşturmak amacıyla kullanılan bir egridir. DTA'da ilk hücre referans alınacak materyal örneğini içeren, diğer hücre ise sahip olmayan programa karşı inert tavrı incelenmek üzere iki hücre örneği içermektedir. DTA deneylerinde genellikle kullanılan ısıtma hızları $10^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ dilimi aralığındadır. Termogravimetrik analiz (TGA), ısıl bozunma/yanma kinetiğini incelemek amacıyla en çok kullanılan termo-analitik

yöntemlerden biridir. TGA, kütle değişimine olumlu veya olumsuz dahil olan bir reaksiyonun ölçülmesi olarak tanımlanabilmektedir. TGA da ağırlık zamanın bir fonksiyonu olarak çizilmektedirken, değişken olmayan ısıtma hızlarındaki deneylerde ise ağırlık sıcaklığın bir fonksiyonu olarak çizilmektedir. TGA'nın temel prensibi, malzeme bilimi ve katı hal kimyası için oldukça önemlidir. TGA, malzemelerin bozulmasındaki reaksiyon hızlarının belirlenmesinde, suyun kristalizasyonu, oksidasyonu ve redüksiyonunun incelenmesiyle veya stokiyometri prensiplerinin kolaylıkla analiz edilmesinde kullanılabilmektedir. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ise, polimerik ve kontrollü sıcaklık programına maruz kalan malzemelerin enerji girdilerini ölçmekte oldukça etkili bir yöntemdir. DSC ile DTA birbirlerine yakın tekniklerdir. DSC tekniği, sıcaklıklar arasındaki farkı ölçmektedir. DTA ise aynı sistemli sıcaklık değişimine bakmaktadır [49].

2.3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu

X-ışını mikroanalizi ve dijital görüntü analizi için çok iyi bir şekilde donatılmış taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı kullanılmaktadır. SEM bölmelerinden bazıları oldukça yüksek vakumda çalışmaktadır bazıları ise düşük seviyedeki basınçlı bölmedeki hava ile çalışmaktadır. Kullanım çoğunluğuna göre genellikle çevresel SEM veya Çevresel Taramalı Elektron Mikroskobu (ESEM) olarak bilinmektedir. ESEM'in iki avantajından ilki, bölmesinin içindeki hava, numune yüzeyinin enerji vermesini engellemektedir. Diğeri ise, ESEM bölmesindeki düşük basınçla, ıslak haldeki numunelerin incelenmesine izin verilmesidir. Normal bir SEM cihazında iletkenliğe sahip numune kullanılması gerekmektedir. Bazı numunelerin iyi ölçü de iletkenliği olması ilave iyileştirme işlemi gerektirmemektedir. Numune iletkenliğe sahip değil ise, negatif yük ile hızlı bir şekilde elektron ışınına itici bir yüzey oluşturulur. Bu yüzey kötü görüntü alınmasına neden olduğu gibi görüntü alınmasını tamamen de engelleyebilir. Çimento ve beton gibi iletken olmayan numunelerde bunu engellemek için, numunelerin yüzeyine oldukça ince bir iletken tabaka uygulaması yapılmaktadır. Bu tabakalar genellikle karbon, altın ve paladyumun karışımından oluşmaktadır. SEM, malzemelerin topografik ve içerik analizinin tespit edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca birçok SEM, elektron demetinin uyarılma aşamasında numuneden çıkan x-ışınlarını tespit eden bir enerji dağılımlı spektrometre (EDS) ile donatılmıştır. SEM/EDS analizi betonun standart test prosedürlerine giremediği için teknik inceleme aracı olarak günümüzde kullanılmaktadır. SEM karakteristik özellikleri, yüzeylerdeki dokuların üç boyutlu görünümüyle

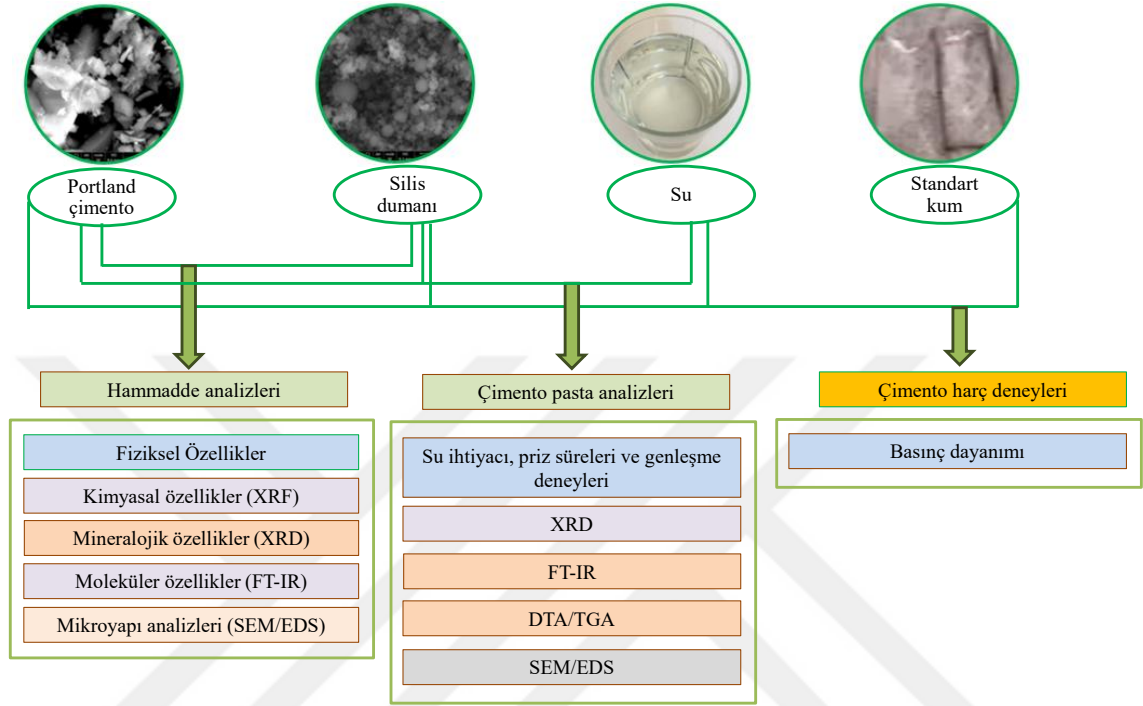
sonuçlanan oldukça yüksek gelişmiş çözünürlük, istenilen boyutta büyütme gibi birçok uygulamaya sahiptir [50].

SEM görüntü oluşturulması istenen numuneye gönderilen elektron demetinin, numuneden tekrar yansıyan sinyallerin algılanması esasına dayanır. SEM morfolojiyi tanımlamaya oldukça elverişlidir ve çözünme kalitesi dalga boyuna bağlıdır. SEM görüntüyü büyütme için örnek üzerine gönderilen elektron ışını kullanmaktadır. Yüzbinlerle ifade edilen yüksek ölçekte büyütme SEM ile ulaşmak mümkündür. Örnek üzerine gönderilen elektronlar, negatif elektrik yüklü kısa dalga boylu partiküllerdir ve havadaki gaz molekülleriyle tutulmaktadır. Bu nedenle hareketleri kısıtlı olmasına rağmen yine de birkaç mikron da olsa hareket edebilmektedirler. Bu hareketlerin kolaylaştırılması için elektronlar vakumlu bir tüp içinde hareket ettirilmektedir. Dolayısı ile SEM'in çalışma esası, vakumlu tüp içinde elektronların yön değiştirmesine dayanmaktadır. SEM ve Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) olmak üzere iki tip elektron mikroskobu vardır. TEM, iki boyut görüntü vererek, kesit özelliklerini ortaya koymaktadır. SEM ise üç boyutlu yüzey özelliklerini ortaya çıkarmaktadır [51].



3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, malzemeler ve özellikleri ile uygulanan deney yöntemleri ve aşamaları verilmektedir. Bu aşamalara ait deneysel prosedür Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Deneysel prosedür.

3.1. MALZEME

Çalışmada Ankara ilinde faaliyet gösteren “LİMAK ANKA” çimento fabrikasında üretilen CEM I 42,5 R tip PÇ kullanılmıştır. Çimentoya ikame edilen SD, Dost Kimya şirketinden sağlanmıştır. Çimento harçlarının hazırlığında standarda uygun olarak hazırlanan ve 1450 g halinde torbalarda halinde bulunan standart kum ve Ankara ili şehir şebeke suyundan faydalanılmıştır [52].

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 (PÇ), %2,5, %5, %7,5 ve %10 oranlarında SD ikameli 5 farklı çimento tipi hazırlanmıştır. Çimentolar sırasıyla R (referans çimento), 2,5SD, 5SD, 7,5SD ve 10SD olarak kodlanmıştır.

Çimento hamurunun ihtiyacı olduğu su miktarı, priz süreleri ve genleşme değerlerini belirlemek için 500 gram numune için belirlenen su miktarı karıştırma kabına yerleştirilip üzerine çimento ilave edilmiştir. Karışım düşük hızda 90 saniye olmak üzere karıştırıcı ile çalıştırılmıştır. Karıştırılan karışım 90 saniye sonra durdurulmuş ve numune kenara alınıp 15 saniye dinlendirilmiştir. Dinlenme sırasında kabın kenarlarında ve dibinde karıştırmaya bağlı olarak yapışan hamur, plastik bir kazıyıcı ile temizlenip karışımla birleştirilmiştir. 15 saniyelik dinlenmenin ve temizliğin ardından karıştırıcı 90 saniye daha düşük hızla çalıştırılmıştır. Karıştırma süresi toplamda 180 saniye olan işlem tamamlanarak çimento hamuru hazırlanmıştır [53].

Çimento hamurlarının hidratasyon reaksiyonlarının XRD, FT-IR, DTA/TGA ve SEM/EDS analizleriyle tespit edilebilmesi için su ihtiyacı dikkate alınarak (su/çimento= 0,40) numuneler hazırlanmıştır. 28. gün sonunda kalıplardan çıkartılan numuneler XRD, DTA/TGA, FT-IR analizleri için bir havan kullanılarak toz halinde öğütülmüştür. SEM/EDS analizi için hazırlanan numuneler kırılmış ve bu yüzey üzerinden görüntüler alınmıştır. Çimento basınç dayanımlarının belirlenmesi için harçlar hazırlanmıştır. Bu harçlara ait karışım özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. PÇ ve SD ikameli harç numunelerinin kodları ve miktarları.

Kod	Çimento, g	Çimento, %	SD, g	SD, %	Su, g	Standart kum, g	su/çimento oranı
R	450	100	0	0	225	1350	0,5
2,5SD	438,75	97,5	11,25	2,5			
5SD	427,5	95	22,5	5			
7,5SD	416,25	92,5	33,75	7,5			
10SD	405	90	45	10			

Çimento harçları, boyutları 40x40x160mm olan üç gözlü kalıplar yardımıyla hazırlanmaktadır. Numuneler hazırlanmadan önce kalıplar önceki kullanımdan kalan ürünlerden iyice temizlenmiş ve karıştırıcı çalışır hale getirilmiştir. Çalıştırıcıya yerleştirilecek karıştırma kabına, belirlenen ölçüde önce su, hemen ardından çimento

koyulmuştur. Çalıştırıcı düşük hızda (140 dev/dk) çalıştırılmaya başlayınca 30 saniye sonunda 1350 g kum 30 saniye içinde karıştırma kabına eklenmiştir. Kum 30 saniye içinde ilave edildikten sonra karıştırıcı yüksek hız (285 dev/dk) seviyesine getirilmiş ve karıştırma işlemi 30 saniye daha devam etmiştir. Karıştırıcı toplamda 180 saniyelik süreyi tamamladıktan sonra durdurulmuş ve hemen ardından karıştırma kaynaklı oluşan kabın etrafına ve dibine yapışmış harçlar bir sıyırıcı yardımıyla karıştırma kabına ilave edilmiştir. Karıştırıcı tekrardan yüksek hızda 60 saniye çalıştıktan sonra durdurulmuştur. Hazır olan harç kalıplara iki aşamalı ve iki tabaka olacak şekilde yerleştirilmiştir. İlk tabakanın yerleştirilmesiyle sarsma tablasına sabitlenen kalıp 60 kere sarsma işlemi yapılmıştır. Sarsma işlemi bittikten sonra aynı yöntemle ikinci tabakaya da 60 kere sarsma işlemi uygulanmış ve sıkıştırılmıştır. Sarsma işlemleri sonrasında kalıptaki harç fazlalıkları master yardımıyla enine testere yöntemi ile düzleştirilip temizlenmiştir. Hazır olan kalıplar, kürlemek amacıyla üstü cam ile kapatılmış ve ortam sıcaklığı $20\pm1^{\circ}\text{C}$, bağıl nemi %90 olan çimento kür kabinine koyulmuştur. Kür kabininde 24 saat bekletilen numuneler, süre sonunda alınarak $20\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki kür havuzuna yerleştirilmiştir [52].

3.2.2. Deneysel çalışmalar

3.2.2.1. Tane Boyut Analizleri

Referans çimento için elek analizinin belirlenmesi, standarda göre Limak Anka çimento fabrikasında Haver & Boecker 200 LS/N Alpine cihazı ile gerçekleştirilmiştir [54].

Çimento hassas terazide 10 g tartılmıştır ve 2 dakika boyunca 45 ve 90 μm eleklerden (emiş gücü 2000 Pa) elenmiştir. Ayrıca PÇ için tane boyut analizi Malvern Hydro 2000 G cihaz ile tespit edilmiştir.

3.2.2.2. Özgül Yüzey Alanı Analizleri

TS EN 196-6 standardına uygun olarak özgül yüzey alanı deneyi gerçekleştirilmiştir [54].

Numune miktarı standarda uygun olarak belirlendikten sonra etüvde kurutulmuştur. Numunelerin özgül yüzey alanı değerleri Limak Anka Çimento Fabrikasında Atom Teknik marka otomatik Blaine cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

3.2.2.3. Özgül Ağırlık Analizleri

Özgül ağırlık deneyi Limak Anka Çimento Fabrikasında Micromeritics AccuPyc II 1340 cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.2.2.4. Kimyasal Analizler

PÇ ve SD'nin kimyasal özellikleri Limak Anka Çimento Fabrikasında bulunan laboratuvarlarda standart esaslarına uygun olarak belirlenmiştir [55]. Kimyasal analizler için Protherm furnaces PLF 160/5 model XRF cihaz kullanılmıştır.

3.2.2.5. Moleküler Yapı Analizleri

Hammaddeler ile referans ve SD ikameli çimentoların molekül yapılarını ve hidrasyon gelişimlerini belirlemek için FT-IR analizleri yapılmıştır. Ölçümler Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezindeki (DÜBİT) Shimadzu marka IRPrestige 21 model ATR cihazıyla 500-4000 cm^{-1} dalga sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir.

3.2.2.6. Mineralojik Analizler

Hammaddeler ile referans ve SD ikameli çimentoların mineralojik yapıları ve hidrasyon gelişimleri Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezi laboratuvarlarındaki Rigaku Ultima-IV marka X-Işını Kırınım cihazıyla belirlenmiştir.

3.2.2.7. Mikro Yapı Analizleri

Hammaddeler ile Referans ve SD ikameli çimentoların mikro yapıları DÜBİT laboratuvarında FEI Quanta FEG 250 marka cihaz ile belirlenmiştir.

3.2.2.8. Termal Analizler

Hammaddeler ile referans ve SD ikameli çimentoların termal analizleri DÜBİT laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Termal gravimetri analiz 10°C/dk ısıtma süresi ile 1000°C sıcaklığa ayarlanarak yapılmıştır. Analizler, azot gazı ile 13,622-18,332 mg aralığında numuneler kullanılarak yapılmıştır. DTA/TGA için Shimadzu (DTG 60H-DSC 60) marka cihaz kullanılmıştır.

3.2.2.9. Standart Kıvamların Tayini

Standart kıvam tayini TS EN 196-3 standardına uygun olarak Ankara ilindeki Polatlı ilçesinde Limak Anka Çimento Fabrikasında gerçekleştirilmiştir [53].

Çimento hamuru cam levha üzerine yağlanmış vicat halkasına yerleştirilmiştir. Yerleştirilen çimento hamurunun vicat kalıbı üzerindeki fazlalık kısmı spatula yardımı ile alınmıştır. Sondanın tam altındaki merkeze göre kalıp ve taban plakasının bulunması durumuna dikkat edilmiştir. Sonda yavaşça çimento hamuru üstüne kadar indirilmiştir.

Ağırlığı etkisiyle düşey olarak serbest düşüş yapan sonda, çimento hamuru içerisine batmıştır. Batma sonucunda sonda ucu ile taban plaka arasındaki değer okunmuş ve notu alınmıştır. Her batırma işlemi sonrasında hemen sonda temizlenmiştir. Kıvam için gerekli olan su miktarı sonda ile cam levha arasındaki mesafe 6 ± 2 mm oluncaya kadar tekrar edilmiş ve bu aralıktaki su miktarı su ihtiyacı olarak kaydedilmiştir [53].

3.2.2.10. Priz Sürelerinin Tayini

TS EN 196-3 standardı esasları dikkate alınarak Ankara ilindeki Polatlı ilçesine bağlı olan Limak Anka Çimento Fabrikası laboratuvarında priz başlama ve sonu süreleri tespit edilmiştir [53].

Vicat aleti uygun miktarda yağlanmış ve göstergesi sıfıra ayarlanmıştır. Çimento hamuru, sonda yukarı kaldırılarak vicat halkasına yerleştirilmiştir. Kalıp üzerine taşmış olan çimento hamuru spatula yardımı ile alınmıştır. İğnenin tam merkezine denk gelecek şekilde kalıp ve taban plakasının orta noktasına dikkat edilmiştir. İğne çimento hamura temas edinceye kadar yavaşça indirilmiştir. Çimento hamurunda hareket halinde olan parçaların hızlı bir biçimde inmesini önlemek adına iğne 1-2 saniye boyunca tutulduktan sonra serbest bırakılarak düşey yönde kendi öz ağırlığı ile birlikte çimento hamuruna girmesi sağlanmıştır. İğnenin çimento hamuruna batma işlemi tamamlandığında göstergeden 30 saniye sonra değer okuması yapılmış ve kaydedilmiştir. İğne her batma işleminden sonra hızlıca özenle temizlenmiştir. İğne aynı numune üzerinde deney tekrarlanırken, özellikle numunenin farklı noktalarına batırılması ve daha önce iğne batırılan yerler ile mesafe en az 1 cm olacak bir biçimde ve deneyler arasında 10 dakika gibi uygun zaman aralıkları olacak şekilde tekrarlanmaktadır. Deney başladığı anda başlangıç süresi sıfır kabul edilip, iğne ve taban plakası arasında okuma değeri yaklaşık 6 ± 3 mm olduğu zamana kadar geçen süre ile arasında kalan zamana, 5 dakikanın katları olacak şekilde yuvarlanarak priz başlangıç süresi olarak not edilmiştir. Priz başlangıç süresi tespit edildikten sonra vicat halkası içerisindeki numuneyle birlikte ters çevrilmiştir. Kalıp tabanı ile numunenin temas eden yüzeyi üste getirilmiş ve priz sona erme deneyi gerçekleştirilmiştir. Vicat iğnesi bağlantı halkası ile tutturularak, küçük batma olayları daha net ve doğru bir biçimde gözlenebilmesi sağlanmıştır. Prizin sona erme süresi, priz başlangıç süresindeki uygulanan yöntemlerin aynısı uygulanmıştır, sadece batırma işlemleri arasındaki süreyi 30 dakika olacak şekilde yapılmıştır. Priz başlama süresi tayin edildiği an başlangıç süresi kabul edilerek iğnenin ilk defa 0,5 mm hamura girdiği zamana kadarki süre en yakın 5 dakikaya yuvarlanarak priz sonu süresi

olarak not edilmiştir [53].

3.2.2.11. Hacim Genleşmelerinin Tayini

TS EN 196-3 standardına göre hacim genleşme deneyi Ankara ilindeki Polatlı ilçesinde Limak Anka Çimento Fabrikası laboratuvarında yapılmıştır [53].

Deneyde kullanılan Le Chatelier aleti pirinçten yapılmış 3 cm çapında kesik bir silindire sahiptir. Le Chatelier aleti 15 cm uzunluğunda 2 adet çubuktan oluşmaktadır. Deneyler için her çimentoya ait 2 adet aynı numune hazırlanmıştır. Deney başlangıcında 2 adet Le Chatelier aleti ve cam malzemeler, ince bir tabaka yağ sürülerek hafifçe yağlanmış kalıplar cam levha üzerine yerleştirilerek hazırlanmıştır. Silindirin sahip olduğu kesik kısmı, numune koyulduğu sırada açılıp dökülmemesi için kesik kısım sıkılarak bağlanmıştır. Le Chatelier aletinin içine numune koyarken özellikle vibrasyon işlemi yapılmadan koyulmuştur. Numune koyulduktan sonra üst kısımda oluşan fazlalık yükseklik, bir spatula yardımı ile üzeri düzeltilmiştir. Düzeltme işleminden sonra kalıbın üstüne cam levha koyulmuştur ve $24 \pm 0,5$ saat boyunca $20 \pm 1^\circ\text{C}$ sabit tutularak, bağıl nemi en az %90 olan rutubet odasında muhafaza edilmiştir. Sıkılarak bağlanmış olan çubuklar $24 \pm 0,5$ saatin sonunda çözülmüştür ve çubuklar arasında açıklık ölçülerek not edilmiştir. Bir sonraki ölçümde aleti kaynatma suyuna bırakılmadan önce çubuklar yukarıda olacak şekilde cam levha alınmış ve kaynatma suyuna bırakılmıştır. Suyu dolu kaynatma haznesi 30 dakika kalıplarla birlikte kaynama sıcaklığına ulaştıktan sonra 3 saat bekletilip, çubuklar arasındaki mesafe ölçülerek not edilmiştir. En son ölçüm olan üçüncüsünde, numune kalıpları kaynatma kabı çıkarılarak laboratuvar ortamında $20 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıkta bir süre kendi kendine soğumaya bırakıldıktan sonra çubuklar arasındaki mesafe ölçülerek not edilmiştir. Üçüncü ölçümün değeri ile birinci ölçüm değerleri arasındaki fark, hacim genleşmesi olarak en yakın 0,5 mm'ye yuvarlatılarak not edilmiştir [53].

3.2.2.12. Basınç Dayanımlarının Tayini

Standartlara uygun olarak Ankara ilindeki Polatlı ilçesine bağlı olan Limak Anka Çimento Fabrikası laboratuvarında Form+Test Prüfsysteme marka Mega 11-600 DM1-S model cihaz kullanılarak çimento harç örneklerine basınç dayanım deneyi uygulanmıştır [52].

Numuneler deneyin yapılma anından en geç 15 dakika önce sudan çıkartılmıştır. Deneyin gerçekleşme zamanına kadar nem kaybına karşı nemli beze sarılmış şekilde

bekletilmiştir. Prizma numunelerin hepsi için $50\pm 10\text{N/s}$ kuvvet uygulanmış ve numuneler ortadan kırılıncaya kadar kuvveti arttırarak deney devam etmiştir. Kırılan numunenin iki parçası basınç dayanımı deneyi için kenara ayrılmıştır. Numuneler basınç dayanımında, cihazın plakalarından dışarıya doğru 10 mm taşırılarak koyulmuştur. Deney $2400\pm 200\text{N/s}$ hıza sahip kuvvet uygulanarak başlatılmış ve numuneler kırılma işlemi gerçekleştirene kadar kuvvet arttırılarak devam etmiştir. Kırılma yükü değerleri bulunarak basınç dayanımı değerleri hesaplanmıştır [52].



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

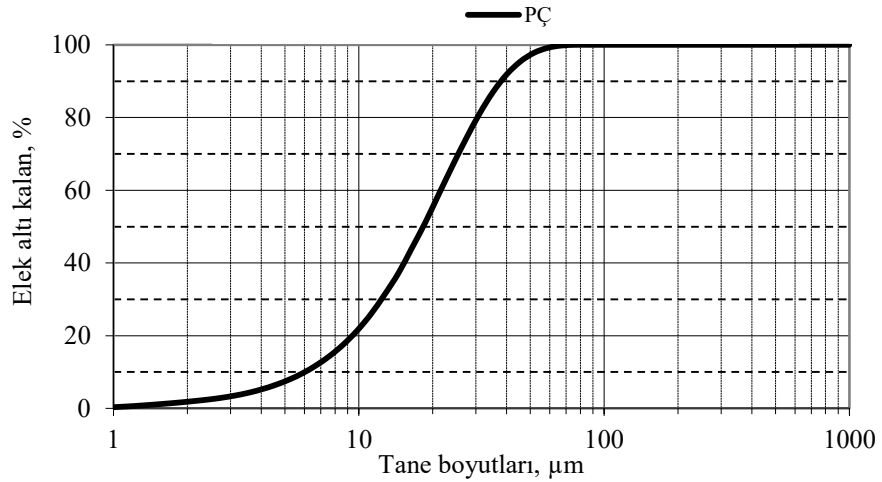
Dördüncü bölümün ilk etabında, çalışmada kullanılan hammaddelerin fiziksel ve kimyasal açıdan özellikleri ile mineralojik, molekül ve mikro yapıları belirlenmiştir. İkinci etabında, referans ve SD ikameli çimento hamurlarına uygulanan deney ve analizlerle hidrasyon reaksiyonları tespit edilmiştir. Üçüncü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

4.1. MALZEMELERE UYGULANAN ANALİZLER

PÇ ve SD için uygulanan analiz sonuçlarını gösteren çizelge ve şekiller bu bölümün ilgili kısımlarında irdelenmiştir.

4.1.1. Fiziksel Analizler

PÇ'ye ait tane boyut dağılımı Şekil 4.1'de verilmiştir. SD çok ince boyutlara sahip olduğu için tane boyut dağılımı ölçülmüş ancak sağlıklı bir sonuç alınamadığından burada yer verilmemiştir. Tane boyutlarını görebilmek için SEM analizinden elde edilen görüntülerden yararlanılmıştır.



Şekil 4.1. PÇ'nin tane boyut dağılımları.

Elde edilen analiz sonuçlarına göre PÇ'nin %90 elek altındaki oranlara göre sırasıyla 38µm, %50 elek altındaki oranlara göre 19µm boyutlarda olduğu görülmektedir.

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

Çizelge 4.1. PÇ ve SD'ye ait fiziksel özellikler.

Malzemeler	Boyut aralığı (elek üstü), %		Özgül ağırlık	Özgül yüzey alanı (Blaine), cm ² /g
	>45 µm	>90 µm		
PÇ	4,6	0	3,13	3233
SD	-	-	2,33	14465

Elek analizi sonuçlarına göre PÇ'nin tane yapısının oldukça ince olduğu görülmektedir. Ayrıca PÇ'nin Blaine değeri 3233 cm²/g özgül ağırlığı ise 3,13 iken, SD'nin Blaine değeri 14465 cm²/g, özgül ağırlığı ise 2,33 g/cm³'tür (Çizelge 4.1). Bu veriler, daha yüksek Blaine değerli ve daha düşük özgül ağırlıklı SD ikameli çimentolar üretilebileceğini göstermektedir.

4.1.2. Kimyasal Analizler

PÇ ve SD'nin kimyasal yapısı Çizelge 4.2'de izlenmektedir.

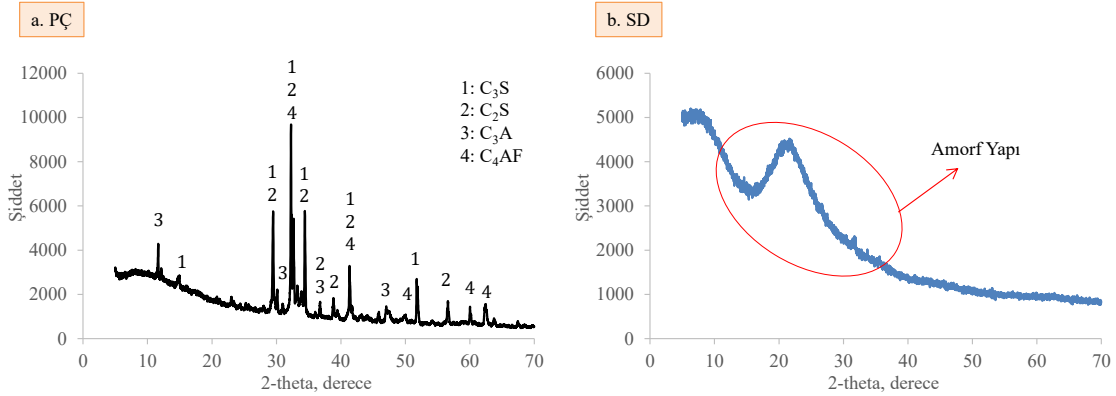
Çizelge 4.2. PÇ ve SD'ye ait kimyasal özellikler.

Sembol	Oksit	PÇ	TS EN 197-1	SD
C	CaO	62,67	-	0,59
S	SiO ₂	19,51	-	91,6
F	Fe ₂ O ₃	2,85	-	1,23
A	Al ₂ O ₃	4,95	-	0,73
M	MgO	2,24	< %5,0	1,08
S	SO ₃	2,86	< %3,5	0,11
K	K ₂ O	0,72	-	1,31
N	Na ₂ O	0,15	-	0,5
	Kızdırma kaybı	3,75	< %5,0	2,85
	Cl ⁻	0,0328	< %0,1	0,1
	Rutubet	0,4	-	0,68
	Serbest CaO	1,0	-	-
	Reaktif CaO	57,99	-	-

Çizelge 4.2'de görüldüğü üzere PÇ, yüksek oranda CaO bileşiğinden oluşmaktadır. Ayrıca PÇ'nin kimyasal bileşimi (Cl⁻, SO₃, MgO ve kızdırma kaybı), standartlarda belirtilen sınırlarına uygundur [56]. SD'nin ana bileşeninin %91,6 gibi yüksek oranda SiO₂'den oluştuğu görülmektedir. Bu, puzolanik malzemeler için istenen bir değeri yansıtmaktadır.

4.1.3. XRD Analizleri

PÇ ve SD'ye ait mineralojik yapının belirlenmesi için gerçekleştirilen XRD sonuçları Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



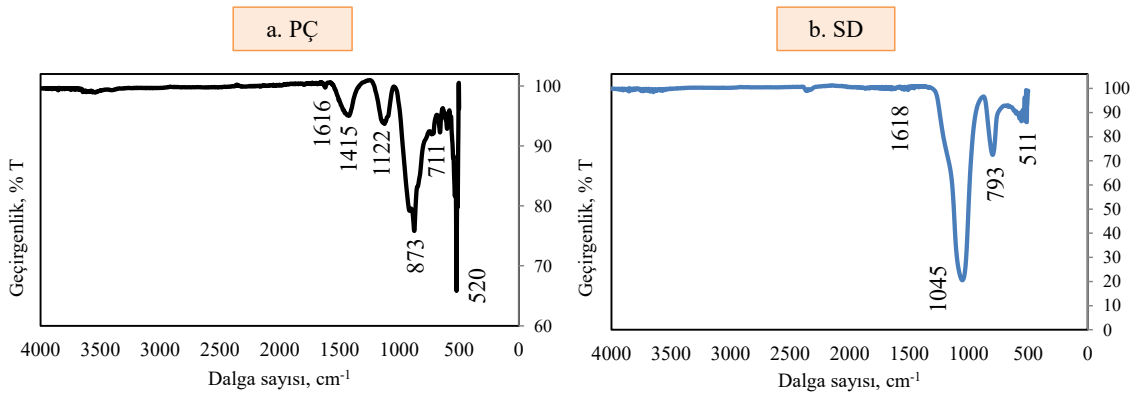
Şekil 4.2. PÇ ve SD'ye ait XRD analizleri.

PÇ'nin XRD analizinde ana bileşenlerin C₃S (3CaOSiO₃), C₂S (2CaOSiO₃), C₃A (3CaO. Al₂O₃) ve C₄AF (4CaO. Al₂O₃ 3.Fe₂O₃) olarak belirlendiği ve XRD desenine göre kristal bir yapıya sahip olduğu izlenmektedir (Şekil 4.2a) [57].

Bununla birlikte SD'nin camı fazının 20'nin yaklaşık 12-40 derece arasında en yüksek olduğu ve kuvars (SiO₂)'tan meydana gelen yoğun amorf yapı Şekil 4.2b'den görülmektedir [58]. Kabaca da olsa SD'ye ait bu amorf yapı ile dayanım arasında doğrusal bir ilişki olabileceği ifade edilebilir [59].

4.1.4. FT-IR Analizleri

Malzemelerin taneciklerindeki molekül gruplarının tanımlanması için fourier dönüşümleri kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) tekniği kullanılmaktadır. PÇ ve SD için elde edilen veriler Şekil 4.3'te görülmektedir.



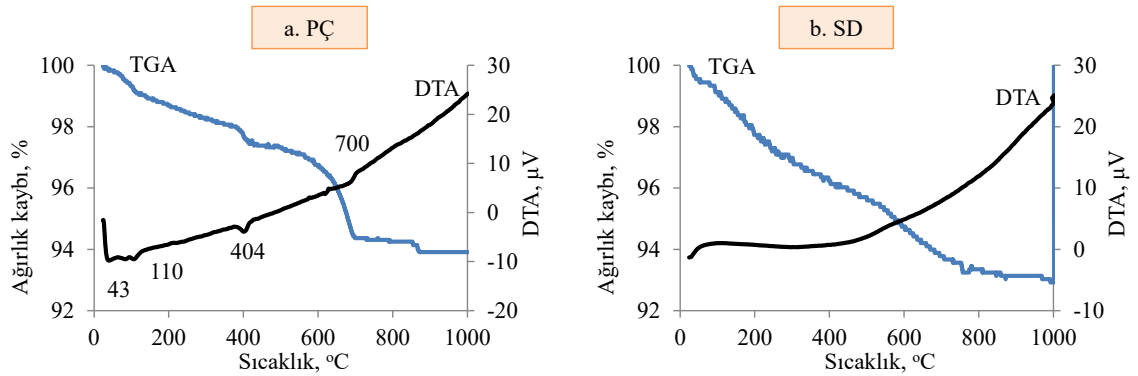
Şekil 4.3. PÇ ve SD'nin FT-IR spektroskopisi.

FT-IR analizinden PÇ'nin dalga sayıları 520, 711, 873, 1122, 1415 ve 1616 cm^{-1} olarak belirlenmiştir. Buna göre, 520 cm^{-1} dalga sayısında Si-O ile birlikte Al-O bağları, 873 cm^{-1} dalga sayıdaysa Si-O bağı titreşim piki şeklinde izlenmektedir. PÇ'de alçıyı gösteren kükürt-oksijen (S-O) bağları 711 ve 1122 cm^{-1} dalga sayılarında tespit edilmiştir. C-O bağı ise 1415 cm^{-1} dalga sayısında belirginleşmiştir. Su moleküllerine ait 3400-3600 cm^{-1} dalga sayıları aralığında ve yapıdaki su iyonları ile moleküllerinin titreşim piklerinin yer alacağı 3400 ve 1616 cm^{-1} dalga sayılarında belirgin bir pik vermediği izlenmektedir (Şekil 4.3a) [60], [61].

SD'nin FT-IR analizine göre 511, 793, 1045 ve 1618 cm^{-1} dalga sayılarında titreşim pikleri izlenmektedir. SD esas olarak amorf SiO_2 'den oluşmaktadır ve spektrumu yaklaşık 511, 793, 1045 cm^{-1} 'de serbest SiO_4 'ün karakteristik Si-O titreşimlerini göstermektedir [62]. SD'nin de PÇ gibi belirgin olmayan 1618 cm^{-1} 'de suyun iyonlarının varlığını gösteren bir dalga sayısı görülmektedir (Şekil 4.3b) [63].

4.1.5. DTA/TGA Analizleri

DTA/TGA (fark esaslı termal/termal gravimetrik) analizleri tek bir numune üzerinde eş zamanlı olarak uygulanmıştır. Elde edilen değerlere ait sonuçlar Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. PÇ ve SD'nin DTA/TGA analizleri.

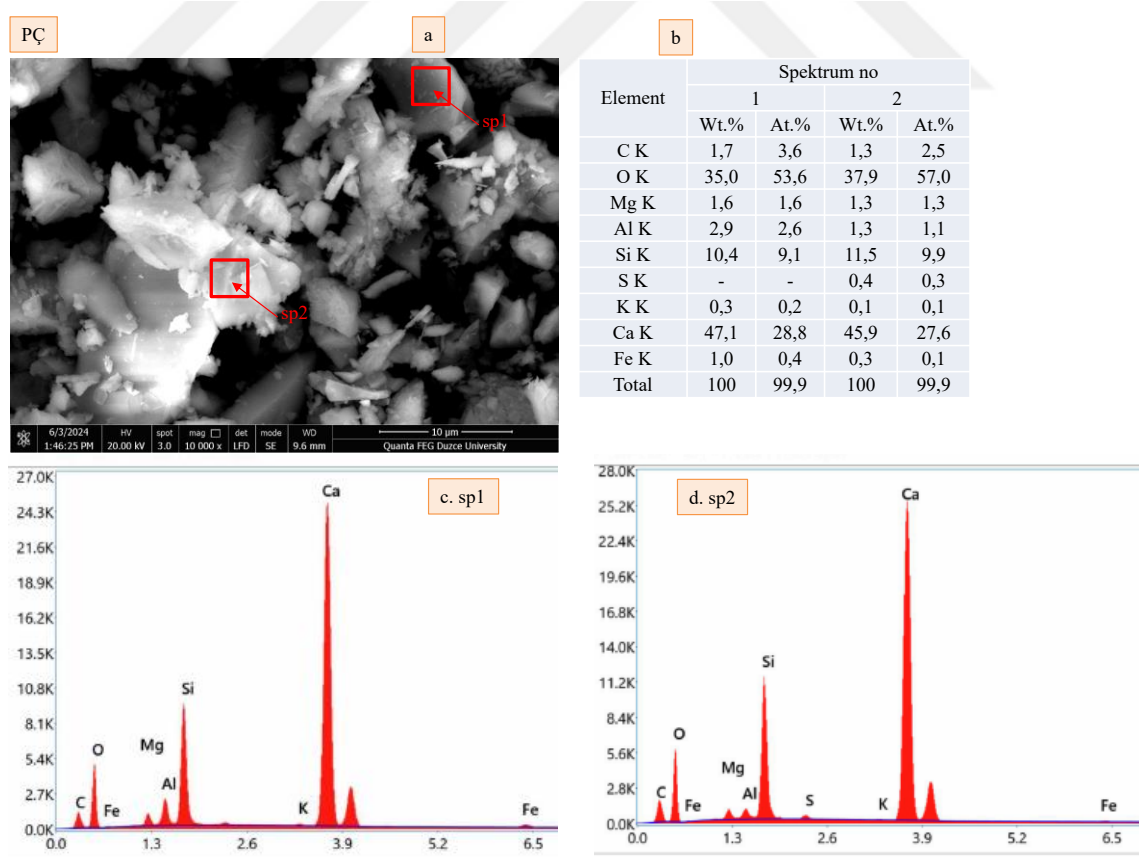
DTA, kil mineralleri, karbonatlar, sülfatlar, zeolitler, gibi mineraller için yapılan tanımlamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca yine bu teknikle çimentonun ana bileşenlerinin hidratasyon esnasında ısı etkisiyle gerçekleşmekte olan dönüşümler de tespit edilebilmektedir. DTA sayesinde reaktif ve reaktif olmayan numune aralarındaki ısı farkları ($^{\circ}\text{C}$) zamanın bir fonksiyonu olarak tespit edilmekte, ayrıca tepkime sıcaklığı, kinetiği ve termodinamiği ile ilgili dikkate değer bilgiler de elde edilebilmektedir. TGA

sayesinde ise, gaz adsorpsiyonu veya ayrılmasıyla ağırlık kayıpları veya yoğun faz oluşumları belirlenebilmektedir [64].

PÇ'nin DTA/TGA analiz sonuçlarına göre 25-200°C sıcaklık aralığında bünyesindeki nemden ve alçıtaşından ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) kaynaklı ağırlık kaybı %1,31 olarak hesaplanmıştır. 400-500°C sıcaklık aralığında portlanditin ağırlık kaybı %0,40 olarak belirlenmiştir. 500-750°C sıcaklık aralığında çimentonun atmosferik hava ile reaksiyonu neticesinde gerçekleşen amorf yapıda kalsit (CaCO_3) kaynaklı karbonat fazlarının ağırlık kaybı ise %3,01 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.4a). SD'ye ait bünyesindeki neme bağlı ağırlık kaybı %2,25 (25-200°C) ve atmosferik hava ile reaksiyonu neticesinde gerçekleşen karbonat fazlarının ağırlık kaybı %2,14 (500-750°C) olarak belirlenmiştir (Şekil 4.4b) [65]. Toplam ağırlık kayıpları ise PÇ'de %6,09, SD de ise %7,08 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.4).

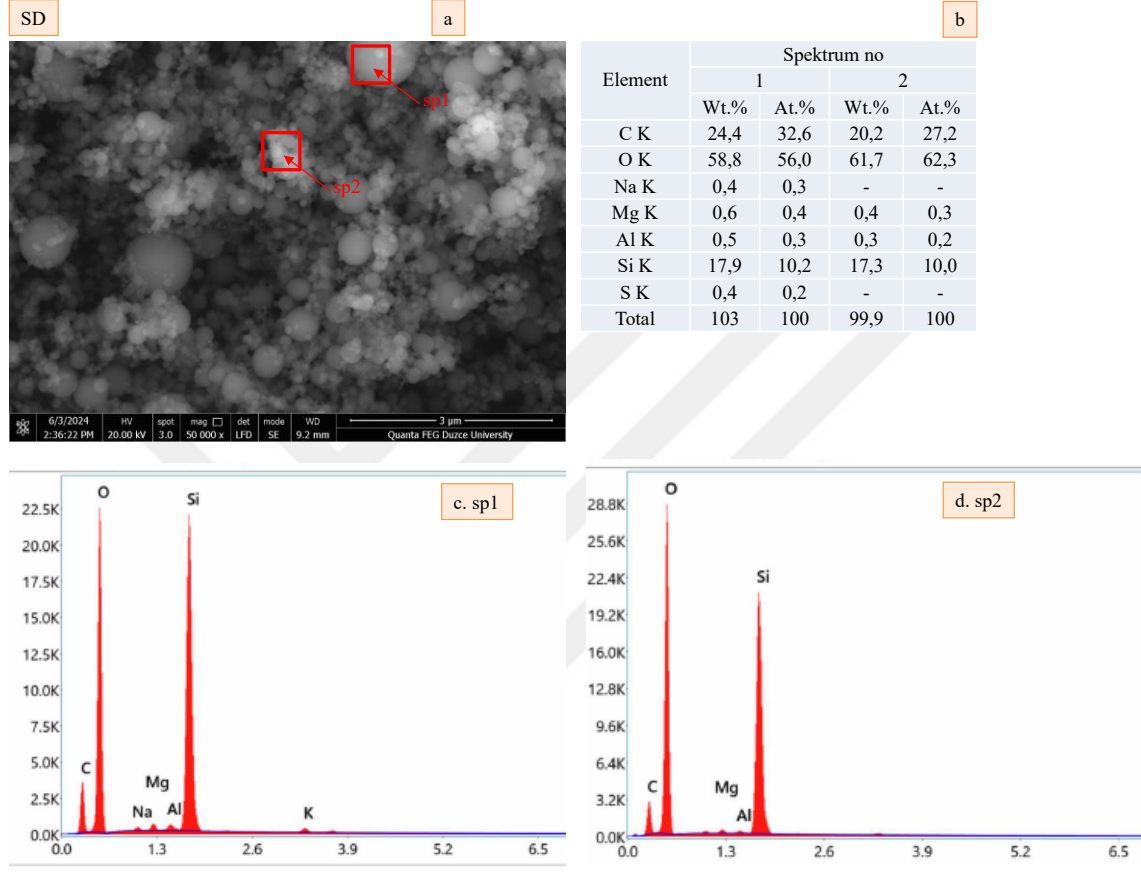
4.1.6. SEM ve EDS Analizleri

PÇ ve SD'nin tane yapılarını özelliklerini daha iyi gözlemleyebilmek için SEM ve EDS analizleri yapılmış ve sırasıyla Şekil 4.5 ve 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.5. PÇ'nin SEM ve EDS analizleri.

PÇ'nin SEM görüntüsüne bakıldığında farklı boyut ve şekillerdeki tanelerin, yapı olarak düzensiz olduğu görülmektedir (Şekil 4.5a). X-ışını spektrometresinde (EDS) hem spektrum 1 hem de spektrum 2'deki tanelerin ana bileşiminin Ca, Si ve O piklerinden oluştuğu (Şekil 4.5c, d), dolayısı ile PÇ'nin ana bileşeninin kimyasal analizinden belirlendiği gibi CaO ve SiO₂ olarak doğrulandığı söylenebilir (Çizelge 4.2).



Şekil 4.6. SD'nin SEM ve EDS analizleri.

Şekil 4.6'ya göre SD'nin küresel ve çok küçük tane yapısına sahip olduğu görülmektedir. SD'nin ortalama parçacık boyutu, çimento parçacıklarından yaklaşık 300-500 kat daha küçük olarak görüntülenmektedir. SD'nin tane boyutlarının literatürde de belirtildiği üzere yaklaşık 100 ila 200 nm aralığında olduğu söylenebilir (Şekil 4.6a) [66].

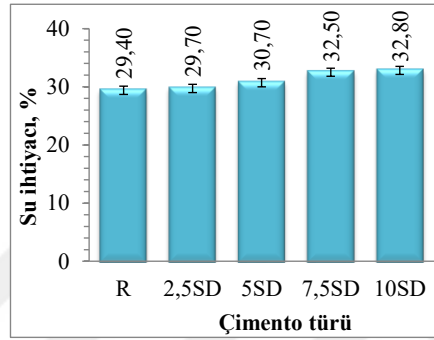
EDS analizinde SD'nin hem spektrum 1 hem de spektrum 2'deki tanelerin ana bileşiminin Si ve O (Şekil 4.6c, d) karakteristik piklerini verdiği, bu yüzden SD'nin Çizelge 4.2'deki kimyasal analizinden görüldüğü gibi ana bileşeninin SiO₂ olarak doğrulandığı izlenmektedir.

4.2. ÇİMENTO HAMURU ÖRNEKLERİNE UYGULANAN DENEYLER

Bu bölümde TS EN 196-3'e uygun olarak belirlenen su ihtiyacı, priz süreleri ve genleşme deneyleriyle ilgili çizelge ve şekillerin verilmesinin ardından TS EN 196-3 2017, çimento hamurlarının hidratasyon gelişimlerinin izlenebildiği XRD, FT-IR, DTA/TGA ve SEM teknikleriyle elde edilen veriler ilgili bölümlerde sunulmuştur.

4.2.1. Su İhtiyacı Deneyleri

Çimento hamurlarının su ihtiyacı Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

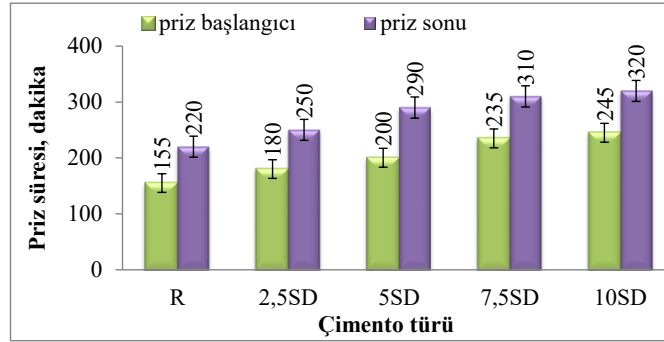


Şekil 4.7. Çimento hamurlarının su ihtiyaçları.

Elde edilen sonuçlara göre en düşük su ihtiyacının referans çimento hamurunda %29,40 ile gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 4.7). 2,5SD, 5SD, 7,5SD ve 10SD hamurlarda su ihtiyaçlarının, referans çimento hamuruna göre sırasıyla %1,02, %4,42, %10,54 ve %11,56 oranında arttığı görülmektedir. Bu sonuçlara göre SD ikameli hamurların su ihtiyaçlarında nispeten bir artış görülmektedir. Bu artışın SD'nin çok küçük tane boyutuna ve çok yüksek özgül yüzey alanına sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak SD'nin küresel tane yapısının işlenebilirliğe olumlu katkı sunacağı için bu durumun olumsuz bir etkiye neden olmayacağı söylenebilir.

4.2.2. Priz Süresi Deneyleri

Çimento hamurlarının priz süreleri Şekil 4.8’de verilmiştir.

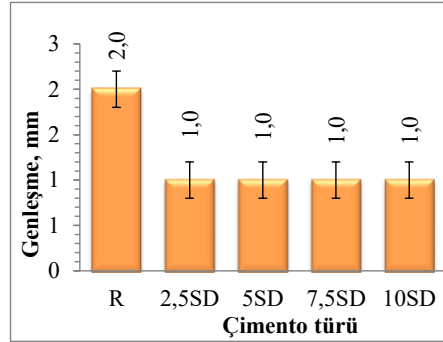


Şekil 4.8. Çimento hamurlarının priz süreleri.

Şekil 4.8’de görülen en küçük 155 dakikayla R kodlu hamurda, en büyük priz başlama süresinin 245 dakikayla 10SD kodlu hamurda olduğu izlenmektedir. PÇ ile hazırlanan çimento hamurlarına göre, priz başlama sürelerinin 2,5SD, 5SD, 7,5SD ve 10SD kodlu çimento hamurlarında sırasıyla %16,1, %29,2, %51,6 ve %58,1 oranında arttığı belirlenmiştir. Priz sonu için yine en küçük sürenin 220 dakikayla R kodlu hamurda, en büyük sürenin 320 dakikayla 10SD kodlu hamura olduğu görülmektedir. Referans çimento hamurlarına göre, 2,5SD, 5SD, 7,5SD ve 10SD kodlu hamurlarda priz sonu süreleri sırasıyla %13,6, %31,8, %40,9 ve %45,5 oranında artış göstermiştir (Şekil 4.8). Bu sonuçlar 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 olduğunu göstermiştir. Dolayısı ile priz sürelerinin standartla sınırlanan değerler içerisinde gerçekleşmesi, işlenebilirlik açısından bir sorunla karşılaşılmayacağını ve dayanımın arzu edilen zaman aralığında sağlanabileceğini göstermektedir. Ayrıca kalıp sökölme işlemlerinin herhangi bir soruna neden olmadan gerçekleşebileceği ve betonun özellikle yaz aylarında negatif etkilenmeyeceği ifade edilebilir.

4.2.3. Genleşme Deneyi Sonuçları

PÇ ve SD ikameli çimento hamurlarının Le Chatelier deneyi ile belirlenen genleşme değerleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Çimento hamurlarının genleşme değerleri.

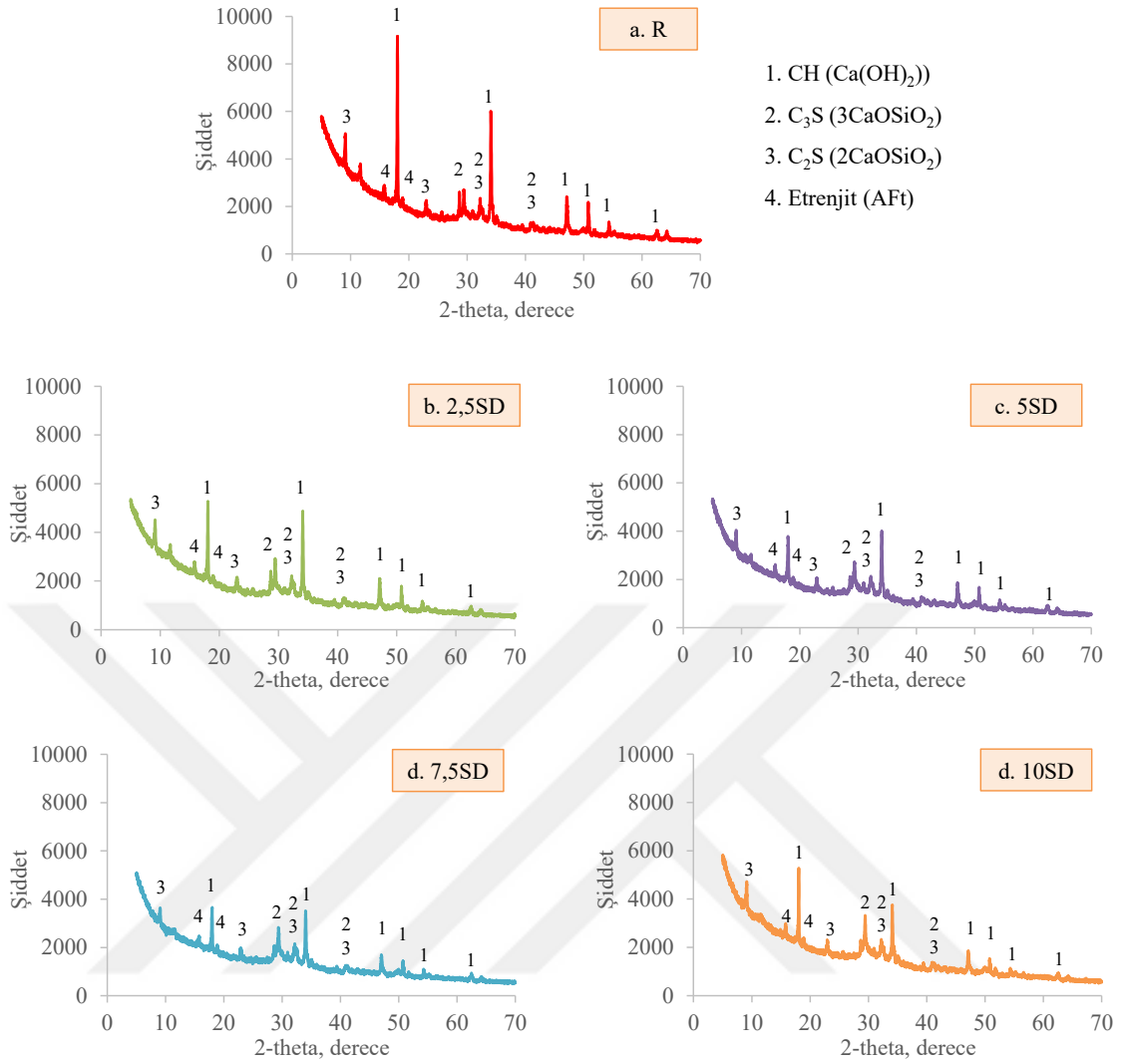
Çimentoların kimyasal yapılarındaki SO_3 , MgO ve CaO içeriğinin çok fazla olduğu durumlarda genleşme meydana gelebilmekte ve bu nedenle de betonda farklı seviyelerde hasarlar meydana gelebilmektedir. Şekil 4.9’a göre R kodlu çimento hamurundaki genleşmenin 2 mm, diğer çimento hamurlarındaki genleşme değerlerinin ise 1 mm olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, genleşme değerleri standart ile sınırlanan 10 mm değerinin altında olduğunu ve genleşme yönünden herhangi bir sorunun olmayacağını göstermektedir [56].

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 4.10’a gösterilmiştir.



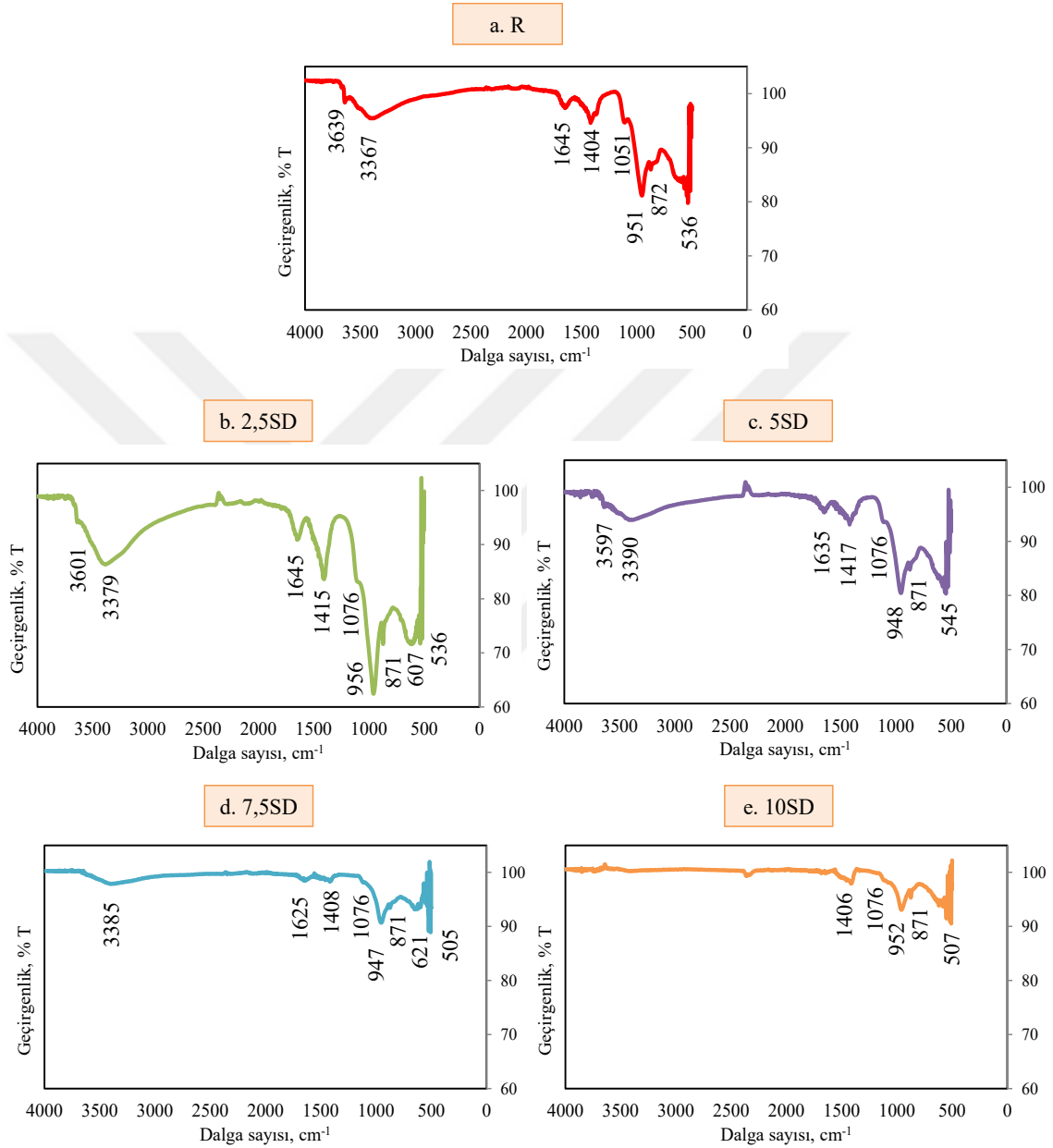
Şekil 4.10. Çimento hamurlarının XRD analizleri.

Şekil 4.10’da, hidrasyon reaksiyonları sonucunda yapının portlandit ($\text{CH}-(\text{Ca}(\text{OH})_2)$) ve hidrate olmamış klinker minerallerinden (alit- 3CaOSiO_3) ve (belit- 2CaOSiO_3) oluştuğu görülmektedir [67].

Amorf yapısı nedeniyle, XRD analizlerinde C-S-H jelinin kırınım bağlarına rastlanamaması nedeniyle C-S-H’nin varlığını kanıtlamak için, daha sonra SEM-EDS analizinde ayrıntılı bir tartışma yapılacaktır. Şekil 4.10’da görülen çimento hamurlarının tümünde CH’nin ana hidrasyon ürünü olduğu görülmektedir. Ayrıca SD ikame oranı arttıkça CH pik yoğunlukları kademeli olarak azalmaktadır. Bu durum, SD’nin puzolanik özelliğinden dolayı portlandit ile reaksiyona girdiğini ve çimento benzeri hidratlı ürünlerin oluşumuna katkı sağlayan puzolanik bir malzeme olduğu doğrulanmaktadır. Bu nedenle ileri yaşlarda ortamdaki SD’nin ve portlandit ile reaksiyona girerek ilave C-S-H jeli veya ikincil C-S-H jeli oluşturacağı söylenebilir. Dolayısı ile bu durum nedeniyle

çimento harçlarının ileri yaşlardaki dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin artacağı düşünülebilir [68], [69], [70], [71], [72].

FT-IR analizi ile hidrasyon gelişimleri Çimento hamurlarının kafes ve molekül yapılarının FT-IR spektrumları Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Çimento hamurlarının FT-IR spektrumları.

Şekil 4.11’de görülen 3597-3639 cm⁻¹ aralığındaki bölgeler, bağlanmış ve absorbe edilmiş su ile C₃S ve C₂S’nin hidrasyonu sırasında oluşan CH’nın yapısal -OH gruplarının ve karışımda bulunan su moleküllerinin serbest -OH gruplarının örtüşen gerilme titreşimlerini göstermektedir. Yapıya tutunmamış su 3367-3390 ve 1625-1645

cm^{-1} aralığındaki bölgelerde geniş absorpsiyon bantları şeklinde gösterilmektedir (Şekil 4.11) [62], [73], [74], [75].

Bu bant, SD ikame oranı arttıkça doğru orantılı olarak azalmış, %7,5SD ve %10SD ikame oranlarında ise yok olmuştur. Bu da C-S-H bağı oluşumu nedeniyle serbest suda bir azalma olduğunu göstermiştir. Dolayısı ile SD'nin CH için puzolanik reaktivitesinin ötesinde, C_3S ve C_2S fazlarının tüketiminin ve C-S-H fazlarının oluşumunun arttığını göstermektedir. Bu durum çimento harçlarının basınç dayanımının artabileceğinin göstergesi olarak değerlendirilmektedir [70], [73], [76].

CH'nin karbonasyonu ile oluşan karbonat fazları (CO_3^{2-}) $1404\text{-}1417\text{ cm}^{-1}$, $871\text{-}872\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki bölgelerde görülmektedir [75], [77], [78].

Ayrıca hidrate olmuş CS'ler $947\text{-}956\text{ cm}^{-1}$ ve hidrate olmamış CS'ler $505\text{-}545\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığında belirginleşmektedirler [75].

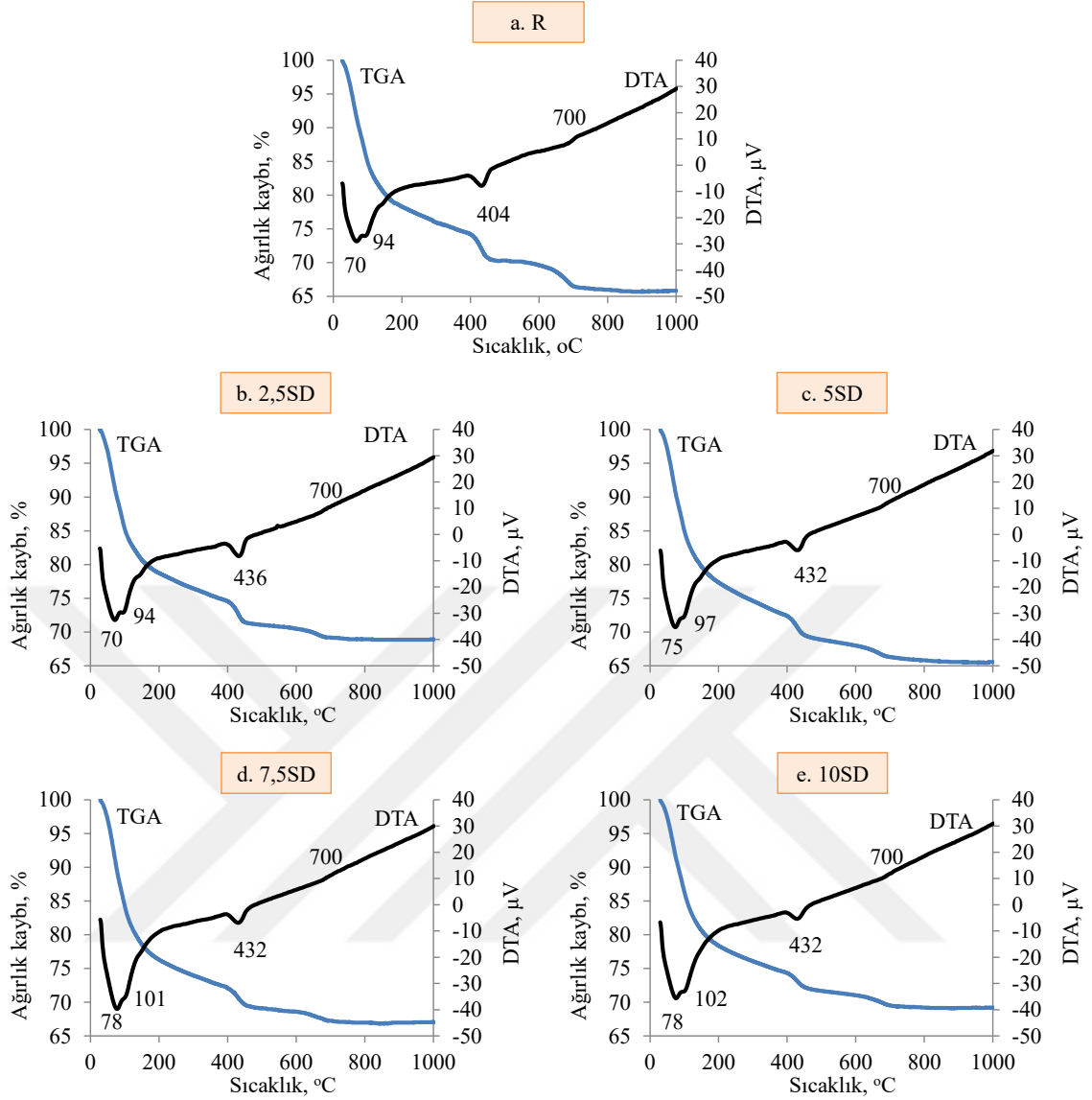
Alçıtaşı ve etrenjitin S-O bağı, $1051\text{-}1076\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki bantların gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Bu bant, SD ikame oranı arttıkça küçülmekte ve 10SD kodlu hamurda daha az ölçüde etrenjit oluşumunu göstermektedir [73].

CaCO_3 'ün varlığı, $2800\text{-}3700\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki bölgelerdeki geniş absorpsiyon bantları şeklinde oluşmaktadır (Şekil 4.11) [75].

Bu sonuçlar, XRD analizlerinden elde edilen verilerle bütünlük sağlamaktadır.

4.2.4.2. DTA/TGA Analizi ile Hidratasyon Gelişimleri

DTA/TGA analizleriyle çimento hamurlarının faz gelişimleri incelenmiş ve elde edilen veriler Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Çimento hamurlarının DTA/TGA analizi.

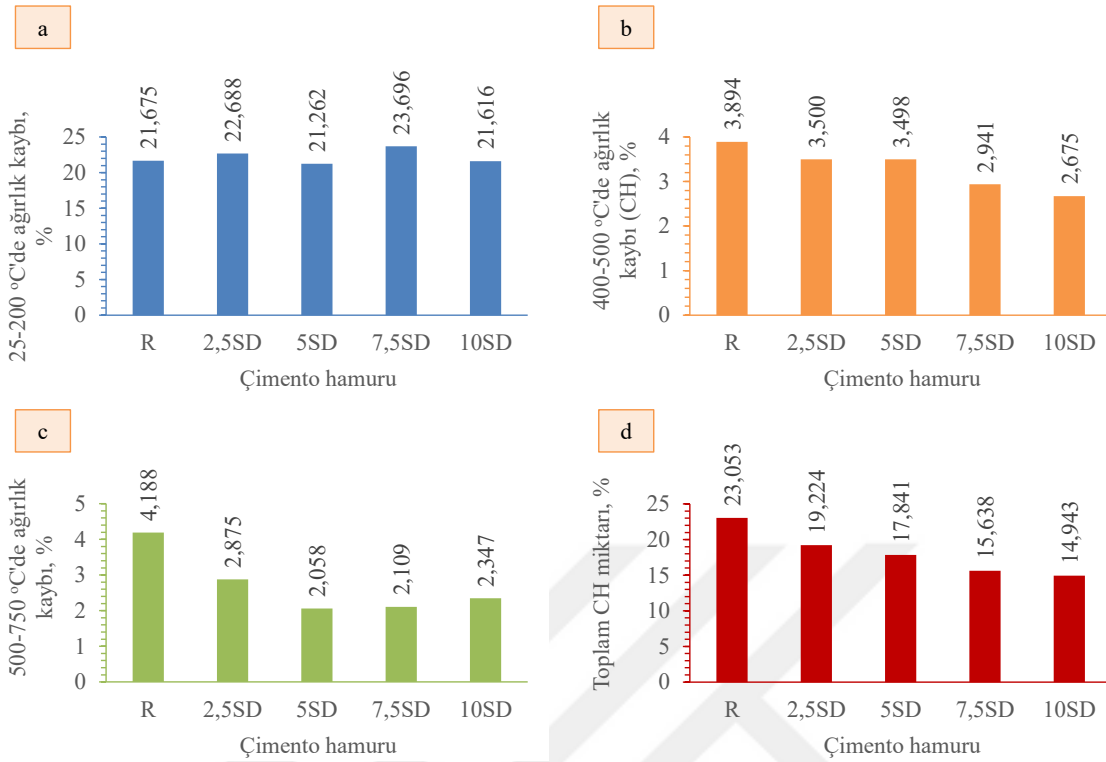
Çimento hamurlarında C-S-H, Etrenjit (AFt), yapısal ve kristal su fazları 25-200°C sıcaklık aralıklarında oluşmaktadır. CH'nin ayrışması 400-500°C, CaCO₃'ün ayrışması 500-750°C aralığında meydana gelmektedir [72], [79], [80].

Şekil 4.12'deki verilerden hesaplanmış olan ağırlık kayıpları Şekil 4.13a, b ve c'de verilmiştir. CH'nin toplam içeriği, CH'nin dehidrasyonu ve CaCO₃ ayrışım kütesinden yararlanarak Denklem 4.1 ile hesaplanabilir.

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

Denklemdeki a₁ ve a₂, sırasıyla CH'nin ve CaCO₃'ün ağırlık kayıplarını göstermektedir. CH, H₂O ve CO₂'nin molekül ağırlıkları sırasıyla 74, 18 ve 44 şeklindedir [72], [79], [80].

Toplam CH içeriği Denklem 4.1’den hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 4.13d gösterilmiştir.



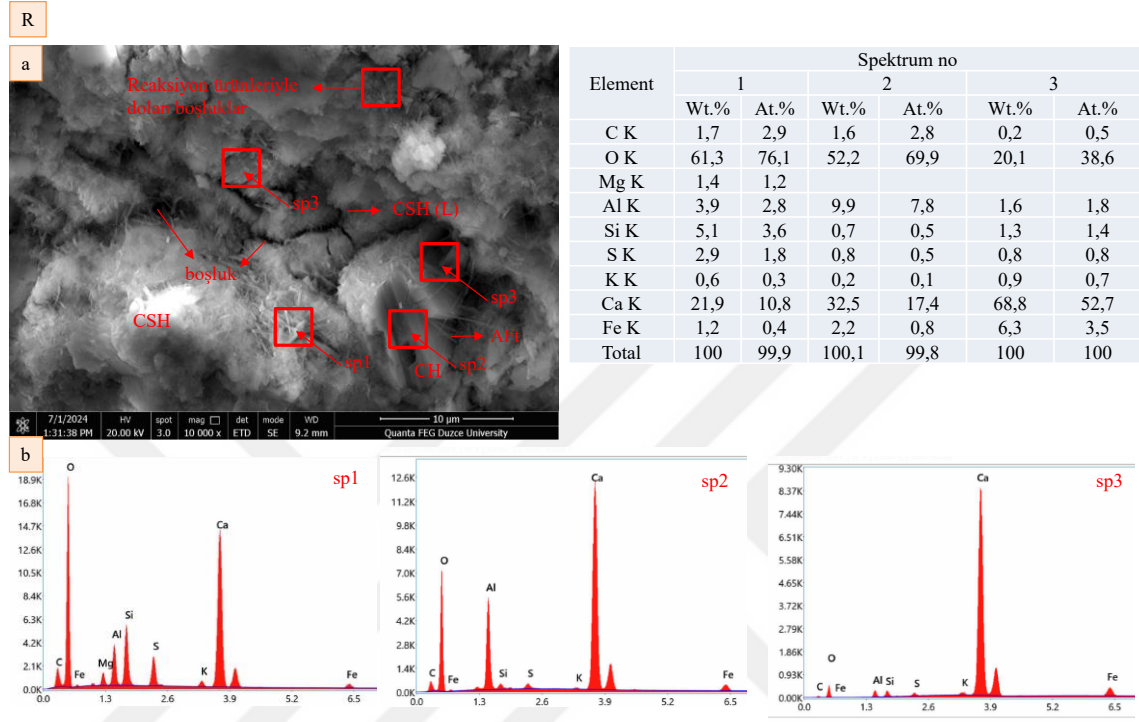
Şekil 4.13. Farklı sıcaklıklara ait çimento hamurlarının ağırlık kayıpları.

Elde edilen ağırlık kayıplarına göre, 25-200°C sıcaklık aralığında R kodlu hamurda %21,67 oranında; 2,5SD, 5SD, 7,5SD ve 10SD kodlu hamurlarda ise sırasıyla, %22,68, %21,26, %23,69 ve %21,61 oranlarında meydana gelmiştir (Şekil 4.13a). 400-500°C ve 500-750°C sıcaklık aralıklarında R kodlu hamurda CH'nin ve CaCO_3 'ün ayrışmasından kaynaklı kayıplar sırasıyla %3,89 ve %4,19 olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.13b, c). CH'nin ve CaCO_3 'ün ayrışmasından kaynaklı kayıplar 2,5SD, 5SD, 7,5SD ve 10SD kodlu çimento hamurlarında ise sırasıyla, %3,50-4,18, %3,49-2,87, %2,94-2,10 ve %2,67-2,34 olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.13b, c). Denklem 4.1'den hesaplanan toplam CH içeriği referans çimento hamurunda %23,05 oranında meydana gelmiştir. 2,5SD, 5SD, 15 SD ve 10SD kodlu çimento hamurlarında sırasıyla, %19,22, %17,84, %15,63 ve %14,94 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4.13d). Elde edilen bu veriler, SD ile serbest CH arasındaki bağ oluşumunun gerçekleştiği ve sonuçların literatürle uyumlu olduğunu göstermiştir [73].

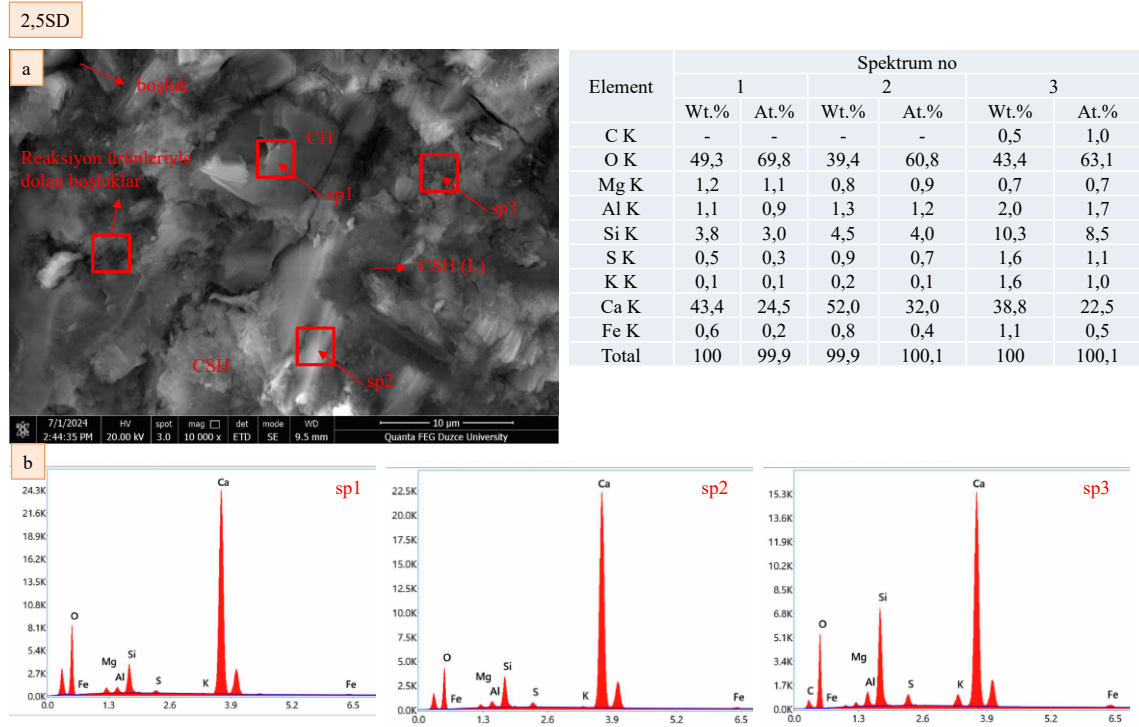
Ayrıca termal analiz verileri, XRD ve FT-IR teknikleriyle elde edilen bulgularla uyumludur.

4.2.4.3. Çimento Hamurlarının SEM Analizleri

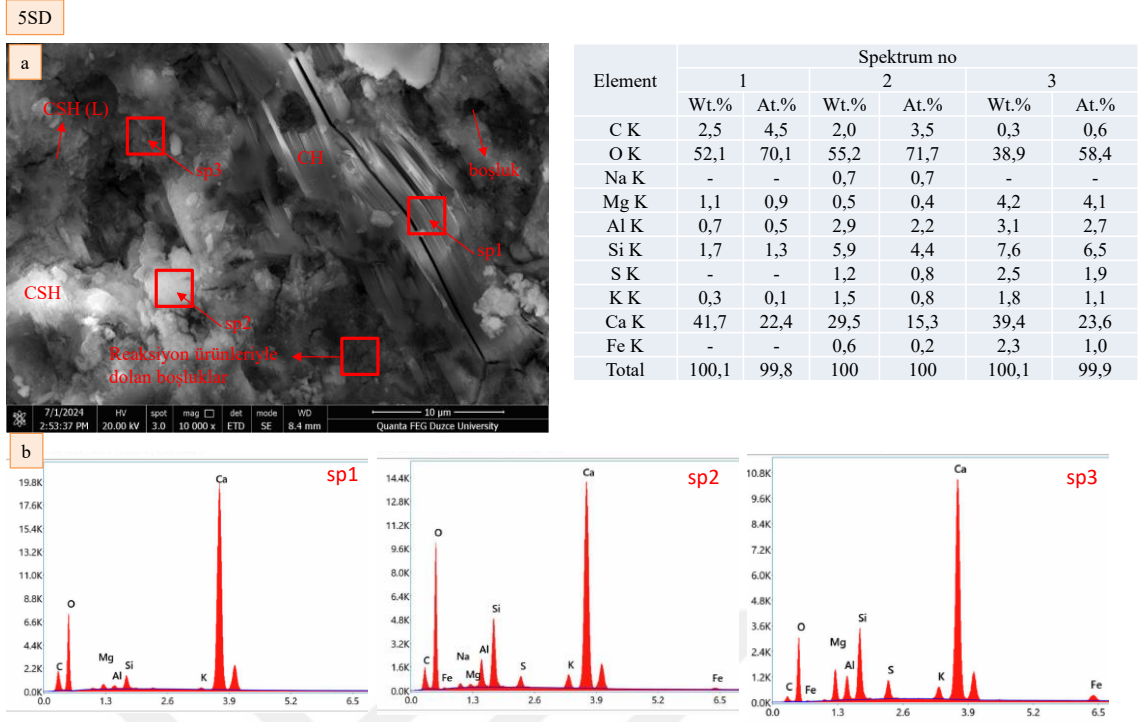
Çimento hamurlarının mikro yapılarını inceleyebilmek için gerçekleştirilen R, 2,5SD, 5SD, 7,5SD ve 10SD kodlu hamurların SEM görüntüleri ve EDS analizleri sırasıyla Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilmiştir.



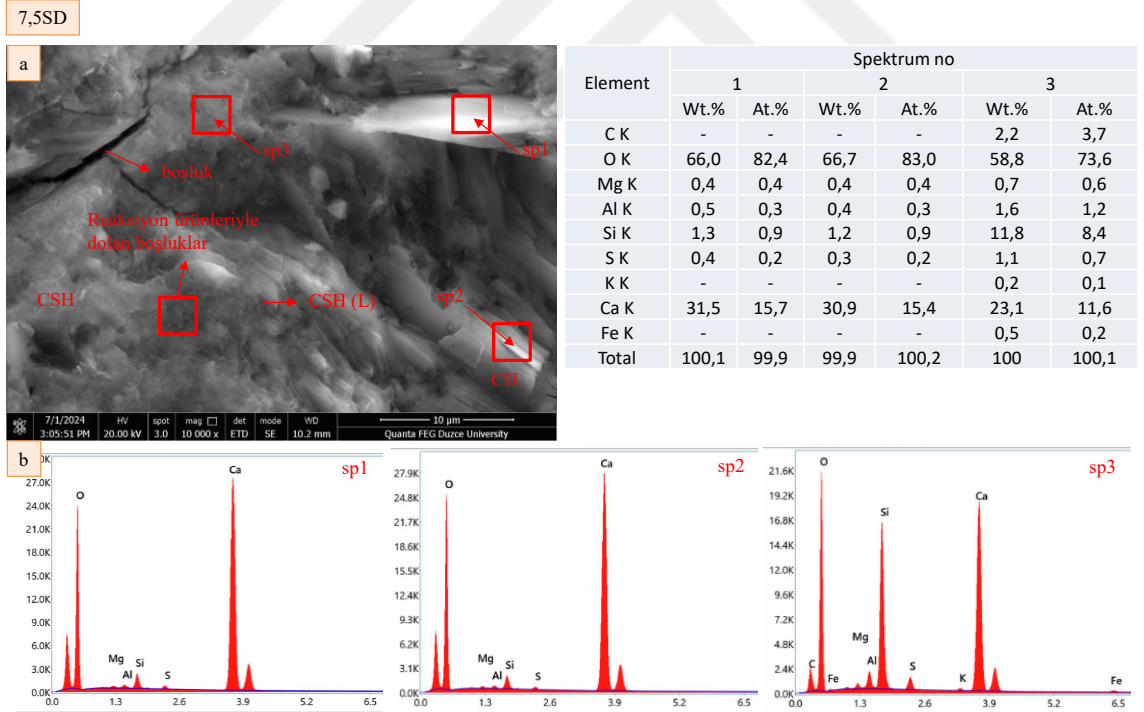
Şekil 4.14. Referans çimento hamurunun SEM/EDS görüntüsü.



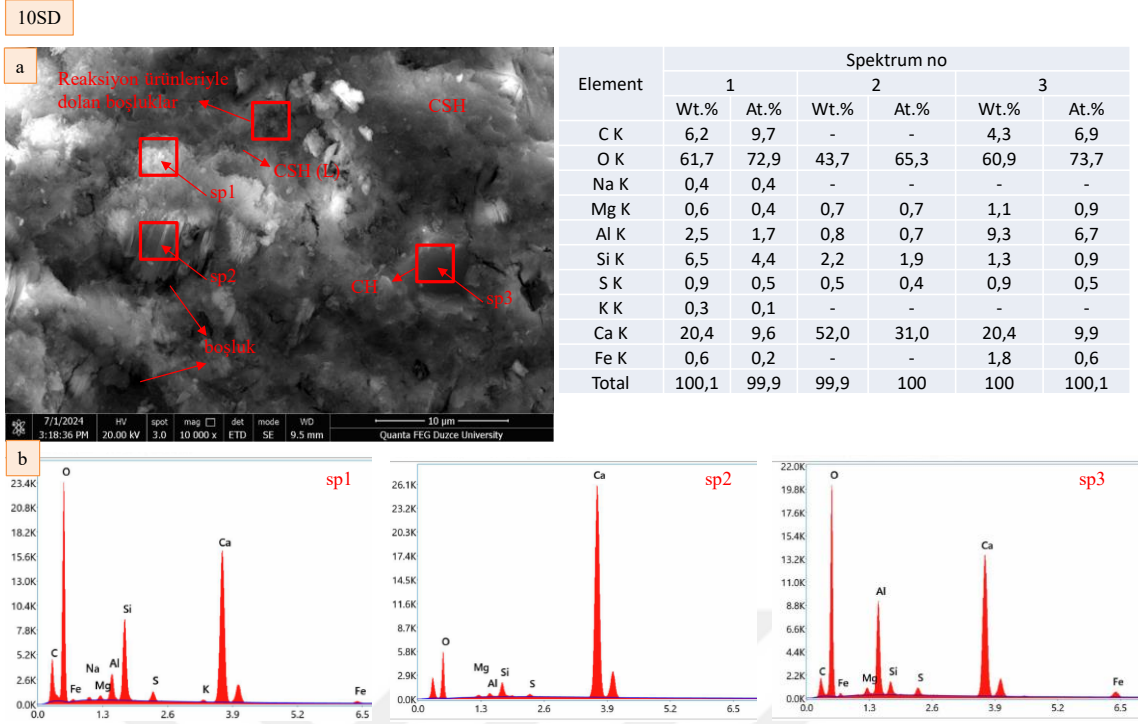
Şekil 4.15. 2,5SD kodlu çimento hamurunun SEM/EDS görüntüsü.



Şekil 4.16. 5SD kodlu çimento hamurunun SEM/EDS görüntüsü.



Şekil 4.17. 7,5SD kodlu çimento hamurunun SEM/EDS görüntüsü.



Şekil 4.18. 10SD kodlu çimento hamurunun SEM/EDS görüntüsü.

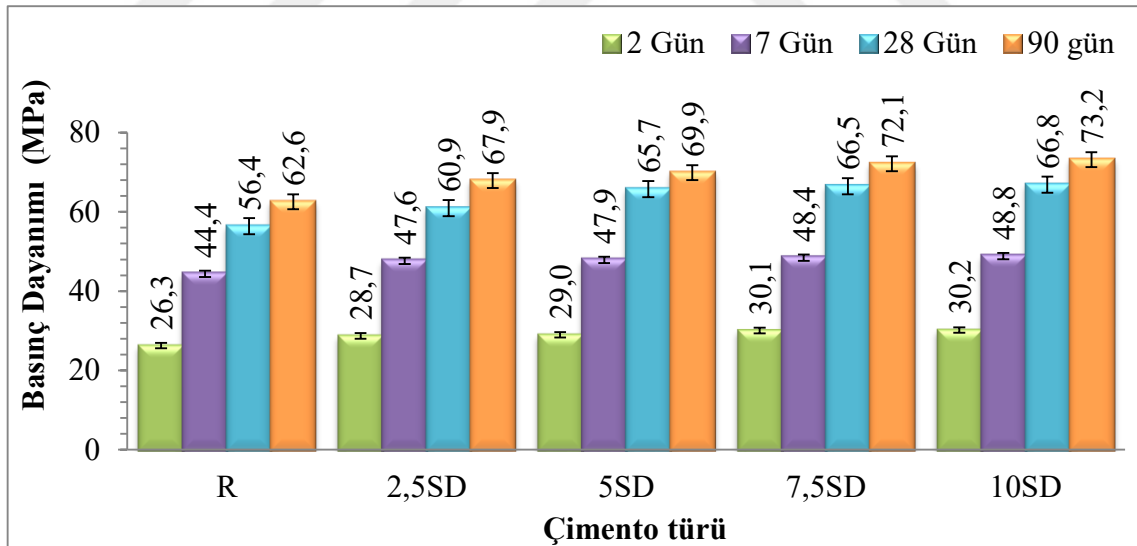
SEM, çimento hamurunun morfolojisini incelemek için en etkili yollardan birisidir. Elde edilen görüntülerde, C-S-H, C-S-H'nin ihsinal lifsi yapısı, CH ve hegzagonal yapıdaki etrenjit (Aft) kristallerinin heterojen bir dağılımı olduğu görülmektedir. Yapı içerisinde bazı mikro çatlaklar da yer yer izlenmektedir. R kodlu çimento hamurunda, CH ile birlikte 1-2 mikron arasında yer yer boşluklar görülmektedir (Şekil 4.14a). Ayrıca şekilsiz jel (C-S-H), yapıda hakim fazı oluşturmuş ve boşlukları doldurarak kararlı bir yapı meydana getirmiştir (Şekil 4.14a). Karışıma SD eklendiğinde içinde bulunan silika, XRD ve termal analizlerle de tespit edildiği gibi mevcut CH ile reaksiyona girerek ikincil C-S-H jelini oluşturmuştur. Bu ilave C-S-H jeli, çimento hamurunun mikro yapısını yoğunlaştırmış ve boşlukları azaltmıştır (Şekil 4.15a, Şekil 4.16a, Şekil 4.17a, Şekil 4.18a). Bu gözenekler, dolgu maddesi görevi de gören ve çimento parçacıkları arasındaki boşlukları dolduran hidratlanmamış SD nedeniyle daha da küçülmüştür. Ayrıca SD ikameli çimento hamurlarındaki C-S-H miktarı, Referans çimento hamuruna kıyasla daha fazladır. Bu miktar SD ikame oranı ile doğru orantılı olarak artmıştır. Bu da SD ikameli hamurların, Referans hamura kıyasla daha az boşluğa sahip olduğunu ve dolayısı ile kompakt yapı sayesinde daha yüksek mukavemet değerine ulaşacağını göstermektedir [70], [81].

Mikro yapı görüntülerinin dışında çimento hamurlarında farklı şekil ve boyutlardaki hidratasyon ürünlerinin element yapısının belirlenebilmesi için EDS analizi yapılmıştır.

Bunun için farklı yapıdaki üç hidratasyon ürününün element yapısı incelenmiştir. R kodlu hamurun EDS analizine göre ana elementlerin spektrum 1'e göre Ca ve Si, spektrum 2'ye göre Ca ve Al ve spektrum 3'e göre ise Ca olduğu görülmektedir (Şekil 4.14b). 2,5SD kodlu hamurun her üç spektruma göre de ana elementin Ca olduğu ve ikincil elementin ise farklı miktarlardaki Si olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.15b). 5SD kodlu hamurun ana elementlerinin spektrum 1'e göre Ca, spektrum 2 ve 3'e göre Ca ve Si olduğu izlenmektedir (Şekil 4.16b). 7,5SD kodlu hamurun ana elementlerinin spektrum 1 ve 2'ye göre Ca, spektrum 3'e göre Ca ve Si olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.17b). 10SD kodlu hamurun ana elementlerinin spektrum 1'e göre Ca ve Si, spektrum 2'ye göre Ca ve spektrum 3'e göre Ca ve Al olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.18b). Bu verilerin, çimento hamurunun C-S-H, C-S-H (L), CH ve etrenjit (Aft) kristalleri gibi hidratasyon ürünleri ve miktarları hakkında fikirler vermesi açısından dikkate değer olduğu düşünülmektedir.

4.3. SİLİS DUMANININ BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ

Çimento harçlarının hidratasyonun 2, 7, 28 ve 90. günlerindeki basınç dayanımları Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Çimento harçlarının basınç dayanımları.

Şekil 4.19'a göre 2. günde en düşük basınç dayanımı 26,3 MPa ile R kodlu harç örneğinde, en yüksek basınç dayanımının ise 30,2 MPa ile 10SD harç örneğinde meydana gelmiştir. Referans harç örneğine göre, basınç dayanımlarının 2. gününde 2,5SD, 5SD, 7,5SD ve 10SD kodlu harç örneklerinde sırasıyla %9,2, %10,3, %14,4 ve %14,9 oranlarında artmıştır. 7. günde en düşük basınç dayanımı 44,4 MPa ile R kodlu numune,

en yüksek basınç dayanımını ise 48,8 MPa ile 10SD kodlu numunede elde edilmiştir. Referans numuneye göre, 7. günde 2,5SD, 5SD, 7,5SD ve 10SD kodlu numunelerde sırasıyla %7,3, %7,9, %9,0 ve %9,9 oranlarında basınç dayanımlarında artış olmuştur. 28. günde en düşük basınç dayanımı 56,4 MPa ile R kodlu örnekte, en yüksek basınç dayanımı ise 66,8 MPa ile 10SD kodlu örnekte görülmektedir. Referans örneğe kıyasla, basınç dayanımlarının 28. gününde 2,5SD, 5SD, 7,5SD ve 10SD kodlu örneklerde sırasıyla %8,1, %16,6, %17,9 ve %18,5 oranlarında bir artış belirlenmiştir. Hidratasyonun 90. Gününde ise en düşük basınç dayanımının 62,6 MPa ile Referans numunede, en yüksek basınç dayanımının ise 73,2 MPa ile 10SD kodlu numunede meydana gelmiştir. Referans numuneye kıyasla, 2,5SD, 5SD, 7,5SD ve 10SD kodlu numunelerin basınç dayanımlarında 90. günde sırasıyla %8,5, %11,7, %15,2 ve %16,9 oranlarında artış gerçekleşmiştir (Şekil 4.19).

Bu sonuçlar SD ikameli tüm numunelerin basınç dayanım değerlerinin referans harçlara göre arttığını göstermektedir. Bu verilere göre SD'nin reaksiyonu, çimentoya su karıştırıldıktan sonraki ikinci günden itibaren başlamış ya da çok küçük tane boyutu yapısı nedeniyle dolgu malzemesi olarak işlev görmüş ve erken yaşlarda basınç dayanımına katkı sağlamıştır. İleriki yaşlardaki reaksiyonlar ise, amorf silika içeriğine ve yüksek yüzey alanına sahip olan SD ile reaksiyona girecek serbest kireç (CH) mevcut olduğunda başlamıştır. Bu sayede çimento harcına dayanım kazandıran ilave C-S-H jeli üretmiş ve basınç dayanımlarında artış meydana gelmiştir [70].

Bu reaksiyon XRD, FT-IR, termal analiz ve SEM görüntüleri ile kanıtlanmıştır. Dolayısı ile önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi, silis dumanının çimentolu kompozitlerin mikro yapısı ve mekanik özellikleri açısından önemli bir fizikokimyasal etkiye sahip olduğu görülmektedir [13], [82], [83].

Bunun yanı sıra 2,5SD kodlu harcın 2 ve 28 günlük basınç dayanımı sırasıyla 28,7 MPa (≥ 20 MPa) ve 60,9 MPa (42,5-62,5 MPa) değeri ile standartta belirtilen norm basınç değerini sağlamış ve 42,5 R dayanım sınıfında olduğu belirlenmiştir. 5SD kodlu harcın 2 ve 28 günlük basınç dayanımı sırasıyla 29,0 MPa (≥ 20 MPa) ve 65,7 MPa ($\geq 52,5$ MPa) değeri ile standartta belirtilen norm basınç değerini sağlamış ve 52,5 N dayanım sınıfında olduğu belirlenmiştir. 7,5SD ve 10SD kodlu harçlar ise 2 ve 28 günlük basınç dayanımı sırasıyla 30,1-30,2 MPa (≥ 30 MPa) ve 66,5-66,8 MPa ($\geq 52,5$ MPa) değeri ile standartta belirtilen norm basınç değerini sağlamış ve 52,5 R dayanım sınıfında olduğu belirlenmiştir [56].

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde CEM I 42,5 R tipindeki Portland çimentoya %0 (PÇ), %2,5, %5, %7,5 ve %10 oranlarında SD ikame edilerek elde edilen 5 farklı çimento üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Öncelikle hammaddeler üzerinde fiziksel, kimyasal, mineralojik, moleküler ve mikro yapı gibi analizler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu beş farklı çimento ile hazırlanan hamur ve harçların özelliklerini belirlemek için standart çimento deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden basınç dayanımları için 2., 7., 28. ve 90. hidrasyon günleri tercih edilmiştir. Ayrıca çimento hamurlarının hidrasyon gelişimleri 28 günde XRD, FT-IR, DTA/TGA ve SEM/EDS analizleriyle izlenmiştir.

Hammaddeler üzerinde yapılan analizlere göre:

- ✓ Tane boyut ve elek analizi sonuçlarına göre PÇ'nin tane yapısının oldukça ince olduğu;
- ✓ Özgül ağırlık ve Blaine değerlerine göre düşük özgül ağırlıklı ve yüksek Blaine değerli SD ikameli çimentolar üretilebileceği;
- ✓ Kimyasal analiz sonuçlarına göre PÇ'nin kimyasal bileşiminin (Cl^- , SO_3 , MgO ve kızdırma kaybı) TS EN 197-1 standardı sınırlarına uygun olduğu, SD'nin ana bileşeninin yüksek oranda SiO_2 'den (%91,6) oluştuğu ve puzolanik malzemeler için istenen değeri yansıttığı;
- ✓ Malzemelerin mineralojik özelliklerine göre; PÇ'nin XRD desenlerinin, tipik bir çimentoda olması gerektiği gibi kristal bir yapıda olduğu, SD'nin kuvars (SiO_2)'den meydana gelen yoğun bir amorf yapı şeklinde oluştuğu ve bu amorf yapı ile dayanım arasında doğrusal bir ilişkinin olabileceği;
- ✓ Malzemelerin moleküler özelliklerine göre PÇ ve SD'nin bağ yapılarının literatürle uyumlu olarak elde edildiği;
- ✓ DTA/TGA analizlerine göre PÇ ve SD'nin toplam ağırlık kayıplarının sırasıyla %6,09 ve %7,08 oranlarda meydana geldiği;
- ✓ PÇ ve SD'nin mikro yapılarını incelemek için gerçekleştirilen EDS analizlerine göre kimyasal özelliklerdeki sonuçlarla uyumlu olduğu, SEM analizine göre PÇ'nin farklı boyut ve şekillerde yapı olarak düzensiz olduğu, SD'nin 100 ila 200 nm çimento parçacıklarından yaklaşık 300-500 kat daha küçük küresel ve çok

küçük tane yapısına sahip olduğu görülmektedir.

Çimento hamurları üzerinde yapılan deney ve analizlere göre:

- ✓ Çimento hamurlarının su ihtiyaç değerlerinin; malzemelerin inceliği, fiziksel, kimyasal, mineralojik özelliklerine göre farklılıklar gösterdiği ve SD ikamesi ile üretilen çimento hamurlarının SD ikamesiyle doğru orantılı olarak su ihtiyaçlarında nispeten bir artış görülürse de bu durumun olumsuz bir etkiye neden olmayacağı;
- ✓ Çimento hamurlarının priz süreleri dikkate alındığında işlenebilirlik açısından bir sorunla karşılaşılmayacağı, dayanımın arzu edilen zaman aralığında gerçekleşeceği, kalıpların sökülme sürelerinin ve işlemlerinin herhangi bir soruna neden olmadan gerçekleşebileceği ve betonun özellikle yaz aylarında negatif etkilenmeyeceği;
- ✓ R kodlu hamurdaki genişlemenin 2 mm, SD ikameli hamurların genişleme değerlerinin 1 mm olarak elde edildiği, dolayısı ile TS EN 197-1 ile sınırlanan 10 mm değerinin altında kalarak herhangi bir sorun teşkil etmeyeceği;
- ✓ XRD analizlerine göre SD ikame oranı arttıkça portlandit pik yoğunluklarının kademeli olarak azaldığı, bu nedenle ortamdaki SD'nin ve portlanditin ileri yaşlarda reaksiyona girerek ilave C-S-H jeli oluşturacağı, dolayısı ile çimento harçlarının özellikle ileri yaşlarda dayanım ve dayanıklılık özelliklerine katkı sağlayabileceği;
- ✓ FT-IR sonuçlarına göre SD ikamesiyle doğru orantılı olarak C-S-H bağ oluşumunun gerçekleşmesi nedeniyle serbest suda bir azalma olduğunu ve SD'nin CH için puzolanik reaktivitesinin ötesinde, C₃S ve C₂S fazlarının tüketiminin ve C-S-H fazlarının oluşumunun arttığı;
- ✓ DTA/TGA ile yapılan analizlere göre SD ile serbest kalsiyum hidroksit arasındaki bağ oluşumunun gerçekleştiği, dolayısı ile SD ikame oranıyla doğru orantılı olarak CH miktarının azaldığı ve elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu;
- ✓ SEM görüntülerine göre SD'nin içerisindeki silikanın CH ile reaksiyonu sonucu ilave C-S-H jeliyle çimento hamurundaki boşlukları azalttığı ve bu sayede yüksek mukavemet değerine ulaşılabilceği belirtilebilir.

Çimento harçları üzerinde yapılan basınç dayanımlarına göre:

- ✓ Basınç dayanımı sonuçlarına göre SD ikameli harç örneklerinin basınç dayanım değerlerinin referans harçlara kıyasla tüm ikame oranlarında arttığı, bu artışların çimentoya su karıştırıldıktan sonraki ikinci günden itibaren başladığı, çok küçük tane boyutu yapısı nedeniyle dolgu malzemesi olarak işlev görerek erken yaşlarda basınç dayanımına katkı sağladığı;
- ✓ SD'nin yüksek yüzey alanı ve amorf silika içeriğiyle özellikle ileriki yaşlarda SD ile reaksiyona giren serbest kireç (CH) ile ilave C-S-H jeli üretildiği ve bu sayede basınç dayanımlarında artış meydana geldiği;
- ✓ 2,5SD kodlu harcın TS EN 197-1 standardında belirtilen 2 günlük (20 MPa) ve 28 günlük (42,5-62,5 MPa) norm basınç değeriyle 42,5 R dayanım sınıfının şartlarını sağladığı;
- ✓ 5SD kodlu harcın TS EN 197-1 standardında belirtilen 2 günlük (20 MPa) ve 28 günlük ($\geq 52,5$ MPa) norm basınç değeriyle 52,5 N dayanım sınıfının şartlarını sağladığı;
- ✓ 7,5 ve 10SD kodlu harçların ise TS EN 197-1 standardında belirtilen 2 günlük (30 MPa) ve 28 günlük ($\geq 52,5$ MPa) norm basınç değeriyle 52,5 R dayanım sınıfının şartlarını sağladığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak endüstriyel bir atık olan SD'nin çimentoya ikame edilmesiyle, dayanım ve dayanıklılık açısından katkı sağlanabileceği gibi daha az klinker üretimi gerçekleştirilerek hem ekolojik hem de ekonomik olarak katkı da sağlanabileceği ifade edilebilir.

Ayrıca CEM I 42,5 R tip çimento, %10 oranında SD ikamesinin hem hidratasyon reaksiyonları hem de basınç dayanımı sonuçları açısından en uygun oran olarak belirlendiği tespit edilmiştir. Ancak diğer çimento tipleri ve mineral katkıların ayrı ayrı ya da birlikte ikamesi ile üretilen çimentoların DTA/TGA, FT-IR, XRD ve SEM/EDS gibi analizlerinin yapılacak diğer çalışmalarda kullanılmasının hidratasyon reaksiyonlarının ve meydana gelen değişimlerin daha iyi anlaşılması açısından yararlı olacağını, çimento ve beton sektörüyle ilgili literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

6. KAYNAKÇALAR

- [1] A. I. Okoji, A. N. Anozie, ve J. A. Omoleye, “Evaluating the thermodynamic efficiency of the cement grate clinker cooler process using artificial neural networks and ANFIS,” *Ain Shams Engineering Journal*, c. 13, sayı 5, s. 101704, 2022.
- [2] C. Karaaslan, E. Yener, T. Bağatur, ve R. Polat, “Improving the durability of pumice-fly ash based geopolymer concrete with calcium aluminate cement”, *Journal of Building Engineering*, c. 59, s. 105110, 2022.
- [3] N. B. Singh ve B. Middendorf, “Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview,” *Construction and Building Materials*, c. 237, s. 117455, 2020.
- [4] Y. Kocak 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.
- [5] A. Meena, N. Singh, ve S. P. Singh, “Shear strength and microstructural investigation on high-volume fly ash self-compacting concrete containing recycled concrete aggregates and coal bottom ash,” *Materiales de Construcción*, c. 74, s. 353, ss. 1-21, 2024.
- [6] D. Gao, Y. Meng, L. Yang, J. Tang, ve M. Lv, “Effect of ground granulated blast furnace slag on the properties of calcium sulfoaluminate cement,” *Construction and Building Materials*, c. 227, s. 116665, 2019.
- [7] Y. Li, X. Mu, Y. Li, S. Zhang, ve W. Ni, “Substitution of blast furnace slag by melting furnace slag as active component in green concrete application,” *Construction and Building Materials*, c. 449, s. 138509, 2024.
- [8] M. A. Uddin, M. T. Bashir, A. M. Khan, F. Alsharari, F. Farid, ve R. Alrowais, “Effect of Silica Fume on Compressive Strength and Water Absorption of the Portland Cement–Silica Fume Blended Mortar,” *Arabian Journal for Science Engineering*, c. 49, sayı 4, ss. 4803-4811, 2024.
- [9] D.H. Phan ve D.L. Nguyen, “Improved Abrasive and Acid Resistance of Geopolymer Concrete with Steel Fiber and Silica Fume,” *Journal of Materials Engineering Performance*, 2024.

- [10] B. Jain ve G. Sancheti, "Influence of silica fume and iron dust on mechanical properties of concrete," *Construction and Building Materials*, c. 409, s. 133910, 2023.
- [11] M. I. Khan ve R. Siddique, "Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties," *Resources Conservation and Recycling*, c. 57, ss. 30-35, 2011.
- [12] X. Wang, Z. Pan, C. Zhu, ve H. Zhu, "Reaction degree of silica fume and its effect on compressive strength of cement-silica fume blends," *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, c. 29, sayı 4, ss. 721-725, 2014.
- [13] D. Xu vd., "Influence of silica fume and thermal curing on long-term hydration, microstructure and compressive strength of ultra-high performance concrete (UHPC)," *Construction and Building Materials*, c. 395, s. 132370, 2023.
- [14] P. H. C. H. Caldas, A. R. G. de Azevedo, ve M. T. Marvila, "Silica fume activated by NaOH and KOH in cement mortars: Rheological and mechanical study," *Construction and Building Materials*, c. 400, s. 132623, 2023.
- [15] E. Akkeçi, V. Yönten, "Çimento da Cr(VI) iyonunun indirgenmesi ve çimento özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması," *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, c. 2, sayı 1, ss. 14-28, 2024.
- [16] F. D. Tunçez, "Sürdürülebilir Çimento Üretiminde Çevre Yönetimi Yasal Bileşenleri," *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, c. 4, sayı 1, ss. 41-56, 2021.
- [17] N. Bozkurt ve N. Sayın, "Günümüz Teknolojileri Çerçevesinde Çimento Dünyasındaki Gelişmelerin Araştırılması", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 9, sayı 4, ss. 1159-1173, 2021.
- [18] Öztürk, B. "Çimento üretiminde alternatif yakıt kullanımının baca gazı emisyonları üzerine etkileri," Doktora Tezi, Çevre Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2021.
- [19] A. Vahap Korkmaz, "Karadeniz Bölgesi Çimento Hammadde Potansiyelinin Değerlendirilmesi," *Yer Altı Kaynakları Dergisi*, c. 7, sayı 14, ss. 17-30, 2018.

- [20] Ö. Bilgin, E. Koç, “Çimento Üretim Teknolojisinde Kullanılan Ana Ekipmanlar,” *Yer Altı Kaynakları Dergisi*, c. 2, sayı 4, ss. 32-40, 2013.
- [21] Y. Koçak, “Çimento-puzolan etkileşiminde moleküler ve elektro kinetik davranışların araştırılması,” Doktora tezi, Yapı Eğitim, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2008.
- [22] S. Bilen, M. Pala, “Farklı tip ve oranlarda kalker tozu kullanılan çimento hamurlarında süperakışkanlaştırıcı dozajının kıvama ve priz sürelerine etkileri,” *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 8, sayı 14, ss. 268-276, 2021.
- [23] B. Çağatay, “Türkiye’de çimento sektörüne ilişkin gelecek tahminleri; küresel ticaret ve makroekonomik değişkenler ışığında yeni politikalar,” *Dumlupınar Üniversitesi İİBF Dergisi*, c. 4, sayı 8, ss. 95-115, 2021.
- [24] M. Gör, H.S. Aksoy ve G. Bilgen, “Farklı katkı malzemelerinin kil bir zeminin kıvam limitleri üzerinde zamana bağlı etkisi,” *15.Ulusal Kil Sempozyumu*, Niğde, Türkiye, 2012.
- [25] Y. Akgün, “Alternatif puzolan kalsine marn içeren sürdürülebilir katkılı çimentolar,” *DÜMF Mühendislik Dergisi*, c. 10, sayı 2, ss. 779-789, 2019.
- [26] C. Ö. Baş, “Kalsine marn katkılı çimento içeren polipropilen esaslı mikro ve makro sentetik lif takviyeli harçların özellikleri,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı, Ordu Üniversitesi, Ordu, 2023.
- [27] Ö. Bilgin, “Balıkesir Bölgesine ait jips(alçıtaşı) örneğinin karakteristik özellikleri ve kullanım alanları,” *European Journal of Science and Technology*, ss. 55-60, 2019.
- [28] Kapkaç, F. “Çimento çeşitleri, özellikleri, hammaddeleri ve üretim aşamaları,” *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, ss. 223-232, 2007.
- [29] A. Tanık “Yüksek fırın cürufu diatomit ve kalsine kaolinin portland çimento hidratasyonuna etkileri,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2023.
- [30] Y.İ. Şahin.“ Yüksek fırın cürufu ikameli çimento harçlarının hidratasyon gelişiminin mekanik özelliklere etkisinin araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2022.

- [31] M. Türkoğlu “Farklı C₃S içeriğine sahip klinkerlerin hibrit alkalilerle aktive edilmiş çimento özelliklerine etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, Türkiye, 2023.
- [32] İ. Coşkun, “Çimento ve mineral katkı maddelerinin ikili, üçlü ve dörtlü kombinasyonlarını içeren beton numunelerinin bazı mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi,” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2022.
- [33] E. Günaltılı, “CO₂ kürünün çimento hidratasyonuna etkisinin araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, 2022.
- [34] D. Eren, “Puzolanların puzolanik aktivitelerinin çimento özelliklerine etkisinin incelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2018.
- [35] Ş. Özkan, “Kimyasal etkilere dayanıklı çimento üretimi üzerine bir araştırma,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2009.
- [36] S. T. Erdoğan, T.Y. Erdoğan, “Puzolanik mineral katkılar ve tarihi geçmişleri,” *2.Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 2007, ss. 263-275.
- [37] T. Sarıcı, “Puzolan ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atıklarının granüler dolgu olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi,” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye, 2019.
- [38] O. Uzun. “Doğal puzolanların karakteristik özellikleri ve katkı malzemesi olarak beton dayanımına etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye, 2016.
- [39] G. Müezzinoğlu, “Farklı mineralojik yapıya sahip puzolanların puzolanik aktivitelerinin incelenmesi,” Yüksek Lisans, Seramik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, 2009.
- [40] E. Kullebi, “Pomza tozu ikameli harçlarda çimento türü ve puzolan inceliğinin puzolanik aktiviteye etkisinin araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2022.

- [41] S. Agar, “Farklı özellikte puzolan katkılı harçların durabiliteye etkileri,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [42] S. Taşkın, “Çimento esaslı malzemelerin ikame yönteminin betonun mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2024.
- [43] O. Y. Bayraktar, “Puzolanik katkı malzemeleriyle üretilen harçlarda sıcaklık etkisi altında meydana gelebilecek kaza anındaki mekanik davranışlarının istatistiksel olarak karşılaştırılması,” Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2016.
- [44] E. Tuncer, “Gümüşhane yöresi volkanik kayaların puzolanik aktivitesinin araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye, 2014.
- [45] A. M. Bozkurt, “Yüksek performanslı çimento harç özelliklerine nano-silis ve farklı puzolan malzeme katkısının etkileri,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, 2019.
- [46] O. Ekici, “Elazığ-Hüseyin (Ulukent) geleneksel evlerindeki yapısal sorunların görsel tespiti ile evlerde kullanılan kerpiç malzeme örneklerinde sem-xrd analizi ve değerlendirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Mimarlık Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye, 2024.
- [47] Ö. A. Kalkan, “Xrd’de X-ışını kırınım verilerinin yapay zeka yöntemleri ile analizi,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye, 2024.
- [48] A. D. Demirağ, “Teorik moleküler modelleme ve deneysel ft-ır ve raman spektroskopisi teknikleri ile tarihi eserlerin incelenmesi,” Doktora Tezi, Atom ve Molekül Fiziği Programı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2021.
- [49] A. Aksoğan Korkmaz, “Şırnak asfaltinin piroliz özelliklerinin termal analiz yöntemiyle belirlenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Maden Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye, 2007.
- [50] B. Uzbaş, “Çimento esaslı silis dumanlı uçucu küllü kompozitlerin sem ve xrd destekli görsel analizlerin yapay sinir ağları ile modellenmesi,” Doktora Tezi,

İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2019.

- [51] Ü.G. Haşıloğlu Aras, “Borlu aktif belit çimentolu betonların taramalı elektro mikroskop (sem) ve xrd ışınlarıyla analizi,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2011.
- [52] *Çimento Deney Metotları Bölüm 1: Dayanım Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 196-1, 2016.
- [53] *Çimento Deney Metotları Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşme Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 196-3, 2017.
- [54] *Çimento Deney Metotları Bölüm 6: İncelik Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 196-6, 2020.
- [55] *Çimento Deney Metotları Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 196-2, 2013.
- [56] *Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 197-1, 2012.
- [57] Y. C. Choi ve 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.
- [58] P. H. C. H. Caldas, A. R. G. de Azevedo, ve M. T. Marvila, “Silica fume activated by NaOH and KOH in cement mortars: Rheological and mechanical study,” *Construction and Building Materials*, c. 400, s. 132623, 2023.
- [59] M. Tokyay ve K. Erdoğan, “Cüruflar ve cüruflu çimentolar, araştırmaların gözden geçirilmesi ve durum değerlendirmesi raporu,” Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Türkiye, Rap. ISBN 975-8136-03-08, 2011.
- [60] M. J. Varas, M. Alvarez De Buergo, ve 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.
- [61] C. E. M. Gomes ve O. P. Ferreira, “Analyses of microstructural properties of VA/VeoVA copolymer modified cement pastes,” *Polimeros*, c. 15, sayı 3, ss.

193-198, 2005.

- [62] E. Kuzielová, M. Slaný, M. Žemlička, J. Másilko, ve M. T. Palou, “Phase composition of silica fume-portland cement systems formed under hydrothermal curing evaluated by ftir, xrd, and tga,” *Materials*, c. 14, sayı 11, 2021.
- [63] J. Madej, J. Madejova, ve D. Jakubekova, “Ir spectroscopic study of hydration of condensed silica fume-modified cement pastes,” *Ceramics*, c. 34, sayı 2, ss. 131-141, 1990.
- [64] T. Büyüksırt, H. K.uleşan, “Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi ve gıda analizlerinde kullanımı,” *Dergipark*, c. 39, sayı 4, ss. 235-241, 2014.
- [65] R. Gabrovšek, T. Vuk, ve V. Kaučič, “Evaluation of the hydration of portland cement containing various carbonates by means of thermal analysis,” *Acta Chimica Slovenia*, c. 53, ss. 159-165, 2006.
- [66] B. Jain ve G. Sancheti, “Influence of silica fume and iron dust on mechanical properties of concrete,” *Construction and Building Materials*, c. 409, s. 133910, 2023.
- [67] M. M. Younes, H. A. Abdel-Rahman ve M. M. Khattab, “Utilization of rice husk ash and waste glass in the production of ternary blended cement mortar composites,” *Journal of Building Engineering*, c. 20, ss. 42-50, 2018.
- [68] A. Schöler, B. Lothenbach, F. Winnefeld, ve 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.
- [69] Y. Zhao, J. Gao, Z. Xu, S. Li, X. Luo, ve 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, s. 103982, 2021.
- [70] B. Jain, G. Sancheti, ve V. Jain, “FTIR analysis of silica fume and iron dust added concrete,” *Materials Today Proceedings*, c. 60, ss. 777-781, 2022.
- [71] X. Xiong vd., “Performance and microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC) with silica fume replaced by inert mineral powders,” *Construction and Building Materials*, c. 327, s. 126996, 2022.

- [72] İ. Pınarcı ve Y. Kocak, “Hydration mechanisms and mechanical properties of pumice substituted cementitious binder,” *Construction and Building Materials*, c. 335, s. 127528, 2022.
- [73] H. Biricik ve N. Sarier, “Comparative study of the characteristics of nano silica - , silica fume - and fly ash - incorporated cement mortars,” *Materials Research*, c. 17, sayı 3, ss. 570-582, 2014.
- [74] C. Gomes, O. F.- Polímeros. (2005, 16 Kasım). *Analyses of microstructural properties of VA/VeoVA copolymer modified cement pastes*. [Online]. Erişim: <https://www.scielo.br/j/po/a/5wbh4hqwvbB3wx8j7XY9Lrn/?lang=en>
- [75] T. Richard, L. Mercury, F. Poulet, ve L. d’Hendecourt, “Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy as a tool to characterise water in adsorption/confinement situations,” *Journal of Colloid and Interface Science*, c. 304, sayı 1, ss. 125-136, 2006.
- [76] R. Choudhary, R. Gupta, ve R. Nagar, “Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume,” *Construction and Building Materials*, c. 239, s. 117888, 2020.
- [77] 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,” *Construction and Building Materials*, c. 72, ss. 104-112, 2014.
- [78] M. Y. A. Mollah, W. Yu, R. Schennach, ve D. L. Cocke, “A Fourier transform infrared spectroscopic investigation of the early hydration of Portland cement and the influence of sodium lignosulfonate,” *Cement and Concrete Research*, c. 30, sayı 2, ss. 267-273, 2000.
- [79] M. Bhattacharya ve K. V. Harish, “An integrated approach for studying the hydration of portland cement systems containing silica fume,” *Construction and Building Materials*, c. 188, ss. 1179-1192, 2018.
- [80] 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,” *Cement and Concrete Composites*, c. 92, ss. 7-17, 2018.
- [81] M. Jamil, M. N. N. Khan, M. R. Karim, A. B. M. A. Kaish, ve M. F. M. Zain, “Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of

mortar,” *Construction and Building Materials*, c. 128, ss. 185-198, 2016.

- [82] J. Xi *vd.*, “Role of silica fume on hydration and strength development of ultra-high performance concrete,” *Construction and Building Materials*, c. 338, s. 127600, 2022.
- [83] H. Kazemi-Kamyab, A. C. A. Muller, E. Denarié, E. Brühwiler, ve K. Scrivener, “Kinetics of mixing-water repartition in UHPFRC paste and its effect on hydration and microstructural development,” *Cement and Concrete Research*, c. 124, s. 105784, 2019.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yasemin ERDEM

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İnşaat Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2025
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Bozok Üniversitesi	2020
Lise	Fen Bilimleri	Şemikler Anadolu Lisesi	2015

TEZDEN ÇIKAN YAYINLAR

- [1] Y. Erdem, Y. Koçak, “Silis Dumanı İkameli Çimentoların Priz Sürelerinin ANFIS ile Tahmini,” *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, c. 5, sayı 1, ss. 45-52, 2024.
- [2] Y. Erdem, E. Gülbandılar ve Y. Koçak, “Silis Dumanı İkameli Çimentoların YSA ve ANFIS Modelleri ile Basınç Dayanımlarının Tahmini,” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Kabul edildi-yayın aşamasında.

TEZDEN ÇIKAN PROJE

- [1] Silis Dumanı ve Ferrokrom Tesisi Baca Tozunun Portland Çimento Hidratasyonuna ile Basınç Dayanımı Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Düzce Üniversitesi, Yürütücü: Yılmaz Koçak, Araştırmacılar: Yasemin Erdem; Selcan Kaya, Proje Numarası: 2024.06.05.1461, Başlama ve Bitiş tarihi: 21.03.2024 /12.03.2025.