

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU DİATOMİT VE KALSİNE KAOLİNİN
PORTLAND ÇİMENTO HİDRATASYONUNA ETKİLERİ**

AYPERİ TANIK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. YILMAZ KOÇAK**

DÜZCE, 2023

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU DİATOMİT VE KALSİNE KAOLİNİN
PORTLAND ÇİMENTO HİDRATASYONUNA ETKİLERİ

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

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK
Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI
Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Emiroğlu
Sakarya Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 20/09/2023

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.

20 Eylül 2023

Ayperi TANIK



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında her türlü desteği, hoşgörüsü ve yardımlarıyla beni yönlendiren çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Standart çimento deneyleri yapılmasında tezimizi destekleyen Eskişehir ÇİMSA Çimento Fabrikası yöneticileri ve özelinde kalite lideri Sayın Jülide Sezer ERDOĞAN'a, laboratuvar sorumlusu Sayın Ömer AVŞAR'a; XRD, DSC-TGA analizleri için Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknoloji Merkezine; FT-IR, SEM analizleri için Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarı çalışanlarına; numunelerin temin edilmesinde Düzce Fibrobeton A.Ş ve Bolu Çimento Fabrikasına teşekkürler ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

20 Eylül 2023

Ayperi TANIK

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.....	4
2.1.3. Çimentonun Ana Hammaddeleri	5
2.1.3.1. Kalker (Kireçtaşı)	6
2.1.3.2. Kil.....	6
2.1.3.3. Marn	6
2.1.3.4. Demir Cevheri.....	7
2.1.3.5. Alçı Taşı.....	7
2.1.3.6. Boksit.....	7
2.1.4. Çimento Ana Hammadde Kompozisyonu	8
2.1.4.1. Kireç Doygunluk Faktörü (LSF)	8
2.1.4.2. Silikat Modülü (SM)	9
2.1.4.3. Hidrolik Modülü (HM)	10
2.1.4.4. Alümin Modülü (AM)	10
2.1.5. Çimentonun Hidratasyonu	10
2.1.5.1. C ₃ A Ana Bileşeninin Hidratasyonu.....	11
2.1.5.2. C ₄ AF Ana Bileşeninin Hidratasyonu.....	12
2.1.5.3. C ₃ S Ve C ₂ S Ana Bileşeninin Hidratasyonu.....	12
2.1.5.4. Hidratasyon Isısı Ve Priz.....	12
2.2. PUZOLANLAR	14
2.2.1. Pozolanların Tarihçesi	14
2.2.2. Pozolanların Sınıflandırılması.....	15
2.2.3. Pozolanların Aktivitesi.....	17
2.2.4. Pozolanik Reaksiyon Ve Reaksiyon Ürünleri	18
2.2.5. Çalışmada Kullanılan Pozolanlarla İlgili Genel Bilgi.....	18
2.2.5.1. Yüksek Fırın Cürufu	18
2.2.5.2. Diatomit.....	20
2.2.5.3. Kaolin, Metakaolin Ve Kalsine Kaolin.....	21
2.3. HAMMADELERE UYGULANAN ANALİZLERE İLİŞKİN LİTERATÜR BİLGİSİ	23

2.3.1. X-Işınları Kırınımı Tekniği İle Yapılan Analiz.....	23
2.3.2. Eş Zamanlı Termal Analiz.....	23
2.3.3. Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi Tekniği İle Yapılan Analiz	24
2.3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Tekniği.....	27
3. MATERYAL VE METOT.....	28
3.1. MATERYAL.....	28
3.2. METOT.....	28
3.2.1. Hammaddelerin Ve Numunelerin Hazırlanması	28
3.2.2. Deneysel Çalışmalar	30
3.2.2.1. Standart Kıvam Tayini.....	30
3.2.2.2. Priz Süresi Tayini.....	30
3.2.2.3. Tane Boyut Analizi	31
3.2.2.4. Özgül Yüzey Tayini.....	31
3.2.2.5. Özgül Ağırlık Tayini.....	31
3.2.2.6. Hacim Genleşme Tayini	32
3.2.2.7. Kimyasal Analizler	32
3.2.2.8. Molekül Yapı Analizleri.....	32
3.2.2.9. Minerolojik Analizler	32
3.2.2.10. Mikro Yapı Analizleri	33
3.2.2.11. Termal Analizler	33
3.2.2.12. Eğilme Dayanımı Deneyleri.....	33
3.2.2.13. Basınç Dayanımı Deneyleri.....	33
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	35
4.1. HAMMADDELERE UYGULANAN ANALİZLER	35
4.1.1. Fiziksel Analizler.....	35
4.1.2. Kimyasal Analizler.....	36
4.1.3. Minerolojik Analizler.....	38
4.1.4. Moleküler Yapı Analizi.....	39
4.1.5. Termal Analizler	41
4.1.6. Taramalı Elektron Mikroskop Analizi.....	42
4.2. ÇİMENTO HAMURLARINA UYGULANAN DENEYLER VE ANALİZLER.....	46
4.2.1. Çimento Hamurlarının Su İhtiyacı Deneyleri.....	47
4.2.2. Çimento Hamurlarının Priz Süreleri Deneyleri.....	48
4.2.3. Çimento Hamurlarının Genleşme Deneyleri.....	49
4.2.4. Çimento Hamurlarının XRD Analizleri.....	49
4.2.5. Çimento Hamurlarının FT-IR Analizleri.....	51
4.2.6. Çimento Hamurlarının DSC/TGA Analizleri	52
4.2.7. Çimento Hamurlarının SEM Analizleri.....	55
4.3. ÇİMENTO HARÇLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ.....	59
4.3.1. Çimento Harçlarının Eğilme Dayanımları.....	59
4.3.2. Çimento Harçlarının Basınç Dayanımları	60
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
6. KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	79

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Puzolanların sınıflandırılması (Massazza'ya göre)	16
Şekil 4.1. Hammaddelerin tane boyut dağılımları	36
Şekil 4.2. Hammaddelerin XRD analizleri	38
Şekil 4.3. Hammaddelerin FT-IR analizleri	39
Şekil 4.4. Hammaddelerin DSC/TGA analizleri.....	41
Şekil 4.5. PÇ'nin SEM/EDS analizi.....	43
Şekil 4.6. YFC'nin SEM/EDS analizi	44
Şekil 4.7. Kalsine kaolin'in SEM/EDS analizi	45
Şekil 4.8. Diatomit'in SEM/EDS analizi.....	46
Şekil 4.9. Çimento hamurlarının su ihtiyaçları	47
Şekil 4.10. Çimento hamurlarının priz süreleri.....	48
Şekil 4.11. Çimento hamurlarının genleşme değerleri	49
Şekil 4.12. Çimento hamurlarının XRD analizleri.....	50
Şekil 4.13. Çimento hamurlarının FT-IR analizleri	51
Şekil 4.14. Çimento hamurlarının DSC/TGA analizi	52
Şekil 4.15. Çimento hamurlarına ait farklı sıcaklıklardaki ağırlık kayıpları	53
Şekil 4.16. Çimento hamurlarının CH içeriği	54
Şekil 4.17. Referans çimento hamurunun SEM görüntüsü	55
Şekil 4.18. 10YFC kodlu çimento hamurunun SEM görüntüsü	56
Şekil 4.19. 10KK kodlu çimento hamurunun SEM görüntüsü	57
Şekil 4.20. 10D kodlu çimento hamurunun SEM görüntüsü.....	58
Şekil 4.21. Çimento harçların eğilme dayanımları.....	59
Şekil 4.22. Çimento harçlarının basınç dayanımları	60

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 3.1. Harç numunelerinin kodları ve miktarları.....	29
Çizelge 4.1. Hammaddelerin fiziksel özellikleri.....	35
Çizelge 4.2. Hammaddelerin kimyasal kompozisyonları.....	37



KISALTMALAR

Al ₂ O ₃	Alümin, Alüminyum oksit
AM	Alümin modülü
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
CH	Portlandit
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
C ₃ S	Alit
C ₂ S	Belit
C ₄ AF	Tetra kalsiyum alümina ferrit
C ₃ A	Tri kalsiyum alüminat
C ₃ AH ₆	Hidrogarnet
DSC	Fark taramalı kalorimetri
DTA	Diferansiyel termal analiz
10D	%10 Diatomit katkılı numune
FT-IR	Fourier kızılötesi dönüşüm spektroskopisi
HM	Hidrolik modülü
10KK	%10 Kalsine kaolin katkılı numune
LSF	Kireç doygunluk faktörü
PÇ	Portland çimentosu
R	Referans çimento
S/Ç	Su / Çimento oranı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SM	Silikat modülü
TGA	Termogravimetrik analiz
XRD	X ışını difraksiyonu
10YFC	%10 Yüksek fırın cürufu katkılı numune

SİMGELER

cm	Santimetre
g	Gram
mm	Milimetre
MPa	Mega pascal
Pa	Pascal
μm	Mikrometre
θ	Thita
α	Alfa
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece



ÖZET

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU DIATOMİT VE KALSİNE KAOLİNİN PORTLAND ÇİMENTO HİDRATASYONUNA ETKİLERİ

Ayperı TANIK

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

Eylül 2023, 78 sayfa

Geçmişten bugüne kadar çevre bilincinin artması, çimento sektöründeki CO₂ emisyonlarının azaltılması yönündeki çalışmaların yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Pozolanlar, çevreye verdiği olumlu etkiler ile çimento ve betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerine katkılarından dolayı her geçen gün daha fazla tercih edilen katkı malzemeleri olarak dikkat çekmektedir. Yapılan çalışmalarda pozolanların, fiziksel özelliklerinin çoğunlukla moleküler yapılarına bağlı olduğu ve atom yapılarına göre camsı, amorf ya da kristal yapıda olup kimyasal bileşimine bağlı olarak da değişiklikler gösterdiği bilinmektedir. Bu amaçla yapılan çalışmada bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu, mineral katkı olarak da yüksek fırın cürufu, kalsine kaolin ve diatomit tercih edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında hammaddelerin fiziksel, kimyasal, mineralojik, moleküler ve mikro yapıları incelenmiştir. İkinci aşamada bu malzemeler Portland çimentosuna %10 oranında ikame edilerek biri referans olmak üzere dört tip çimento elde edilmiştir. Bu çimento hamurlarının hidrasyon gelişimleri su ihtiyacı, priz süresi, genleşme deneyleriyle ve 28. hidrasyon günü için X ışını difraksiyonu (XRD), fourier kızılötesi dönüşüm spektroskopisi (FT-IR), termal (DSC/TGA) ve mikro yapı analizleriyle (SEM/EDS) incelenmiştir. Üçüncü aşamada ise çimento hamurlarının eğilme ve basınç dayanımları 2., 7., 28. ve 90. hidrasyon günlerinde belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre mineral katkı ikameli çimento hamurlarının su ihtiyacı ve priz süresi artarken, genleşme değerleri açısından herhangi bir farklılık görülmemiştir. Çimento hamurları üzerinde 28. günde yapılan XRD, FT-IR, DSC/TGA ve SEM/EDS analizlerinden elde edilen veriler, özellikle ileriki hidrasyon sürecinde oluşan portlandit (CH) miktarının tüm mineral katkı ikameli çimento hamurlarında azaldığını ve ilave C-S-H miktarını artırarak çimento hamurlarında daha kompakt bir mikro yapı sağladığı tespit edilmiştir. Sonuçlar, bu mineral katkılarla ikame edilen çimento harçlarının eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin 90. hidrasyon gününde referans çimentoya çok yakın değerlerde elde edildiğini göstermektedir. Ayrıca 28. günde, tüm mineral katkı ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı değerlerinin, PÇ 42,5 R tipi çimento için belirtilen en küçük değeri olan 42,5 MPa değerinin üzerinde elde edildiği belirlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Diatomit, Hidrasyon, Kalsine kaolin, Portland çimento, Yüksek fırın cürufu

ABSTRACT

EFFECTS OF BLAST FURNACE SLAG DIATOMITE AND CALCINED KAOLINE ON PORTLAND CEMENT HYDRATION

Ayperı TANIK

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

September 2023, 78 pages

Increasing environmental awareness from past to present has led to concentrate of studies to reduce CO₂ emissions in the cement industry. Pozzolans attract attention as increasingly have been preferred additive materials due to their positive effects on the environment and their contribution to the strength and durability properties of cement and concrete. In the studies, it is known that the physical properties of pozzolans are mostly dependent on their molecular structures and they are glassy, amorphous or crystalline according to their atomic, structure and vary depending on their chemical composition. For this purpose in the study, CEM I 42.5 R type Portland cement was preferred as binder and blast furnace slag, calcined kaolin and diatomite as mineral additives. In the first stage of the study, raw materials were examined physical, chemical, mineralogical, molecular and micro structures. In the second stage, four types of cement were obtained by substituting 10% to Portland cement these materials, one of which was a reference. The hydration developments of these cement pastes were examined by water requirement, setting time, expansion experiments and for the 28th day of hydration by X-ray diffraction (XRD), fourier transforms infrared spectroscopy (FT-IR), thermal (DSC/TGA) and microstructure analysis (SEM/EDS). In the third stage, the flexural and compressive strengths of cement pastes were determined on the 2nd, 7th, 28th and 90th hydration days. According to the findings, in terms of expansion values was not observed difference while the water requirement and setting time of cement pastes with mineral additives increased. The data obtained from XRD, FT-IR, DSC/TGA and SEM/EDS analyzes performed on cement pastes on day 28 show that especially the amount of portlandite (CH) formed during the advanced hydration process decreases in all mineral-added cement pastes and it was determined that it provides more compact microstructure in cement pastes with increased amount of C-S-H addition. The results show that the flexural and compressive strength values of cement mortars substituted with these mineral additives were obtained at values very close to the reference cement on the 90th day of hydration. In addition, on the 28th day, it was determined that the compressive strength values of all mineral additive-replaced cement mortars were above the minimum value of 42.5 MPa, which is the minimum value specified for PC 42.5 R type cement.

Keywords: Blast furnace slag, Calcined kaolin, Diatomite, Hydration, Portland cement

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun ve insan ihtiyaçlarının artmasının geçmişten günümüze tüketim fazlalığına neden olduğu bilinmektedir. Nüfusun artmasıyla konutların artan talebi baskıyı da artırıp inşaat sektörünü ve çimento üretimini de sıkıştırmıştır. Çimento yaygın bir yapı malzemesi olduğundan çevresel etkileri üzerine incelemeler yapılmaktadır (Fang vd., 2021; Maraveas, 2020). Bina maliyetlerinin yükselmesinin, çimento üretiminde fazla miktarda enerji harcanması neden olduğu bilinmektedir (Maraveas, 2020). Çimento, üretim sürecinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının günlük olarak artışıyla birlikte küresel CO₂ emisyonlarının %7'sini oluşturup çevre kirliliği meydana getirmektedir (Tulashie vd., 2021). Çevre sorunlarının bu ve çeşitli nedenlerle artmasıyla, CO₂ miktarının azalması ve enerji tasarrufunu artırabilmek için farklı yollar aranmıştır. Son dönemde yapılan çalışmalarda mevcut çimento biçimlerini geliştirmek için, çimentonun bir kısmıyla değiştirilecek farklı puzolanik malzemeler kullanılarak karbon ayak izini azaltmak amaçlanmaktadır. Çimento ve beton endüstrisinde puzolan kullanılarak çevre dostu ve kaliteyi de bozmadan daha uygun maliyetli yapıların oluşmasına katkı sağlanmaktadır (Aziz vd., 2021). Puzolanlar, doğal puzolan olarak pomza (Kasaniya vd., 2021), diatomit (Gündüz ve Kalkan, 2017), zeolit, tras (Ramezaniapour vd., 2021); yapay puzolan olarak uçucu kül, silika dumanı (Bumanis vd., 2020), yüksek fırın cürufu (Huang vd., 2016); ısıtıl işlem görmüş puzolan olarak kalsine kaolin (Karatas vd., 2020), pirinç kabuğu külü (Das vd., 2021) gibi farklı sınıflarda yer almaktadır.

Çimento ve beton performansını geliştirdiği için puzolanlar birçok çalışmada tercih edilmiştir. Puzolanlar, çimento miktarını azaltmak ve çimento dayanımını artırmak (Dabbaghi vd., 2021), yüksek işlenebilirlik (Tchamdjou vd., 2017), maliyetin düşmesi (Najimi ve Ghafoori, 2019), kimyasal direncin ve geçirimsizliğin artması (Deboucha vd., 2017), alkali silika reaksiyonunun azalması (Mouli ve Khelafi, 2008), mukavemetinin iyi olması (Villca vd., 2021), atıkların azalması (Najimi vd., 2018), betonun rötresinin azalması (Liu vd., 2019) gibi olumlu sonuçlar sağlaması sebebiyle üzerinde çalışmaların fazlaca yapıldığı mineral katkılardır.

Dünyada en çok üretilen malzemelerden biri Portland çimentosudur (Lauermannová vd.,

2021). Portland çimentoları, farklı mineral katkıların ilave edilmesiyle çeşitlilik oluşturmuştur. Bunun için çeşitli özelliklere sahip puzolanik malzemelerinin çimento sisteminde farklılıklara neden olduğu bilinmektedir (Müezzinoğlu, 2009). Hidratasyon süreçleri ise, farklı mineral katkıların etkisiyle değişkenlik göstermektedir (Karpova vd., 2021).

Bu mineral katkılardan kaolin, feldspat mineralinin doğal olarak ayrılmasından meydana gelen bir kil mineralidir. Kalsinasyon işlemi yapılmadan iki çeşit kaolin malzemesi olan kaolinit ve halloysit üretilmektedir (Vincent vd., 2021). Esas olarak silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3) ve az ölçüde kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO)’den oluşur (Ababneh vd., 2020). Belirli sıcaklıkta mineral katkıların aktif hale getirilmesine kalsinasyon denilmektedir (Soysat, 2019). Kaolin kilinin 500-800 °C aralığında kalsine edilmesiyle metakaolin meydana gelmiştir. Kaolinin fiziksel ve kimyasal yapılarında kalsinasyondan dolayı değişim gerçekleşmektedir. Kil minerallerinin içeriğindeki su 100-250 °C sıcaklık aralığında uzaklaşır. Dehidroksilasyon ile 500-800 °C aralığında kaolin kili kimyasal olarak bağlı suyunu kaybedip, amorf yapılı reaktif olan metakaolin meydana gelir (Demir, 2020). Kalsine kaolin ise amorf haldeki metakaolinin kristalin alümine dönüşmesiyle yaklaşık olarak 950 °C’de oluşmuştur (Yılmaz, 2004). Kalsine kaolin, üretiminde kullanılan enerji, çimento üretiminde kullanılan enerjiden daha az olduğundan daha yaygın bir şekilde tercih edilmiştir (Karatat vd., 2020).

Yüksek fırın cürufu, 1350-1550 °C aralığında yüksek fırında demir cevheri ve eritkenle birlikte oluşturulan yüksek cam fazı kapsayan bir yan üründür (Zhai ve Kurumisawa, 2021). Meydana geldiklerinde aşırı sıcaktır. Soğutma işlemi olarak iki yöntem uygulanarak hava soğutmalı cüruf ya da granül cüruf elde edilmektedir. Granül cüruf en fazla tercih edilendir (Sawlanı vd., 2023). Yüksek fırın cürufunun içeriğinde belirli oranlarda SiO_2 , CaO , Al_2O_3 ve MgO vardır (Zhang vd., 2021).

Diatom fosillerinin birikmesiyle oluşan kolay bir şekilde öğütülebilen silisli, hafif yapılı tortul kayaç, diatomit olarak isimlendirilir (Lauermannová vd., 2021). İçeriğinde silika, alümina, demir oksit, karbonat, volkanik cam bulunmaktadır (Sarıdemir vd., 2020). Kuru özgül ağırlığı 0,15 ile 0,40 g/cm^3 aralığında olan ince tane yapısına sahip, porozitesi yüksek olup gevşek bir yapıya sahiptir (Pınarcı, 2022). Şekli, büyüklüğü ve gözenek yapısı kendine has olup, büyüklüğü ülkemizde 5-150 mikron olmak üzere 2-500 mikron aralığında değişmektedir (Çalışkan, 2018).

Genellikle çimento ve beton teknolojisi alanında yapılan çalışmalarda, daha çok çimento harcı ve betonların özellikle dayanım özelliklerinin belirlenmesi üzerinde çalışmalar yapılmaktaydı. Ancak son zamanlarda yapılan çalışmalarda meydana gelen hidratasyon reaksiyonlarının araştırılarak, meydana gelen fiziko kimyasal özelliklerinin de tespit edilmesinin, yani dayanıklılık özelliklerine etki eden reaksiyonların da belirlenmesinin önemli olduğu vurgulanmaktadır. Bu özelliklerin tespiti için de standart deneylerin yanı sıra X ışını difraksiyonu (XRD), fourier kızılötesi dönüşüm spektroskopisi (FT-IR), termal (DSC/TGA) ve mikro yapı (SEM/EDS) gibi analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu analiz yöntemleri kullanılarak puzolanların özellikle ileriki yaşlarda puzolanik özellik gösterip göstermediği ya da ne ölçüde gösterdiği rahatlıkla belirlenebilmektedir. Dolayısı ile bu çalışmanın amacı; bu alan için ülkemizde çok fazla çalışmaya rastlanılmadığı düşünülen bu analiz yöntemlerinin bir bütün olarak kullanılmasıyla, çimento veya katkıli çimentoların hidratasyon reaksiyonlarının araştırılması ve meydana gelen reaksiyonların belirlenmesi şeklinde ifade edilebilir. Bu amaçla yapılan çalışmada; bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan endüstriyel bir atık malzeme olan yüksek fırın cürufu, doğal malzeme diatomit ve kaolinin belli bir ısı işlem görmesiyle elde edilen kalsine kaolin tercih edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında hammaddelerin fiziksel, kimyasal, mineralojik, moleküler ve mikro yapıları incelenmiştir. İkinci aşamada bu malzemeler Portland çimentosuna %10 oranında ikame edilerek biri referans olmak üzere dört tip çimento elde edilmiştir. Bu çimento hamurlarının hidratasyon gelişimleri; su ihtiyacı, priz süresi, genleşme deneyleriyle ve 28. hidratasyon günü için X ışını difraksiyonu (XRD), fourier kızılötesi dönüşüm spektroskopisi (FT-IR), termal (DSC/TGA) ve mikro yapı analizleriyle (SEM/EDS) incelenmiştir. Üçüncü aşamada ise çimento hamurlarının eğilme ve basınç dayanımları 2., 7., 28. ve 90. hidratasyon günlerinde belirlenmiştir. Sonuç olarak yapılan bu çalışmayla yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolin ikameli çimentoların meydana gelen hidratasyon reaksiyonları tespit edilmiş ve ilgili başlıklarda ayrıntılarıyla tartışılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ÇİMENTO

Çimento başlığı altında çimentonun tanımı, çimentonun tarihçesi, çimentonun ana hammaddeleri, çimento hammadde kompozisyonu ve çimento hidratasyonu gibi konular hakkında bilgiler verilmektedir.

2.1.1. Çimentonun Tanımı

Çimento, mineralleri belirli oranda bir araya getirip sıkıştıran, öğütülmüş hali ince olan (Raheem vd., 2021), su ile reaksiyona girerek sertleşen, işlenebilir önemli bir hidrolik bağlayıcıdır (Igliński ve Buczkowski, 2017). Bu malzeme kırık taş anlamındaki Latince “Caementum” sözcüğünden ortaya çıkmıştır (Müezzinoğlu, 2009).

Çimentonun niteliğini belirleyen, hammadde karışımı ve klinkerin ısı uygulamasıdır. Ana hammaddeleri kil ve kalkerdir (Gündeşli, 2008). Karışık bir özelliğe sahip olan çimento üretiminde, endüstri yapılarının büyük olması gerekmektedir (Özdemir, 2020). Çimento üretimi, hammaddelerin karıştırılmasıyla oluşan farinin belirli sıcaklıkta fırınlanmasıyla klinker oluşması ve klinkerin bir miktar alçı taşı ve katkı maddeleriyle öğütülmesiyle sağlanmaktadır (Özdöl, 2004). Burada kullanılan alçı taşı ise priz süresini ayarlamak için kullanılmaktadır (Özdemir, 2020).

2.1.2. Çimentonun Tarihçesi

Medeniyetin varlığından beri insanlar taşları bir araya getirip malzeme üretmeye çalışmışlar ve bu zamanlarda yapılan uygulamaların inşaatlara katkı sağlayacağı belli olmuştur. Keops piramidinin inşasında Mısırlılar harç olarak alçı uygulamışlardır. Alçı, alçı taşının toz haline getirilip pişirilmesiyle elde edilmiştir. Eski Romalılar ve Yunanlılar tarafından su kireci ise kalkerleri pişirerek meydana getirilmiştir. Kireç ve kumu karıştırarak daha dayanıklı bir malzeme oluşacağını da anlamışlardır. Bağlayıcı malzemeler, XVIII. yüzyılda kavram olarak belli olmuştur (Gündeşli, 2008).

John Smeaton su kirecinin niteliklerini, 1750’li yıllarda İngiltere’de Eddystone Deniz Feneri için kalker, kil ve alçıyı bir araya getirip puzolan eklemesi yaparak, su kireçlerinin

deniz suyuna direncini araştırmalarıyla geliştirmiştir. Louis Vicat aracılığıyla 1800’li yılların başlangıç zamanlarında Fransa’da eş çalışmalar srdrlmştir. Vicat çok az edindiği su kirecine dair bilgileri toplayarak kalker taşlarını ve killi taş malzemelerini belirli miktarlarda katıp pişirilmeyle su kirecini yapay olarak Roman çimentosuna benzeyen şekilde elde etmiştir. Hidrolik kireç veya su kireci, fazla miktarda kalker olduğunda snebilmesi kireç gibi bir maddedir (zdemir, 2020).

1824 yılında Joseph Aspdin, kireçtaşı ve kil karışımından elde edilen bağlayıcının Portland imentosu ismini kullanarak patentini almıştır (Igliński ve Buczkowski, 2017). Kuzey Amerika ve Avrupa da hidrolik imento uygulaması geniş bir yer kaplamıştır. Çimento retiminde yardımcı olan teçhizatların geliştirilmesine başlanmıştır (Gündeřli, 2008).

1877 yılında İngiltere’de Fredrich Ransome, döner fırınların gelişimleri çalışmalarına başlamış, patentini 1885’te almıştır. Bu şekilde imento endüstrisinde önemli bir ilerleme kaydedilmiş olsa da işlevsel olarak başarıya ulaşan döner fırın sonradan geliştirilmiştir. Amerikalı mühendisler bu fırından sonra gelişmeyi sürdürdüler. Amerika’da Atlas imento şirketi’nden Hurry ve Seaman vasıtasıyla, çalışması ekonomik şekilde olan döner fırın geliştirerek 1895’te üretime başlanmıştır (Gündeşli, 2008).

Çimento ve hammaddeler hakkında alışmalar, Portland imentosunun üretimi fazlaştışıka deneysel metotlar ve nitelemeler üzerinde gerçekleşmiştir. 1900’lerin başlangıcında birçok laboratuvar çalışmasını takiben büyük miktarda imento deneyleri standartlaşmış ve tüm dünyada imento standartlarıyla ilgili birçok şey incelenip düzenleme yapıldıktan sonra yeni deneyler de eklenmiştir (Gündeşli, 2008).

2.1.3. Çimentonun Ana Hammaddeleri

Çimento retiminde, tortul kayaçlar olarak da bilinen kalker (kireçtaşı), kil ve/veya marn ana hammaddeleri kullanılmaktadır (Uğur, 2018). Elde edilen klinker, kalker ve kilin belirli miktarda eklenmesi, homojen şekilde karıştırılıp yüksek sıcaklıkta pişirilmeyle oluşmaktadır (Chinh Chu vd., 2021). Klinkerin elde edildiği temel kaynaklar, CaO için kalker; SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ için ise kil mineralleridir. Çimento hammaddesi olarak bu dört oksit bileşiklerini marna benzer şekilde içinde barındıran maddelerden faydalanılmaktadır (Gündeşli, 2008).

Çeşitli katkıların klinkere ilave edilmesi ve öğütülmesiyle de çimento meydana gelmektedir (Uğur, 2018).

2.1.3.1. Kalker (*Kireçtaşı*)

Kireçtaşı, kimyasal kompozisyonunda en az %90 oranında CaCO_3 (kalsiyum karbonat) bulunan bir kayadır. Mineral yapısında, kalsit ve az miktarda aragonit kristalleri bulunmaktadır (Uğur, 2018). Yeni kalker oluşumlarında kalsit ve aragonit kristallerinin yer aldığı bilinmektedir. Kalsit kristaline aragonit kristallerinin kolaylıkla dönüşebilmeleri, eski kireçtaşı oluşumunda aragonit kristalinin bulunmasının zorlaşmasına sebebiyet vermektedir (Gündeşli, 2008).

Çimento üretiminde kalkerin kimyasal yapısının yanı sıra üretim yapılan tesise yakın olması, kırma, ezme ve pişirme işlemlerinin basit olması, homojen yapıda ve az bir neme sahip olması önem verilmesi gereken unsurlardandır (Uğur, 2018).

2.1.3.2. Kil

Killer, geniş haliyle ve sık kullanımıyla geçmişi çok eskiye dayanan endüstriyel minerallerdir (Zhou ve Keeling, 2013). Kil, mineral içeriğinde yaklaşık %90 oranında kil minerali içeren kayalardır. Killi ve kireçli toprakların depolama bölgesinde olmasıyla çimentonun ana hammadde olan kil kullanılmıştır (Uğur, 2018). Killer, jeolojik durumları farklı olan yerlerde meydana gelirler. Kil mineralleri, kayaların hava, su ve buharla bağlantı kurmasıyla veya kalıntılarda kil mineralleriyle birlikte başta mevcut olan minerallere değişiklik yapılmasıyla oluşmaktadır (Zhou ve Keeling, 2013). Alüminyum, silisyum ve su mineralleri kimyasal bileşimlerinde bulunmaktadır (Uğur, 2018). Killer, bünyesinde yeterli su barındırdığı takdirde plastik halde olan ve pişirme ya da kurutma durumlarında sertleşip büzülen ince tane yapısına sahip malzemeler olarak da tanımlanmaktadır (Zhou ve Keeling, 2013).

2.1.3.3. Marn

Kalker oranı %50-70, kil oranı %30-50 olmak üzere, bu karışımlardan oluşmuş kayalara marn denilmektedir. Çimento hammaddelerinden biri olma sebebi, kalker oranı %70, kil oranı %30 olan karışımın öğütülüp pişirilmesiyle elde edilmiş çimento klinkerinin ve marnın içeriğinin benzer özellikleri taşımasıdır. Marnın kalkere göre yumuşak yapısının oluşturduğu avantaj ile üretimi kolay ve enerji harcama durumu kırma öğütme anında azdır (Uğur, 2018). İçeriğinde bulundurduğu kilden dolayı, sarı, gri, siyah gibi farklı renklerde olabilir (Özdemir, 2020).

Marnın belirli sıcaklıkta kalsine edilmesiyle kalsine kil ve kalsine kalker elde edilmiştir. Kalsine kil içeriğinden dolayı puzolanik yapıdadır. Diğer puzolanlara göre, fazla miktarda bulunan, çıkarılması kolay bir malzemedir. Çimento üretimlerinin kullanımlarında çevreye katkılarıyla kullanılmaya hazır, potansiyeli fazla ve alternatif katkı malzemesidir (Özdemir, 2020).

2.1.3.4. Demir Cevheri

Demir, genelde oksitli bileşikler şeklinde bulunan ve doğada arada bir element maddesi olan yapısal olarak aktif bir metaldir. Bileşik oluşumunu sülfür, fosfat, karbon, silisyum ve halojenlerle yapabilir, hidrojen gazını seyreltik asitlerden elde edebilir. Havanın nemli olmasıyla, demirin korozyona uğraması sonucunda pas meydana gelebilir. Ferroz bileşikler olarak adlandırılması +2 değerlik aldıklarında, ferrik bileşikler +3 değerlik aldıklarında yapılır. Ferrik bileşikler, ferroz bileşiklerinin kolay bir şekilde oksitlenmesiyle oluşmaktadır. Koyu griden pas kırmızısına değişen renkleriyle, kaya ve mineral yapıda olan demir cevherlerinin bir araya gelmesi demiri oluşturur. En yaygın olarak bulunan demir mineralleri, manyetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), limonit ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), siderit (FeCO_3), pirit (FeS_2) ve götit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) şeklinde bulunmaktadır. En fazla demir cevheri hammaddesi olarak meydana gelen hematit mineralidir (Özdemir, 2020).

2.1.3.5. Alçı Taşı

Alçı taşı, kalsiyum sülfattan meydana gelen mineraldir. İklimsel olarak kurak bölgelerde çökelmiş kalıntılı kütlelerle, marn ve kil minerallerinin yataklarına sahip olan yerlerde veya civarında bulunur. Mohs sertliği 2 ve 2,4 aralığında, yoğunluğu 2,2; 2,4 g/cm^3 civarındadır. $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ olarak formüllendirilmiştir. İki molekül kristal suyu bulunan türüne jips denilmektedir (Özdemir, 2020). Alçı taşının eklenmesiyle çimentonun priz süresi ayarlanmaktadır (Nas, 2012).

2.1.3.6. Boksit

Kil şeklinde olan katı ve belirgin parçacıklardan oluşmuş bir mineraldir. Mohs sertliği 1 ile 3 aralığında olup, sahip olduğu yoğunluk 2,55; 3,50 g/cm^3 tür (Gündeşli, 2008). Boksit mineralleri, hidrate alüminyum oksit ile safsızlık haliyle Fe_2O_3 , SiO_2 ve TiO_2 'i içine alırlar. Farklı mineraller de az bir miktarda bulunabilir. Boksitler beş gruba da ayrılarak saf jibsitik, silika içeren jibsitik, böhmitik, diasporitik ve karışık olarak adlandırılabilir (Özdemir, 2020).

2.1.4. Çimento Ana Hammadde Kompozisyonu

Çimentonun üretiminde, esas olarak dört ana oksit bileşeni (CaO , Al_2O_3 , SiO_2 ve Fe_2O_3) içeren hammaddeler kullanılmaktadır (Nas, 2012). Kalker ve kil hammaddelerinin uygun oranlarda karışımı ve gerektiğinde düzeltici maddelerin ilavesiyle gerekli bileşimlere sahip bir malzeme elde edilmektedir (Özdemir, 2020). Bu karışım öğütülüp, döner fırınlarda yüksek sıcaklıkta pişirilmek için hazırlandığında “Farin” olarak isimlendirilir (Nas, 2012). Üretiminde az sayıda bileşikler kullanılarak uygun ekonomi ve verimliliğinin yüksekliği istenmektedir. İdeal çimento kompozisyonuyla tek başına bileşik bulmak zor olduğundan kalker, kil ve marn ile karışım oluşturularak beklenen bileşim elde edilebilmektedir (Özdemir, 2020).

Çimento üretiminde kullanılan kil ve kalker karışımının oranları belirli kimyasal modüllere ait olarak tanımlanmaktadır. Portland çimentosunun pişirilen farinin kimyasal bileşiminin, dayanım değerlerine ve fiziksel özelliklerine bağlı kalınmaktadır. Bu nedenle bileşenlerin belli oranda olması istenmektedir. Klinkerin içerisindeki bileşenler, kireç doygunluk faktörü (LSF), silikat modülü (SM), hidrolik modülü (HM) ve alümin modülünün (AM) gerekli formülleri ile belirlenmektedir (Özdemir, 2020).

2.1.4.1. Kireç Doygunluk Faktörü (LSF)

Çimento üretiminde temel hedef, içerik olarak C_3S (alit) kalitesi yüksek klinker oluşturmaktır. Bu durum kullanımdaki malzemelerin tümünün hammadde karışımına ve üretim şartlarına dayanarak değişmektedir. CaO çimentonun üretiminde dikkatli bir şekilde hesap edilmesi gereken kimyasal oksittir (Özdemir, 2020).

Karışımında, CaO oranının ilave edilip düzgünce hesaplanması önemsenmektedir. Kireç doygunluk faktörünün karışımdaki oranının yüksek çıkması, yakıt miktarının yüksek olması ve sinterleşmenin de gecikmesine sebebiyet vermektedir. Pişmemiş kireç miktarının fazla olması ilk zamanlardaki dayanımının yüksek olmasını sağlarken, ani hacim genleşmelerinin fazlalaşmasına yol açmaktadır. Oranı düşük olan hammadde kompozisyonlarında ise, pişme basittir. C_3S (alit) miktarının düşük, C_2S (belit) miktarının yüksek olması durumunda çimento dayanımları özellikle erken yaşlarda düşük olmaktadır (Özdemir, 2020).

Çimento içindeki tüm SiO_2 'in C_3S , demir oksidin eşit ölçüde Al_2O_3 (alümin) ile C_4AF (tetra kalsiyum alümina ferrit) ve artan Al_2O_3 'in C_3A (tri kalsiyum alüminat) olmasıyla klinkerdeki kireç doygunluğu tamamlanmış olmaktadır. Bu teorik bilgiyle hareket

edildiğinde içeriğinde barındırdığı SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 ile bağlanan çimentonun maksimum olarak CaO oranı hesap edilebilmektedir. Kireç doygunluk faktörü için Denklem 2.1 ve 2.2 meydana getirilmiştir (Özdemir, 2020).

Alüminyum Modülü $> 0,64$ ise;

$$\text{LSF} = \frac{\text{CaO}}{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,35 \text{ Fe}_2\text{O}_3} \quad (2.1)$$

Alüminyum Modülü $< 0,64$ ise;

$$\text{LSF} = \frac{\text{CaO}}{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,10 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,70 \text{ Fe}_2\text{O}_3} \quad (2.2)$$

Kaliteli Portland çimentosu meydana gelmesi için, LSF'nin 0,85-0,90 olması gerekmektedir. Çimentoda serbest kirecin varlığı, kireç doygunluk faktörünün 1'in üzerinde olmasıyla bilinmektedir. Alit ve belit miktarları bu orandan etkilenmektedir. LSF değerinin artması sabit değerdeki serbest kirece göre, belit karşısında alit miktarının artmasına neden olmaktadır (Pınarcı, 2022).

2.1.4.2. Silikat Modülü (SM)

Silikat modülü, klinkerin ürün kalitesine etki eden modüllerin en kritiklerinden biridir. Aşağıdaki Denklem 2.3'te silikat modülünün nasıl hesaplanacağı belirlenmiştir (Özdemir, 2020).

$$\text{SM} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (2.3)$$

Belirli miktarlarda karıştırılan hammaddelerin karıştırılması ve öğütülmesiyle oluşan farinin fırın içindeki durumunu, klinker haldeki etkisinin önemli olduğunu gösteren modüldür (Özdemir, 2020).

Bu modüle ideal değer oluşturmak zor olsa da çoğunlukla hammaddenin kullanıldığı cinse göre 1,2 ile 4 aralığında olabilir. İdeal olan silikat modülünün değeri 2-2,5 aralığındadır. Değerinin yüksek olması, fırında gerçekleşen az yanma sebebiyle yakıt tüketiminin artmasına, zorlayıcı sinterleşme işlemine ve fazla yüksek sıcaklıklarda pişirmeye ihtiyaç olacaktır. Çimentonun prizinin gecikmesine ve dayanımını sonradan kazanmasına da sebebiyet vermektedir (Pınarcı, 2022).

SM'nin bu durumun aksine düşük değerde ve ideal oranda olması halinde, kolay sinterleşme gerçekleşerek dayanım ve priz süresi hızlı meydana gelecektir (Pınarcı, 2022).

2.1.4.3. Hidrolik Modülü (HM)

Hidrolik modülü formülü, Portland çimento içerisinde bulunan asit özellikli oksit kireç ile bazik özellikli oksit SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 arasındaki bağlantıdır. Aşağıda Denklem 2.4'te formülü verilmiştir (Pınarcı, 2022).

$$\text{HM} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (2.4)$$

Hidrolik modül 1,7-2,3 arasında değer almaktadır ve kaliteli çimento elde edildiğinde değerinin 2,0 civarında olduğu bilinmektedir. Bu değer 1,7'den az olduğunda dayanım olarak çimentonun yeterli olmadığı belirlenmiştir. Aynı zamanda 2,4 ve üzerinde olduğunda ise hacimsel denge değerlerinin kötü olduğu belirlenmiştir (Özdemir, 2020).

Bu modülün değeri arttıkça, çimento klinkerinin pişmesi durumunda gereken ısı, çimento dayanımı ve hidrasyon ısısı fazlaşmaktadır. Dayanımının düşmesi, kimyasal etkilere karşı gerçekleşmiştir (Özdemir, 2020).

2.1.4.4. Alümin Modülü (AM)

Alümin modülü formülü, alüminyum oksidin demir oksit'e bölünmesiyle elde edilmiştir. Aşağıda Denklem 2.5'te formülü verilmiştir (Özdemir, 2020).

$$\text{AM} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (2.5)$$

Klinkerde istenilen kaliteyi elde etmek, sinterleşme halindeki en ekonomik durumu yaşamak için alümin modülünün 1,3-1,6 arasında olması istenmektedir. Düşük ısılarda çimento bileşiklerine sahip olmak için, modülün düşük olması gerekmektedir. Alümin modülü değeri düşüklüğü fırında yakıttan da tasarruf edilmesini sağlar. Yüksek olması durumunda ise, yakıt harcaması fazla olur ve pişirmede gecikmeyle sonuçlanmaktadır. Çimentonun meydana geldiği bileşikler, demir kolay hale getirmiştir. Demirin oranının fazla olması klinker oluşumunda sert ve yoğunluğu yüksek olması, bu sebeple öğütmede zorlanma ve maliyetin üretimde yükselmesine neden olmaktadır (Özdemir, 2020).

2.1.5. Çimentonun Hidratasyonu

Hidrasyon tanım olarak Henry Louis Le Chatelier'in yaptığı çalışmalarında, çimento bileşenlerinden kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat'ın su ile reaksiyonu denilmektedir. Kireç suyu ve silis jeli ile yapılan deneyler neticesinde, suyla C_3S ve C_2S 'in reaksiyona girmesiyle kalsiyum silikat jeli ve kalsiyum hidroksitin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) meydana geldiği izlenmiştir (Özdöl, 2004).

Betonun içeriğindeki bileşenler karıştırılıp belli bir süre sonunda plastik hallerini kaybedip, yapı olarak sert ve katı halde olmaktadır. Çimento ile suyun reaksiyona girmesiyle oluşan bu olaya da “hidratasyon” denilmektedir. Suyun miktarına ve sıcaklık durumuna göre hidratasyon gelişimi değişebilmektedir. Üretici ve uygulayan tarafından hidratasyon gelişimi ve sonrasında ortaya çıkan sıcaklık önemlidir. Meydana gelen reaksiyonun iyi derecede anlaşılması için betonun çoğu özelliğinin farkına varılmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Özdemir, 2020).

Hidratasyon sürecinin ilk aşaması, çimentonun suyla birleşmesidir. Çimentonun tanecikleri suyun içinde yavaşça çözünmektedir ve bileşenler değişik miktarlarda, hızı farklı olacak şekilde reaksiyona girmektedirler. Bu reaksiyon nedeniyle yeni ürünler meydana gelmiştir ve az miktarda ısı oluşmuştur. Yeni ürünler, agrega parçacıklarının çimento hamuruyla bütünleşmesine ve sertleşmesine neden olmuştur. Kireçtaşı ve kil hammaddelerinin uygun oranlarda karıştırılıp yüksek sıcaklıklarda fırında pişirilmesiyle oluşan klinkere alçıtaşı ilave edilip öğütülmesiyle Portland çimentosu oluşur. Hidratasyon işlemini doğrudan etkileyen, sıcaklığın yüksek olmasıyla meydana gelen klinkerin yapısında oluşan silikatlar, alüminatlar ve ilave edilen alçıtaşıdır (Özdemir, 2020).

Çimento bileşenlerinin bütünüyle hidratasyon işlemini gerçekleştirebilmeleri için ekstra zamana gereksinim duyulmaktadır. Hidratasyonun 28. gününde taneciklerin yüzeyinde 4 µm penetrasyon derinliği bulunurken, 365 günün sonunda 8 µm olduğu örnek verilebilir. Klinkerin boyutunun 50 µm olduğunda tamamen hidratasyona uğraması için tahmini zaman 5 yıl olarak ifade edilmektedir (Özdemir, 2020).

Çimento hamuru hidratasyon anından önce plastik kıvamda, sonrasında priz başlangıcıyla plastik niteliğini kaybedip, tamamlanan prizle sert hale gelip dayanım meydana gelmiş olmaktadır (Özdemir, 2020).

2.1.5.1. C₃A Ana Bileşeninin Hidratasyonu

En hızlı şekilde suyla tepkimeye giren çimentonun bileşeni C₃A’dır ve sonrasında fazla miktarda ısı ortaya çıkmaktadır. İlk sırada ürün olarak C₄AH₁₄ ve C₂AH₈ elde edilmiştir.

Kararlı yapıda olmadıklarından $C_3A + 6H \longrightarrow C_3AH_6$ (hidrogarnet) ürünü oluşmaktadır ve ani priz olayıyla işlenebilme özelliğinin yitirilmesine neden olmaktadır. Çimento hamuru katılaştığından çatlaklar meydana gelmekte ve fazla dayanım sağlanamamaktadır. Klinker ilave edilen alçı taşıyla birlikte öğütülerek reaksiyonun yavaşlaması sağlanabilir (Özdemir, 2020).

C_3A 'nın hidratasyonu alçılı ortamda $C_3A + 3\bar{C}\bar{S}H + 26H \longrightarrow C_6A\bar{S}_3H_{32}$ (etrenjit) tepkimesi meydana gelir. Etrenjit kristalleşmesi kısa iğneler gibi olmakta, hacim genleşmesi gerçekleşmektedir. Çimento içinde ileriki zamanlarda monosülfat (C-A-S-H) elde edilir. Çimento hamurunda hacim genleşmesi, etrenjit oluşumu anında plastik halde olduğundan herhangi bir problem yaşanmamaktadır. Beton sertleştikten sonra sülfatların girmesi sonucunda monosülfat hidratın etrenjite dönüşmesiyle hacim genleşmekte ve betonda çatlaklar oluşmaktadır (Nas, 2012).

2.1.5.2. C_4AF Ana Bileşeninin Hidratasyonu

C_4AF , C_2A ve C_2F bileşenlerinin ortalama bileşiğidir. Hidratasyon hızı olarak, C_4AF 'nin hızı C_3A 'ya göre daha düşüktür. Bununla birlikte hidratasyonları da benzerdir. Bir kısım alüminanın yerini demir oksit alarak, C_3A hidratasyonu gerçekleşmiştir. Hidratasyon tepkimesi sonucunda, alçı elde edilmediğinde ya da ideal değerde değilse hidrognat ($C_4AF + (6+n)H \longrightarrow C_3AH_6 + CFH_2$) meydana gelmektedir (Nas, 2012).

C_4AF bileşeninin hidratasyonu, çimento üretiminde alçıtaşı harcanmadığı ve ideal miktardan daha az kullanıldığında hızlıdır. Isı yüksek miktarda çıkmaktadır. Betonlar C_4AF oranı fazla, C_3A oranı az olan çimentolarla yapıldığında, sülfat etkilerine dayanımı oldukça iyi olarak belirlenmiştir (Nas, 2012).

2.1.5.3. C_3S Ve C_2S Ana Bileşeninin Hidratasyonu

Çimentonun yaklaşık %75'ini kalsiyum silikatlar meydana getirmektedir. Hidratasyonu gerçekleşen bu kalsiyum silikatlardan sonra bir dizi hidrat oluşmaktadır (Özdemir, 2020). Bu hidratların CaO/SiO_2 ve kristal suyu oranları değişmesiyle boşluklu bir yapıda rijit halde bir jel olarak birbirine benzemesiyle, Tobermorit jeli ya da C-S-H jeli olarak isimlendirilir ve çimentoya bağlayıcılık özelliği vermektedir (Nas, 2012).

C-S-H jellerinin kristali zayıf, parçaları kolloidal'dır. Şekilleri lif halde olan bu kristaller dağılımda düzene sahip değildir. C-S-H jelleri görünümü, üzerinde dikenleri ufak olan bir kese olarak elektron mikroskobundan bakılarak incelenmiştir. Kolloidal tabakada suyu içine çeken C-S-H jelleri bilinmektedir. Jel boşlukları katı kolloidal tabakaların arasında boyut olarak küçüktür (Nas, 2012).

2.1.5.4. Hidratasyon Isısı Ve Priz

Hidratasyon ısısı, ana mineralleri C_3A , C_4AF , C_3S ve C_2S olan Portland çimentosunun su ile tepkimeye girip hidratlanmasıyla meydana gelmektedir (Özbay vd., 2016). Birimi

cal/g veya J/g şeklinde kullanılır ve Portland çimentosunun hidrasyon ısısı, 120 cal/g ya da 500 J/g olarak elde edilmektedir (Özdemir, 2020).

Çimento ile su arasındaki fiziksel ve kimyasal etkileşim nedeniyle, beton priz alıp sertleşmektedir. Çimentonun inceliği ve kimyasal bileşimi, su/çimento oranı ve kür sıcaklığı gibi birçok faktör çimentoyla suyun tepkimesi sonucunda ortaya çıkan hidrasyon ısısını etkiler (Dai vd., 2021). Çimentonun inceliğini artırarak, su-çimento oranını azaltarak ve kür sıcaklığını artırarak çimentonun hidrasyon ısısı artırılmaktadır (Dorn vd., 2022).

Çimentonun ekzotermik davranışı olan priz alma ve sertleşme durumunda meydana gelen ısı, betonun düşük olan ısı iletkenliğinin yalıtkan hali sebebiyle iç kısmında sıcaklığını artırmaktadır (Snelson vd., 2008). Özellikle büyük kütle betonlarında, hızlı döküm sonucunda iç sıcaklık yükselir ve dış kısmın ise havayla temas etmesi sonucunda betonda soğumadan dolayı büzülme gibi olumsuz durumlar oluşmaktadır. Betondaki sıcaklık artışı, dozajın artırılmasıyla da gerçekleşmektedir. Fazla hacme sahip olan kütle, dış kısmın büzülmesini engelleyeceğinden betonun çatlamasıyla geçirimli bir ürün meydana getirmektedir. Çimentonun meydana geldiği bileşenler, kimyasal denge sınırına yaklaşımdan katı hal durumundaki yüksek enerji varlığıyla suyla tepkimelerinden hidrasyon ısısı meydana gelmektedir. Çimentonun priz süresiyle ısı yayılımı arasında bağlantı kurulabilmektedir. Hidrasyon reaksiyonlarında, çimento bileşenleri birbiriyle ilişkilidir. C₃A'nın hidrasyonu SO₄ iyonları nedeniyle yavaşlarken, C₃S hidrasyonunu da artırmaktadır. Çimentonun dört ana bileşenlerinin hidrasyonuna oksitlerin diğerleri de etki etmektedir (Özdemir, 2020). Hidrasyonların hızlıdan yavaşa sıralanması ilk günlerde C₃A, C₃S, C₄AF ve C₂S şeklindedir (Nas, 2012).

Hidrasyon ısısının miktarı, olumlu ve olumsuz durumlara neden olabilir. Soğuk olan havalarda, kimyasal tepkimelerde istenilen sürede priz alınmasıyla beraber dayanım da kazanılarak olumlu sonuca varılmaktadır. Sıcak havalarda ise, taze betonda normal zamana göre kıvamını kaybetme hızı artarak olumsuz etki etmektedir. Kütle betonlarda, dış yüzeyin havayla temas halinde olmasına rağmen iç kısmın sıcaklığının yüksek olması sonucu ısı farklılıklarından dolayı çatlamalar oluşmaktadır (Özdemir, 2020).

Priz alma süresi beton için çok önemlidir. Prizini almaya başlamasıyla taze beton, işlenebilirliğini de kaybetmektedir. Ama bu durum prizin zamanında bitmesi ve dayanım kazanmasına etki ettiği için, çimento içinde belirlenen alçı oranı da önemli olmaktadır.

Kimyasal katkı maddeleri, prizinin yavaşlayıp hızlanmasına etki etmekte ve kullanılan çimentonun türüne, hava şartlarına ve inşaat hallerine bağlı olarak da değişmektedir (Özdemir, 2020).

2.2. PUZOLANLAR

Kendi başlarına bağlayıcılığı olmayan ancak ince şekilde öğütüldüğünde, sıcaklığı normal düzeydeyken ve kalsiyum hidroksitle sulu ortamda reaksiyona girdiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanan alüminli ve silisli maddelere puzolan denir (Özdemir, 2020). Alüminli ve silisli tüm malzemeler puzolanik yapıya sahip olmadığından kuvars (SiO_2), mullit ($\text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_{12}$) ve sillimanit (SiAl_2O_5) puzolan değildir (Nas, 2012). Puzolanların oluşumu genellikle reaktif olan alüminyum oksit ve silisyum dioksitten oluşur (Mert, 2021).

Puzolan, Almanya’da “Tras” olarak, Yunanistan da “Santorin toprağı” olarak adlandırılır. Volkanik tüflü puzolanlara ise, Türkiye’de “tras” denilmektedir (Özdemir, 2020).

Tras, Türkiye’de zengin yataklara sahip doğal puzolan olup, km^2 alan değerinde volkanik kayalarla çevrelenmiştir. Antik yerleşimde volkanik kayalar, Datça yarımadasının en batı kısmında Knidos’ta, doğusu Çekmeköy, Yazıköy ve Cumalı’da görülmektedir (Barış ve Tanaçan, 2021).

2.2.1. Puzolanların Tarihçesi

Neolitik çağda bilim insanları inceleme yaparak Çatalhöyük’teki yapılarda harcanan harçların önceki 8000 yılına ait olduğunu bulmuşlar ve büyük olasılıkla volkanik kül malzemesiyle meydana geldiği varsayılmaktadır (Özdemir, 2020).

Basra Körfezinden sağlanan doğal puzolan ve kirecin birleşiminden oluşan diatomlu toprak biçimindeki hidrolik bağlayıcı uygulanarak, M.Ö. 5000 tarihinde beton elde edildi. Volkanların patlaması sonucu çıkan doğal puzolan olan kül, Akdeniz çevresinde M.Ö. 1500 ile 1600 yılları arasında inşaatta uygulanmıştır (Sapal ve Wegner, 2017). Puzolanlar, Romalılar tarafından Napoli civarında Pozzuoli kasabasında tahmini M.Ö. 100 yıllarında ortaya çıkmıştır. Bu kasabanın adından türeyen malzeme aynı zamanda Vezüv’ün eteklerinde ortaya çıkmış camlaşmış volkan külüdür (Mert, 2021).

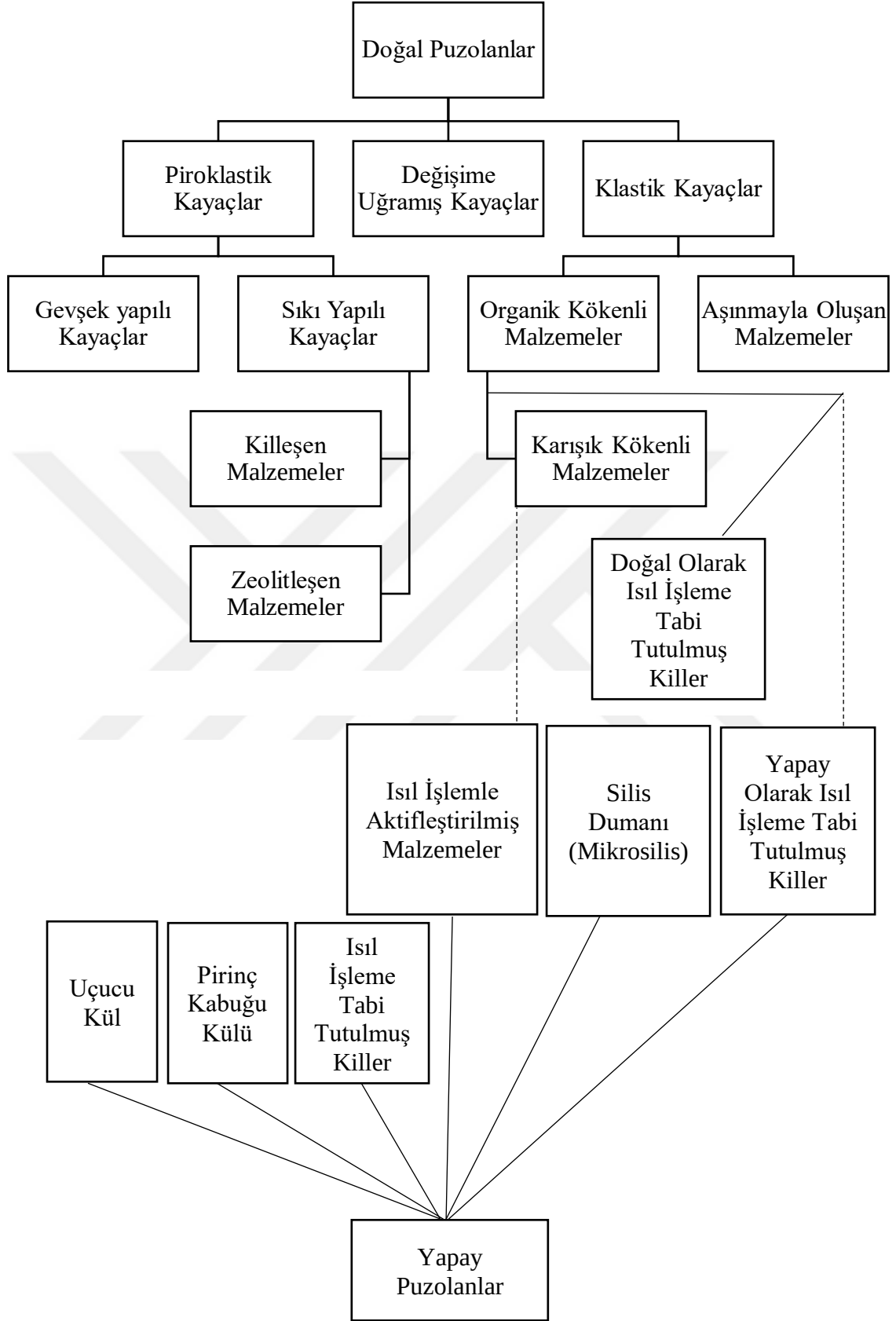
Puzolan hakkında bilgiye mimar Vitruvius yazdığı ‘Mimarlık Üzerine’ adlı kitabında yer vermiştir. Bu tezinde Romalılar tuğla ya da kiremitin öğütülmesini, kilin pişirilmesini

puzolan özelliğine sahip bir malzeme olarak göz önünde bulundurmuşlardır. Su içinde bağlayıcılık ve sertleşme özelliği kazanan harca ulaşmak için volkanik külü, su ve sönmüş kireç ile karıştırmışlardır. Elde edilen harcın içerisine taş ve benzerlerini katarak günümüzdeki betonu andıran betona ulaşılmıştır. Osmanlı döneminde sönmüş kireçle birlikte kilin pişirilmesiyle çömlek, tuğla, kiremit elde edilip öğütülmesiyle malzemeler harmanlanıp “Horasan harcı” meydana gelmiştir (Nas, 2012).

2.2.2. Puzolanların Sınıflandırılması

Puzolanlar, yapay ve doğal puzolan olarak ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan endüstriyel atık malzemelerinin üretimiyle meydana gelen puzolanik aktiviteye sahip yapay puzolanlardır. Doğal puzolanlar ise, ana oluşumu volkanik aktifliği fazla olan yerlerde görülmektedir. Bazı doğal puzolanların kalsinasyonu sonucunda yapay puzolan sınıflandırmasına girdiği de bilinmektedir (Pınarcı, 2022).

Doğal puzolanların, jeolojik olarak yakın dönemlerde yüksek volkanik aktiviteye sahip olan bölgelerde ortaya çıktığı bilinmektedir. Puzolanların sınıflandırılmasında, en yaygın olan F. Massazza’nın oluşturduğu puzolanların kökenini gösteren sınıflandırma Şekil 2.1’de gösterilmiştir (Pınarcı, 2022).



Şekil 2.1. Puzolanların sınıflandırılması (Massazza'ya göre) (Pınarcı, 2022).

Doğal puzolanlar sınıflandırılmada üç grupta gözden geçirilmiştir. Birinci sınıflandırma volkanlardan fırlayan eriyik malzemelerin yeryüzüne ulaşmasıyla soğuyup kırıntılar oluşturan piroklastik kayaçlardır. Değişim geçirmiş kayaçlar, fazla ölçüde silis minerali içeren malzemelerden meydana gelmektedir. Oksitlerin suyun içeriğinde serbest kalarak kimyasal değişime uğraması sonucu oluşmaktadır. Bu kayaçların şekillenmesi, durgun sularda kökeni değişik malzemelerle çökmesiyle gerçekleşir. Klastik kayaçlar, diatomit ve kil bu kısımdadır. Kilin Portland çimentosuyla kullanılması puzolanik özelliğinin az olmasından dolayı uygun görülmemektedir. Ama, sıcaklığı uygun koşullarda kalsine edilmesiyle puzolanik özelliğinde yükseliş sağlanabilir (Özdemir, 2020).

Yapay puzolanlar uçucu kül, pirinç kabuğu külü, ısıtılma tabi tutulmuş killer, ısıtılma işlemle aktifleştirilmiş malzemeler, silis dumanı (mikrosilis), yüksek fırın cürufu gibi örneklerden oluşmaktadır (Pınarcı, 2022).

2.2.3. Puzolanların Aktivitesi

Puzolanik malzemelerin kalsiyum hidroksit ve suyla bir araya gelmesine, ne oranında reaksiyon gerçekleştirebildiği ve sonuç olarak bağlayıcılığını hangi oran ve hız ile kazanabildiği puzolanik aktivite olarak tanımlanmaktadır. Puzolanik aktivite, puzolanın yapısı, portlandit (CH), tepkime hızı, bağlanma miktarları, aktif fazlarının miktarı ve kalitesine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Puzolanların karışık hidratasyon süreci ve homojen yapıda olmamaları nedeniyle puzolanik aktiviteyi ifade edecek sistem tam olarak şekillendirilememektedir. Genel olarak puzolanların davranışları şu şekilde açıklanabilir. Standartlara uygun olarak kireç puzolan karışımında kireç/puzolan oranı artarsa CH bağlanması da artacaktır. Kireç-puzolan karışımlarında bağlanan kireç miktarının yükseltilmesi bekleniyorsa su miktarı da yükseltilmelidir. Zeolitik puzolanların aktifliği, camsı puzolanlara göre daha yüksektir. Camsı fazların puzolanların özelliğine göre farklılaşması, değişik miktarda kireç bağlayabilme özelliği sağlamaktadır (Pınarcı, 2022). Puzolanik aktiviteyi sağlamak, puzolanik malzemenin amorf yapıda olmasıyla, gereken oranda alümin, silis ve demir oksit içermesiyle ilgilidir (Özdemir, 2020). Puzolanik aktivite malzemenin inceliğiyle de ilişkilidir. Erken yaştaki basınç dayanımını spesifik yüzey, sonraki yaş dayanımı performansını camsı fazda mineralojik ve kimyasal bileşimler etkiler (Agra vd., 2023). Aktivitesi yüksek puzolanların kazandığı özellikler, özgül yüzey genişliği, yüksek alkali miktarı ve Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 ve camsı faz hali miktarının yüksek olmasıdır (Nas, 2012).

Fe_2O_3 konsantrasyonunun %8'in üstünde bulunmasının, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğinin çalışmasında aktiviteye olumsuzluk verdiği ifade edilmiştir (Pınarcı, 2022).

2.2.4. Pozolanik Reaksiyon Ve Reaksiyon Ürünleri

Pozolanlar ince halde yeterli neme sahip olduklarında hidroksit ile tepkimeye girerek pozolanik reaksiyon oluşturmaktadır. Pozolanın tepkimelerdeki sonucunun değişmesinin nedenleri, kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girmesiyle incelik, camsı bileşik oranı gibi özelliklerinin beraberinde ortamın yapısına ve ısıya eklenen katkı malzemeleri gibi dış etkenler olabilir (Pınarcı, 2022).

Bileşenler olarak yüksek oranda silisli ya da silisli alüminli içeriklere sahip olup bağlayıcılığı olmayan pozolanlar, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve su ile tepkimeye girerek kimyasal reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyon sonucunda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum hidrat jelleri meydana gelir (MolaAbasi vd., 2022). Doğal pozolan ve kireç reaksiyonunun sonucunda, kalsiyum silikat hidrat C-S-H biçiminde, kalsiyum alüminat hidrat C_4ASH_x biçiminde (x, 9-13 aralığında), kalsiyum karboalüminat ($\text{C}_3\text{A}.\text{CaCO}_3\text{H}_{12}$), kalsiyum alüminat monosülfat ($\text{C}_4\text{A}.\text{CaSO}_4.\text{H}_{12}$), hidrat gehlenit (C_2ASH_8), etrenjit ($\text{C}_3\text{A}.3\text{CaSO}_4.\text{H}_{32}$) ürünleri ortaya çıkmaktadır. Tüm ürünler aynı anda olmayabilir ve bulunabilmeleri pozolanın kimyasal ve mineralojik bileşenlerine, hidratasyon esnasında çevre şartlarına, hidratasyon reaksiyonun derecesine, kirecin kalsiyum hidroksiti kullanabilmesine dayanmaktadır (Koçak, 2008).

2.2.5. Çalışmada Kullanılan Pozolanlarla İlgili Genel Bilgi

2.2.5.1. Yüksek Fırın Cürufu

Atık olarak farklı metalürji tesislerinden meydana gelen malzemelere cüruf denilmektedir. Çeşitliliği, cürufun meydana geldiği sanayi kuruluşunun oluşturduğu ürünün tipine, üretimde uygulanan üretim yöntemine ve kimyasal yapılarına göre değişmektedir. Örneklendirecek olursak bakır ve nikel cürufları sadece pozolanik özelliğe sahip, yüksek fırın cürufları ise kendi başına bağlayıcılığa sahiptir. Yüksek fırınlarda demirin meydana gelmesi için gereken, demir cevherlerin sıcaklıklarının yüksek düzeyde ısıtılması işlemidir. Böylelikle demir cevherinden oksijen ve yabancı malzemeleri uzaklaştırmış olmaktadır. Demir cevheri ile kalker taşı, arındırma işlemine katkı sağlamak için kok kömürünün yakıt olarak faydalandığı fırınlarda birlikte ısıtılmaktadır. Kok kömüründen karbon ile demir oksitten oksijenin bir araya gelmesiyle yüksek

sıcaklığın etki etmesiyle CO₂ ve CO gazları meydana gelir ve bu gazlar fırından çıkmaktadır. Eriyik durumda CaO, MgO, Al₂O₃, SiO₂, MnO ve S yabancı maddeler içeride durmaktadır. Yoğunluğunun azlığından ötürü bu maddeler fırınlarda ham demirin üstünde yer almaktadır. Yüksek fırında demir ve yabancı malzemeler farklı yerlerden geçirilir. Tüm işlemlerden sonra yabancı malzemelerin meydana gelmesiyle oluşan birleşmeye yüksek fırın cürufu adı verilir. Yüksek fırının neredeyse 1400-1600 °C arasında oluşum sıcaklığı mevcuttur (Mert, 2021). Yüksek fırın cürufunun içeriğinde Al₂O₃, SiO₂ ve CaO bulunmaktadır. Kimyasal yapısı kadar mineralojik yapısı da oldukça önemlidir. Yüksek fırının çıkışında cüruflar yavaş soğutulursa kristal hale gelir ve beton agregası olarak yararlanılabilir. Cürufların soğutulması hızlı şekilde olursa amorf halde katı eriyik elde edilir. Aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitten yararlanılarak ya da ince öğütülerek yarı kararlı amorf haldeki malzeme Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan portlandit (CH) ile tepkimeye girmesiyle kalsiyum silikat hidratlar (C-S-H) meydana gelmektedir. En az 2/3 oranında camsı fazı kapsamalı ve CaO, SiO₂, MgO miktarları toplamının olması, farklı hidrolik modüllerden (CaO+MgO)/SiO₂ ya da (CaO+MgO+Al₂O₃)/SiO₂ oranının 1'den büyük olması istenmektedir (Şahin ve Koçak, 2022). İki farklı yöntem olan granülasyon yöntemi ve peletleme yöntemi ile hızlı soğutulma işlemleri yapılabilmektedir. Granülasyon yöntemiyle 100 m³ sudan faydalanılarak yüksek fırın cürufu 1 ton miktarda soğutulmuştur ve işlem sonunda su içeriği %30 oranındadır. Filtreli havuzlar ya da kurutucu değirmenler yardımıyla cüruftaki su çıkarılır. Özellikleri açısından en iyi yüksek fırın cürufu bu yöntemdeki granüle yüksek fırın cürufudur. Ancak pahalı olmasından dolayı kısıtlı bir yöntemdir. Diğer yöntem olan peletleme yöntemi ise, maliyeti düşük ve kolay uygulanabilir olmasından dolayı yaygındır. Yüksek fırın cürufunun eriyik fazı suyla soğutulduktan sonra tamburunun dakikada 300 devir yapmasıyla havaya atılır. Yüksek fırın cürufun 1 tonunun soğuması için 1 m³ su kullanılmakta ve işlem sonunda %10 oranında su bulunmaktadır. Granülasyon yöntemindeki gibi cüruftaki su, filtreli havuzlar ya da kurutucu değirmenler yoluyla ayrılır. Yüksek fırın cürufu peletleme yöntemiyle farklı boylarda temin edilmekte, 4-15 mm aralığında gözenekli yapıda olup kristal yapıya sahiptir. 4 mm'den küçük olduğunda camsı yapıda ve çimento ile ikamede kullanılmaktadır (Mert, 2021).

Yüksek fırın cürufunun XIX. yüzyılın ikinci yarısında bağlayıcılığa sahip olduğu elde edilmiş ve ticari amaçlarla cürufu bağlayıcılar oluşturulmuştur. Portland çimentosunda

hammadde olarak 1883 yılında, mineral katkı malzemesi olarak 1892 yılında uygulanmıştır. Günümüzde çimento üretiminde yüksek fırın cürufu birçok ülkede değerlendirilmektedir (Şahin ve Koçak, 2022).

Yüksek fırın cürufu, Portland çimentosu yerine betonda sürdürülebilir bir malzeme elde etmek için kullanılmaktadır. İçeriğinde yüksek oranda demir, kalsiyum ve magnezyum olduğu için tarımda gübre olarak da faydalanılmaktadır (Ballari vd., 2023). Dayanıklılığı artırmak, güçlü bir malzeme meydana gelmesi, enerjinin korunması (Ballari vd., 2023), düşük maliyete sahip olması, mukavemetinin yüksek olması, çimento kullanımındaki azalma nedeniyle CO₂ emisyonlarının düşük olması gibi yararları vardır (Yuan vd., 2023). Betona dahil edilmesiyle erken yaşta dayanımının düşük olmasına sebep olurken ileri yaşta dayanımının arttığı, betonda iyi işlenebilirliğe, düşük hidratasyon ısısına ve az terlemeye sahip olduğu, priz sürelerini uzattığı, su ve klorür permeabilitesini azalttığı, alkali silika direncini ve donatı korozyon direncini yükselttiği bilinmektedir (Şahin ve Koçak, 2022). Yüksek fırından elde edilen erimiş cüruf su verme yöntemiyle ani soğuyarak katılaşp camsı bir hale gelmektedir. Portland çimentosu için, suyla reaksiyonu sonucunda bağlayıcılığının meydana gelmesi aktive olmuş hidrolik özelliği nedeniyle ideal bir katkı malzemesidir (Liu vd., 2017).

2.2.5.2. Diatomit

Diatomit, su yosunları fosillerinin birikmesiyle meydana gelen, basit bir şekilde öğütülen ve toz haline gelebilen, ağırlığı hafif olan doğal bir puzolan türüdür. İçeriğinde alümina, silika ve demir oksit barındırır (Lauermannová vd., 2021). Yüksek silika içeriğine sahip olup yüzey alanı geniş, gözenekliliği ve su emme gücü fazla, özgül ağırlığı düşük bir katkı malzemesidir (Aksakal vd., 2021). Diatomit, parçacık boyutunun küçük olmasından dolayı çimento parçacıklarının arasını kaplayabilir. Yüksek oranda SiO₂ bulundurduğu için puzolanik özelliğe sahiptir. Bu sebeple hidratasyon işlemi değişimi diatomit eklemesiyle gerçekleşebilir (Sun vd., 2020). Hafiflikleri sebebiyle şekil olarak yıldız, silindir ve çubuk gibi farklı görünümde, iç kısımları boş, delikli bir yapıdadırlar. Mohs sertliği 4,5-6 değerinde olup, 0,15; 0,40 g/cm³ kuru özgül ağırlığa sahiptir. Yapısı gevşek, neredeyse %80-85 arasında boşluk oranına sahip elde ufalanabilecek düzeydedir. Porozitesi yüksek, yoğunluğu düşük, ısı-elektrik-ses iletimi iyi olmayan bir malzemedir. Bu gibi yapılarıyla izolasyon özelliği ve elastikiyeti tercih sebebidir (Pınarcı, 2022). Diatomit yapısının kararlılığı, maliyeti düşük, yüzey/hacim oranı fazla olmasından ve çevre dostu haliyle birçok alanda faydalanılmaktadır (Xu vd., 2023). Sıkıştırma direnci

fazla, kimyasal etkilere karşı dirençli (Ma vd., 2017), çimentoda katkı malzemesi olarak kullanarak donma direncinin dayanıklılığını yükselterek olumlu sonuçlar sağlanmaktadır (Sun vd., 2020).

Mezozoik zamanın Kretase döneminde oluşan diatomitlerin günümüze kadar geldiği bilinmektedir. Ticari öneme sahip olan bu diatomit yatakları Miyosen çağında ortaya çıkmıştır. Gelişme ve artma hızı, diatomitlerin silis oranının suda çözünmesiyle belirlenmiştir. Diatomitler nem ve ışıkla yetiştiği için ortam olarak denizlerde, nehir kenarlarında, tatlı sularda, az tuzlu sularda ve göller gibi yerlerde olması artma hızını desteklemiştir. Bilinen on altı bine yakın diatomit çeşitleri denizler, nehir kenarları, az tuzlu sular ya da tatlı sulardadır (Çalışkan, 2018).

Diatomit 1930 yılından itibaren gelişip katkı malzemesi, izolasyon, filtre yardımcısı ve refrakter malzemesi olarak belirli amaçlarla kullanılmaktadır. Çimentolu yöntemlerde uygulanması 1950 yılından sonra başlamıştır. Ülkemizde 1955 yılında Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş bünyesinde diatomit üretimi çalışmaları başlamıştır (Çetin ve Taş, 2012). Türkiye’de olan kaliteli ve bol miktarda ham diatomit rezervleri, Afyon, Ankara, Kütahya, Eskişehir, Kayseri, Konya, Niğde, Bingöl, Aydın, Balıkesir, Çanakkale, Çankırı, Denizli, Sivas ve Van’da görülmektedir (Çalışkan, 2018).

2.2.5.3. Kaolin, Metakaolin Ve Kalsine Kaolin

Kaolin, doğal şekilde feldspat mineralinin ayrışmasıyla meydana gelen atık bir kil malzemesidir (Shafiq vd., 2015). Kaolin çoğunlukla %92 ile %100 arasında kil ve siltten meydana gelmektedir. Yapılan araştırmalara göre kaolin kilinin özgül ağırlığı 2,43’ten 2,69’a kadar ulaşmakta, örnekler içinde en yüksek pH değeri ise 8 olarak bilinmektedir (Ayub vd., 2023). Genellikle silikatlar içeren ve yüksek puzolanik reaksiyona sahip bir mineral karışımıdır. Çimentodan daha fazla SiO₂ içeriği olan kaolin betona ilave edildiğinde hidratlı çimento hamurunun mukavemetine duyarlı dikalsiyum ve trikalsiyum silikatların elde edilmesini destekleyecektir (Su Le’ Mya Thwin ve Myat Thwe, 2023). Sık bir şekilde doğada bulunan ve düşük maliyete sahip iyonik kristal yapıdadır. Absorplama özelliğine sahip çevre dostu bir hammaddedir (Hu vd., 2023). Kaolin çoğunlukla seramiğin üretiminde, tekstil ve kağıt imalatlarında kullanılır. Kaolinit, kaolinin hammaddesini meydana getiren en önemli mineraldir (Özer, 2009).

Kaolinit, sulu alüminyum silikattır ve mineralojisi Al₂Si₂O₅(OH)₄ bileşiminden oluşur (Yılmaz, 2004). Volkanik ve magmatik olaylar anında feldspatların kaolin yataklarının

meydana gelmesi için kaolinleşmesi koşulu vardır. Metakaolin, kaolinit ya da saflaştırılmış kaolin kallerinin yaklaşık 500-800 °C sıcaklık aralığında kalsine edilip ince şekilde öğütülmesiyle meydana gelmektedir. Kil mineralleri 100-200 °C arasında içeriğindeki suyu bırakır (Özer, 2009). Kimyasal bağlı suyun çıkmasıyla silika ve alüminanın amorf karışımı metakaolin ortaya çıkar (Yılmaz, 2004). Metakaolin kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek hidrat oluşturabilir. Böylelikle hem harç hem de betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerine iyi anlamda katkı sağlamış olur. Metakaolinin ne kadar miktarda reaksiyona gireceği ham kaolin kaynağına, içerdiği minerale ve üretim koşullarına dayalı olduğu bilinmektedir (Özer, 2009). Kalsine kaolin üretimi ise, sıcaklığı yüksek şekilde kaolin kilinin ısıtılmasıyla oluşmaktadır. İçeriğinde SiO_2 ve Al_2O_3 bulunduran önemi çok fazla olan kil mineralidir (Laonapakul vd., 2022). Kaolinden metakaolin haline gelip yaklaşık olarak 950 °C sıcaklıkta amorf alümina, kristalin alümine değişerek kalsine kaolin elde edilir. Sıcaklığın artmasıyla 1000 °C’de alümina ve silika (SiO_2), amorf mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ile tiridimit (SiO_2) haline dönüşmektedir (Yılmaz, 2004). İçeriğinde az miktarda kaolinit barındırdığından dolayı kalsine kaolinin dehidroksilasyon derecesinin %100’e tamamlanmasına gerek kalmamaktadır (Shafiq vd., 2015). Kaolin kili kristal yapıda olmasından dolayı tepkimeye girmediğinden, kalsinasyonu ile birlikte amorf yapıya dönüşüp reaktivite sahibi olmuştur (Ababneh vd., 2022). Kalsine kaolinin çimentoya eklenmesiyle yüksek erken basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı beklenmektedir (Shafiq vd., 2015). Belirli oranlarda kullanıldığında mekanik ve elektriksel özelliklerinin iyileşmesi, kaolinin ortalama 650-700 °C aralığında kalsine edilmesiyle esnek ve opak olması, çevre dostu ve sürdürülebilir bir malzeme olarak üretilmesi (Saride vd., 2022), karbon ayak izlerinin düşük olması, atmosfere salınan CO_2 emisyonlarını azaltıp üretiminde daha az enerji gerektirdiği gibi olumlu sonuçlar vermektedir (Li vd., 2023). Kaolin Türkiye, Amerika Birleşik Devletleri, İtalya, Birleşik Krallık, Almanya ve Özbekistan’da bol miktarda görülmektedir (Ababneh vd., 2020). Kullanımı yaygın olan metakaolin, önemli bir malzeme olan sınırlı düzeyde bulunan kalsine kaolindir (Žibret vd., 2023). Kalsine kaolinin inşaat alanında öne çıkmasının sebebi hammaddesinin bol, çeşitli oluşu ve küresel anlamda mevcut kaynak sunmasıdır (Li vd., 2023).

2.3. HAMMADDELERE UYGULANAN ANALİZLERE İLİŞKİN LİTERATÜR BİLGİSİ

2.3.1. X-Işınları Kırınımı Tekniği İle Yapılan Analiz

X-Işını Kırınımı tekniği (XRD), mineral tipinin tespitinde hayli yaygın olduğu bilinmektedir. İki kademedен oluşan bu tekniğin birincisinde minerale ilişkin pik deseni oluşturulurken, ikincisinde mineral tipinin tespit edilmesi için meydana gelen pik deseninin mineral veri tabanında analizlerinin karşılaştırması yapılmaktadır (Yünsel vd., 2019). Numunelere uygulanan sinterleşme ile baştan sona kristallenme davranışlarını çekirdeklenme bölümünden son kristalleşmeye kadar içine almaktadır. Yapılan bu analizden, işlemler süresince oluşan çeşitli kristal fazlardaki ardışıklığı çözebilmek ve yeterli sıcaklık ölçütlerini belirlemekte faydalanılmaktadır (Özdemir, 2020).

Bu yöntem, kristal fazının kendine ait atomik dizilişlerine bağımlı, ışınların özgün bir düzende kırılması esasına ulaşmaktadır. Fazlar için uygulanan kırınım profilleri bir nevi parmak izine benzetilir ve sadece o kristali ifade etmektedir (Özdemir, 2020).

2.3.2. Eş Zamanlı Termal Analiz

Diferansiyel termal ve termogravimetrik analiz, gelişmiş olan kür zamanları, hidrasyon derecesinin ve hidratlı bileşiklerin tespit edilmesi için kullanılmaktadır (Monteagudo vd., 2014).

Tek bir numune üstünde iki veya daha çok termal analiz tekniğinin gerçekleştirilmesiyle eş zamanlı termal analiz oluşturulmaktadır. Bu şekilde fark taramalı kalorimetri (DSC) ile termal gravimetri analizi (TGA) veya diferansiyel termal analiz (DTA) ile termal gravimetri analizi (TGA) şeklinde yapılabilmektedir (Nas, 2012).

DSC, termal reaksiyonlarla numuneye giren ya da çıkan ısı akışının arasındaki farkı ölçmektedir. Kalorimetri olarak adlandırılan analizin diğer grubu bu yöntem olan DSC'dir. Bir maddenin termal kapasitesini ya da spesifik ısını ölçen kalorimetrisinin DTA ile ilişkisi yakındır. DSC, sıfır sıcaklık farkının belirlenmesi için gereken enerji miktarını, referans madde ve numunenin kontrollü olarak ısıtılmasıyla ölçüm yapmaktadır (Koçak, 2008).

Termogravimetrik analiz, biyokütlenin termal sürecini tespit ederek oluşan değişikliğini belirlenip, ısıdan kaynaklanan bozunma sonucunda miktarların değerlendirilmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir (Rasam vd., 2020). Numunenin kütle değişimi, numunenin içeriğindeki bileşimine, ısıtma hızına, sıcaklığa ve fırındaki gazın türüne bağlıdır. Kütle değişimi belirli sıcaklık altında oluştuğunda belirli bir kimyasal bileşiğin varlığını gösterir. Numunedeki bileşik miktarı, bu değişimin büyüklüğüyle anlaşılır. Sıcaklık yükseltildiğinde, numunedeki serbest su buharlaşarak kütle azalır. Numune, suyun bir kısmını 100-400 °C arasında hidrasyon ürünlerinde diğer kısmını alüminat hidratlarda bitirecektir. 400 °C ve 500 °C aralığında kalsiyum hidroksit ayrışmasıyla kalsiyum oksit ve suya parçalanıp ağırlığında kayıp yaşanır. Bu kayıp miktarının kullanılma sebebi, orijinal haldeki kalsiyum hidroksit miktarını tespit edebilmektir. Sıcaklık 500 °C ve üstünde olduğunda hidrasyon ürünlerinden az miktarda ilave olan su kaybolur. Karbondioksit kaybı 800 °C de karbonatlı fazlarda meydana gelir. Termo gravimetrik analiz, kalsiyum hidroksit miktarını belirleyerek numunede ortaya çıkan hidrasyon derecesinin göstergesidir. Kalsiyum hidroksitin kaybolmasının izlenmesi puzolanik reaksiyon sebebiyle, puzolanların reaktivite değerlendirmesi yapılabilir (Nas, 2012).

Önceden simultane termal analiz ile yapılan çalışmalardan, Portland çimento, mineral katkılı çimento ve kimyasal katkılı çimento harçlarında temel reaksiyonların, farklı sıcaklıklarda meydana geldiği görülür (Özdemir, 2020).

0-100 °C: Gözeneklerde ortaya çıkan fiziksel ve kimyasal suyun dehidratasyonu (Endotermik),

100-400 °C: Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), alüminat, etrenjit, alüminasilikat ve diğer silikatların dehidratasyonu (Endotermik),

400-580 °C: CH (Ca(OH)₂)'in dehidroksilasyonu (Endotermik),

750-825 °C: Kalsiyum karbonat (CaCO₃)'ın dekarbonasyonu (Ekzotermik) (Özdemir, 2020).

2.3.3. Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi Tekniği İle Yapılan Analiz

Kızılötesi (IR) spektroskopisi, organik ya da inorganik bileşiklerin belirlenmesinde uygulanan araçtır. Atomlar arası bağların titreşimiyle meydana gelen frekanslarla oluşan absorpsiyon pikleriyle örneğin parmak izini IR spektrumu belirtmektedir. Her madde

kendine ait spektruma sahiptir. Ayrıyeten 2000 cm^{-1} 'den sonra gelen kısmı organik madde spektrumlarının çok fazla ince ayrıntıda olan kesimidir. Parmak izi bölgesi olarak adlandırılan bölge, iki kat spektrum büyütülmesiyle edinilir ve maddenin özelliğiyle ilgili geniş bilgi sağlanmaktadır (Kulea, 2014). Fiziksel yöntem olarak titreşim ışınlarının maddeye absorplanmasıyla ilgili yerleşmiş olan IR, ekonomik, hızlı ve yıkıcı etkisi olmadığı için sıvı ve gazın katı yüzeyindeki emiliminin araştırılmasında fazlaca yararlanılmaktadır. Bu teknikte moleküllerdeki kimyasal bağların eğilme, bükülme, titreme ve sallanma hareketleri dolayısıyla gereken enerji, infrared ışınlarının elektromanyetik enerjisinden absorplanır ve absorbansların ölçümü pikler aracılığıyla belirtilmektedir. İnfrared spektrumlar genelde dalga sayısı ile açıklanır (Topçuoğlu ve Gürocak, 2023). Ölçülen absorbanslar, konsantrasyon ve numune kalınlığıyla doğrudan ilişkilidir. Kimyasal bağlar C-H, C-C gibi aynı şekil ve oranda enerji absorplamaz (Özdemir, 2020). Pikler şekillerine göre dar, orta ve geniş pikler, yapılarına göre zayıf, orta ve kuvvetli olarak ayrılmaktadır. Malzeme türünün tanımlanmasında piklerin şekli, yapısı ve konumuna bakılarak belirlenir. Piklerin boy ve alan değerlendirmesiyle miktarları da saptanmaktadır (Pınarcı, 2022).

Moleküllerin bağ yapılarını anlayabilmek amacıyla bileşenlerin ışınları absorplamasıyla belirlenmiş bir yöntem infrared spektroskopisi teknolojisidir. Araştırmalarda tercih edilme sebebi, epey ekonomik ve hızlı şekilde uygulanmasıdır. Bu özelliği elde etmesi iki temel sebebe dayanır. İlki belirlenen kristal kafeslerin fiziksel değerlerinin kaynağı olması, ikincisi malzemelerin saf ölçülebilen ilişkilerinin fark edilmesidir (Pınarcı, 2022).

Kimyasal olarak bağlı bileşikler, meydana gelen frekanslarla infrared çalışmaları prensibi gereği titreşimlerin buluşmasıyla oluşmaktadır. Bu dalgaların numuneye etki etmeden önceki değeri (I_0), sonraki değeri ise (I) olarak belirlenmektedir. Böylelikle infrared spektrumunun, meydana gelen I/I_0 diyagramı yardımıyla çizimi yapılabilmektedir (Pınarcı, 2022).

Monokromatik infrared ışın bandının maddeyi aydınlatması gerçekleştiğinde, ışınların bir kısmı moleküllerin titreşimi sebebiyle absorbe olabilir. Maddenin tanımlanmasında uygulanan ve karakteristiğini oluşturan absorpsiyon ile dalga boyu aralarındaki meydana gelen grafiklerdir. İnfrared ışının dalga boyunun tespiti infrared spektroskopisinde $1000\text{--}300000\text{ nm}$ arasında yapılmaktadır (Özdemir, 2020). Kızılötesi dalga boyu ışınları genel olarak $2500\text{--}25000\text{ nm}$ aralığında seçilmekte ve bu aralığa infrared bölgesi denilmektedir.

Dalga sayıları ile bu teknoloji uygulanmaktadır. Formülü; $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda}$ (cm⁻¹), dalga boyları aralığı; $\nu = \frac{1}{2500} \cdot 10^{-7} = 4000$ cm⁻¹ ve $\nu = \frac{1}{25000} \cdot 10^{-7} = 400$ cm⁻¹ olarak verilmiştir. IR ışınları 400 cm⁻¹'den daha az değerde olanların havadaki moleküller aracılığıyla kolaylıkla absorbe olmalarının sebebi rotasyon performans düzeyinde olmalarıdır (Pınarcı, 2022).

Çimento, katkılı çimento ve puzolanlara dair uygulanan çalışmalarda dört ana band bölgesinde infrared spektrumu kullanılmaktadır. Burada Si-Al, S, C ve OH titreşim ve deformasyon bağlarında meydana gelen titreşim sayıları vardır ve bölgelerdeki titreşim sayıları farkı ölçülmektedir. FT-IR yönteminde dalga sayıları dört bölgede açıklanmaktadır (Topçuoğlu ve Gürocak, 2023).

Birinci bölge, 400-1100 cm⁻¹ bölgesi olduğu aralıkta titreşim dalgaları Si (Si-O ve Si-O-Si) ve Al (Al-O, Al-O-Al) bağlarını sağladığı gösterilmektedir. Araştırmacılara bakılırsa, dalga sayılarında çimento bileşenlerinden kalsiyum silikatların 930 ve 1000-1010 cm⁻¹ aralığında, karbon ve kalsiyum titreşimlerinin 2920-2930 ve 2850-2855 cm⁻¹ aralığında, referans çimentoların 1000-1010 cm⁻¹ aralığında titreşim bandları fazla yoğunluğa sahiptir (Topçuoğlu ve Gürocak, 2023).

İkinci bölge S (kükürt) bölgesi olarak ifade edilir ve bu pikler 1100-1300, 1620-1685 ve 3100-3600 cm⁻¹ aralıklarında meydana gelmektedir. Bu üç bölgede S-O bağına rastlandığı ve çimento içeriğindeki alçı taşından meydana geldiği belirtilmektedir (Topçuoğlu ve Gürocak, 2023).

Spektrumdaki C (C-O) titreşim bağlarını içeren 700-1500 cm⁻¹ dalga sayılarının aralığı üçüncü bölgedir. İkinci bağlar olarak devam eden 2500-3000 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında bu bağlar çimentonun karbonasyonunun sonucu olarak elde edilmektedir (Pınarcı, 2022).

Dördüncü bölgede, su moleküllerine sahip 3400-3450, 1620-1650 cm⁻¹ dalga sayılarının aralığında (O-H) titreşim ve deformasyon bağları vardır. Portland çimentosu harçlarında katkısız çimento harçlarından daha yüksek dalga sayılarına sahip olup, Portland çimentosu harcı için 3441-3446 cm⁻¹ dalga sayılarında az miktarda susuz bileşiklerin, katkısız çimento harcı için 3409-3414 cm⁻¹ dalga sayılarında susuz bileşiklerin olduğu bilinmektedir. Hidrate olmuş çimentolarda dalga sayıları tobermorite için 3630 cm⁻¹, portlandit için ise 3650 cm⁻¹ bölgesinde gözükmemektedir (Topçuoğlu ve Gürocak, 2023). Minerallerdeki moleküler bağlar bölgelerdeki dalga sayılarının varlığıyla değerlendirilebilmektedir (Özdemir, 2020).

2.3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Tekniği

SEM cihazları belli yöntemlerle görüntüyü aktaran ışık hatlarını merceklerden yararlanarak çıplak gözle görülemeyecek kadar küçük ayrıntıların değişimini sağlayıp görülmesine olanak veren optik cihazdır. Gelişen elektronik hem elektronik hem de optiği içerisinde taşıyıp karışık bir sistem olarak gelişimini sürdürüp, başlarda yalnızca merceklerle oluşturulan işlemlerdir. Bu şekilde fazlaca büyütme miktarı ve numune üstünde işlemi gerçekleştirmek gibi rahatlamalar meydana gelmiştir (Pınarcı, 2022). Yükselen teknolojiyle ilk 1965 yıllarında faydalanılan taramalı elektron mikroskobu zamanla verimliliğini artırmıştır (Özdemir, 2020).

Elektron mikroskobunun çalışma prensibi, yüksek voltaj etkisiyle hızlandırılan elektronların ve elektron demetinin numune üstüne odaklanmasıyla taranıp numune ve elektron atomlarının etkileşimiyle algılayıcı sensörlerle biriktirmesiyle sinyal kuvvetlendiricilere göndermektir. Sonrasında dijital sinyallere ya da katot ışınları tüpü ekranına dönüştürerek monitöre erişmesidir. SEM cihazının kullanıldığı alanlar ayırım gücü, odak derinliği ve görüntü analizi büyüklükleri sebebiyle her geçen gün fazlalaşmaktadır (Pınarcı, 2022).

Elektron mikroskopları üç ana kısım olan optik kolon, numune yerleşimi için yuva ve görüntüleme sisteminden meydana gelmektedir. Optik kolon kısmında elektron tabancası elektron demeti yollamaktadır. İncelemesi gerçekleşecek örneğe elektronların gönderilmesinin hızlanması için anot plakası vardır. Yoğunlaştırıcı mercekler elektron demetinin meydana geldiği incelik için, gerçekleşecek odaklama davranışıyla objektif merceği, farklı çaplarda bu merceğe ait apatürler, numunenin yüzeyini elektron demetinin tarayabilmesi amacıyla bobinler yer almaktadır. Bu kısımda mercek sistemi, manyetik alanla incelen elektron demeti ya da odaklama davranışı işlemleri gerçekleştirir. Ortalama olarak optik kolon ve numune sıkıştırımda 10^{-4} Pa değerinde olmaktadır. Benzer zamanda görüntü ekranıyla elektron demetini tarayan manyetik bobinler görüntü sisteminde bulunmaktadır (Özdemir, 2020).

3. MATERİYAL VE METOT

Bu kısımda; deneylerde kullanılan malzemeler, özellikleri ve yapılan deneylerin yöntem ve aşamaları hakkında bilgiler yer almaktadır.

3.1. MATERİYAL

Bu çalışmada, bağlayıcı olarak Eskişehir ÇİMSA çimento fabrikasında üretilen CEM I 42,5 R tipi Portland çimento (PÇ) kullanılmıştır. Bolu Çimento Fabrikasından temin edilen yüksek fırın cürufu (YFC), Fibrobeton A.Ş'den sağlanan kalsine kaolin ve EP mineral markaya sahip diatomit katkılı çimentoların üretimi için kullanılmıştır. Çimento harç numunelerinin hazırlanmasında TS EN 196-1'e (TS EN 196-1, 2016) uygun standart kum ve Eskişehir ili şehir şebeke suyundan yararlanılmıştır.

3.2. METOT

Bu kısımda hammaddelerin ve numunelerin hazırlanmasına, hammaddelere uygulanan analizlere, deneysel çalışmaların yöntemlerine, çimento hamur ve harçların hazırlanmasına ilişkin bilgiler verilmektedir.

3.2.1. Hammaddelerin Ve Numunelerin Hazırlanması

Deney ve analizlerde kullanılmak üzere %0 (referans), %10 oranlarında yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolin ikameli dört farklı çimento tipi hazırlanmıştır. Belirtilen %10 oranı, basınç dayanımından çok fazla taviz verilmeyecek ve klinker miktarını da makul düzeyde azaltacak olmasından dolayı tercih edilmiştir. Hazırlanan çimentolar R, 10YFC, 10KK, 10D şeklinde kodlanmıştır.

Çimento hamurlarının priz süreleri, su ihtiyaçları ve genleşme değerlerini tespit etmek için belirlenen su miktarı karıştırma kabına koyularak çimento eklenerek belirlenmiştir. Karıştırıcı ilk olarak 90 saniye düşük hızda çalıştırılmış ve 90 saniye sonunda durdurulmuştur. Numune 15 saniye dinlendirilmiş, karıştırma kabının dibine ve kenarlarına yapışan hamur plastik kazıyıcı ile sıyrılıp karışımla bir araya getirilmiştir.

Dinlendiği 15 saniye sonunda hamur, karıştırıcı tarafından hızı düşük şekilde 90 saniye daha çalıştırılıp toplamda 180 saniye karıştırma işlemi sonlandırılarak çimento hamuru hazır hale getirilmiştir.

XRD, FT-IR, DSC/TGA ve SEM/EDS ile tayini için çalışmada kullanılacak referans, yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolin ikameli çimento karışımlarının ayrı ayrı ağırlıkları 10'ar g tartılarak ve fabrikada gerçekleşen deneylerle s/ç oranı aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Çimento hamurlarının hidrasyon reaksiyonlarının XRD, FT-IR ve DSC/TGA analizleriyle, 28 gün sonunda numuneler agat havan kullanılarak toz haline getirilerek tespit edilmiştir. Hazırlanan çimento hamurları SEM ve EDS analizi ise kırılmış ve kırılan yüzey üzerinden görüntüler ile belirlenmiştir.

Çimento harçlarının hazırlanması için kullanılan karışım oranları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Harç numunelerinin kodları ve miktarları.

Kod	Çimento miktarı, g	YFC miktarı, g	Kalsine kaolin miktarı, g	Diatomit miktarı, g	Su miktarı, g	Su/çimento	Standart kum miktarı, g
R	450	0	0	0	225	0,50	1350
10YFC	405	45	0	0	225	0,50	
10KK	405	0	45	0	225	0,50	
10D	405	0	0	45	239	0,53	

Çimento harç karışımları TS EN 196-1'e uygun olarak hazırlanıp, 40x40x160 mm boyutlarında üç gözlü kalıplara dökülmüştür (TS EN 196-1, 2016). Karıştırma yapılacak yere malzemeler koyulmadan önce kalıplar temizlenip, karıştırıcı kullanılır hale getirilmiştir. Belirlenen miktarlardaki su ve çimento kaba konularak karıştırıcı düşük hızda 140 dev/dk çalıştırılmış ve yaklaşık 30 saniye sonunda 1350 g kum 30 saniye içerisinde ilave edilmiştir. Kumun eklenmesiyle karıştırıcının 285 dev/dk'ya hızı arttırılmış ve 30 saniye süre ile karıştırmaya devam edilmiştir. Tamamladığı 180 saniyelik süre sonunda karıştırıcı durdurulmuştur. Kabin dibine ve kenarına yapışan harçlar sıyrıcı yardımıyla toplanıp kaba karıştırılmıştır. Karıştırma işlemine 60 saniye daha yüksek hızda karıştırıcı ile devam edip durdurulmuştur. Hazırlanan harç iki tabaka halinde kalıplara yerleştirilmiş ve ilk tabaka yerleştirildikten sonra sarsma tablasına kalıbın sabitlenmesiyle 60 defa sarsma işlemi gerçekleştirilmiştir. İkinci tabakaya da aynı şekilde sarsma yapılarak sıkıştırılmıştır. Kalıptan çıkan fazlalık harçlar masterla enine testere yöntemi ile temiz hale getirilmiştir. Kür dolabına %90 nem oranı ve 20±1 °C sıcaklığında

kalıplar yerleştirilmiştir. Numuneler 24 saat kür dolabında bekletildikten sonra çıkarılarak sıcaklığı 20 ± 1 °C olan kür havuzuna yerleştirilmiştir.

3.2.2. Deneyisel Çalışmalar

Bu kısımda çalışmada yapılan deneylerin yapılış işlemleri verilmektedir.

3.2.2.1. Standart Kıvam Tayini

Numunelerin standart kıvam tayini TS EN 196-3 standardına uygun olarak Eskişehir ÇİMSA çimento fabrikasında gerçekleştirilmiştir. Serbest bırakılan vicat aleti sondasının çimento hamuru içerisinde 30 saniyelik periyotta tabanda bulunan cam levhayla arasında 6 ± 2 mm oluncaya kadar batabilmesini sağlayan kıvam tayinidir (TS EN 196-3, 2017).

Standart kıvam tayini deneyi 20 ± 2 °C sıcaklıkta ve bağıl nemi %65 olan laboratuvar ortamında gerçekleşmiştir. Karıştırma işlemine, 500 g etüv edilmiş numune içerisine çimento ağırlığının %25-%30'u kadar içilebilir su eklenerek başlanmıştır. Bu işleme 90 saniye devam edilmiş ve mikser durdurulup 30 saniye içerisinde kabın kenarları sıyrılarak düşük hızda tekrar çalıştırılmıştır. Çimento ve suyun karıştırıldığı andan itibaren toplam 3 dakika devam edilmiştir. Çimento pastası, sıkıştırma yapmadan önce hafifçe yağlanmış ve cam levha üzerine yerleştirilmiş vicat halkasına yerleştirilir. Kalıp üzerinde taşan çimento hamurlarının fazlalığı spatula yardımıyla alınmıştır. Sondanın ucu cam seviyesine indirilip aletin göstergesi sıfırlanmış, vicat kalıbı ve taban plakası sondanın altında merkezlenecek şekilde sonda yavaşça indirilerek hamur üstüne getirilmiştir. Sonda batırma işlemlerinden sonra temizlenip kurulanmıştır. Kendi ağırlığı ile çimento hamurunun içine giren sonda, cam levhaya 6 ± 2 mm kalana kadar indiği an, normal kıvam değeri olarak kabul edilmiştir. Deney boyunca alet ve ortam sarsıntısız kalmıştır. Sondanın batma işleminin sonlanmasının 5 saniyelik süresi ya da serbest bırakılmasından 30 saniye sonra okuma yapılmış ve elde edilen değer çimentonun kütlesi cinsinden yüzde şeklinde ifade edilmiş çimento pastasının muhtevasını da içererek kaydedilmiştir (TS EN 196-3, 2017).

3.2.2.2. Priz Süresi Tayini

Numunelerin priz başlama ve bitiş sürelerinin tayini Eskişehir ÇİMSA çimento fabrikasında TS EN 196-3 standardına uygun olarak tespit edilmiştir. Vicat aletinin göstergesi sıfırlanarak yağlaması yapılmıştır. Çimento hamuru sıkıştırılma olmadan önce vicat halkasına koyulmuş ve fazla gelen çimento hamuru kalıp üzerinden spatula

yardımıyla alınmıştır. En az 5 mm su altında kalacak şekilde çimento hamuruna su eklenmiş ve priz başlama süresinin tespiti için ölçek okunması, hamura batma işleminin tamamlanmasından ya da serbest şekilde iğne bıraktıktan sonraki 30 saniyede yapılmıştır (TS EN 196-3, 2017).

Batma işlemleri düzenli olacak şekilde iğne batış yapılan yere bir daha batırılmamak kaydıyla ve 10 dakika uygun aralıklarla batırılmıştır. Priz başlama süresi, iğne ve taban plakası arasında okunan değer ile deneyin başlangıcında not edilen süre yaklaşık 6 ± 3 cm olduğu zamana kadar geçen süre 5 dakikaya tamamlanarak elde edilmiştir (TS EN 196-3, 2017).

Priz başlangıç tespitinden sonra her 15 dakikada bir cihaz iğnesi batırılmış ve hamura iğnenin batırıldığı noktalar arasında mesafe en az 10 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Priz sonu, priz başlama süresinin tespit edildiği an ile iğnenin ilk defa hamura 0,5 mm girdiği ana kadar geçen sürenin en yakın 5 dakikaya yuvarlanarak elde edilmiştir (TS EN 196-3, 2017).

3.2.2.3. Tane Boyut Analizi

Referans çimento, yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolin katkılı çimentolar için TS EN 196-6 standardına uygun olarak tane boyut analizi gerçekleştirilmiştir. Hassasiyeti 0,1 g olan dijital terazide ayrı ayrı çimento, yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolin 10 g olacak şekilde ayrılıp tartılmıştır. 2 dakika boyunca 45 μ m ve 90 μ m eleklerden geçirilmiştir (TS EN 196-6, 2020). Elek analizleri Eskişehir ÇİMSA çimento fabrikasında Hosokawa-Alpine Air Jet Sieve 200 LSN model cihazla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan hammaddelerin tane dağılımları, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında Lazer Tane Dağılımı yöntemi ile ölçülmüştür.

3.2.2.4. Özgül Yüzey Tayini

Özgül yüzey tayini TS EN 196-6 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Standartta uygun olarak numune miktarı belirlenerek etüvde kurutulmuştur. Eskişehir ÇİMSA çimento fabrikasında Toni Technik 7202 model cihaz kullanılarak özgül yüzey değerleri belirlenmiştir (TS EN 196-6, 2020).

3.2.2.5. Özgül Ağırlık Tayini

Özgül ağırlık tayini Eskişehir ÇİMSA çimento fabrikasında Quanta Chrome (MVP-1) model cihazla etüvde kurutulmuş numunelerle yapılmıştır.

3.2.2.6. Hacim Genleşme Tayini

Hacim genleşme tayini TS EN 196-3 standardına uygun olarak yapılmıştır. Standart kıvam tayininde kullanılan çimento hamur numunesi bu deneyde de kullanılmıştır. Öncelik olarak La Chatelier kalıbı ve alt plaka yağlanarak dolum sırasında yarık kısmın açılmaması için sabitlemesi yapılmıştır. Numune kalıp içerisine sarsıntı ve sıkıştırma işlemi olmadan oturtulmuş ve üst kısmı spatula yardımıyla düzeltilmiştir. Numunenin üstü yağlanmış plaka ile örtülmüş ve 20 ± 1 °C ve %90 bağıl neme sahip olan rutubet dolabına yerleştirilmiştir. Burada $24 \pm 0,5$ saat bekletilmiş ve uçlar arasındaki mesafe en yakın 0,5 mm'ye yuvarlanarak ölçüm kaydedilmiştir. Sonrasında kaynama noktası sıcaklığına kadar $30 \pm 0,5$ dakika ısıtılarak 3 saat ± 5 dakika ortam sıcaklığında tutulmuştur. Kalıbın soğuması için 20 ± 2 °C sıcaklığa kadar bırakılıp uçlar arasındaki mesafe ölçülerek en yakın 0,5 mm'ye yuvarlanarak kaydetme işlemi yapılmıştır. Hacim genleşmesi değerine erişmek için numunelerin her biri için son yapılan işlemdekinden ilk işlemde elde edilen değer çıkarılarak fark bulunmuş ve en yakın 0,5 mm'ye yuvarlanmıştır (TS EN 196-3, 2017). Hacim genleşme tayini Eskişehir ÇİMSA çimento fabrikasında Astek Marka La Chatelier kalıbı kullanılarak elde edilmiştir.

3.2.2.7. Kimyasal Analizler

Deneylerde kullanılan referans çimento, yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolin katkılı çimentoların TS EN 196-2 standardına uygun olarak kimyasal analizler Eskişehir ÇİMSA çimento fabrikasında ARL marka 9900 model X-Ray spektroskopisi (XRF) cihazla gerçekleştirilmiştir (TS EN 196-2, 2013).

3.2.2.8. Molekül Yapı Analizleri

Molekül yapı analizleri referans çimento, yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolin katkılı çimento numunelerine 28. gün sonunda FT-IR analizi Shimadzu IRPrestige 21 model cihazla yapılmıştır. Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarında ATR cihazı ile $400-4000$ cm^{-1} dalga sayısı aralığında ölçümler tespit edilmiştir.

3.2.2.9. Minerolojik Analizler

Referans çimento, yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolin katkılı çimento numunelerine 28. gün sonunda Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknoloji Merkezinde Malvern PANalytical (EMPYREAN) X-Işını Kırınım cihazı (XRD) ve $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda=1,54$ Å) ışıması, $5-70^\circ$ açı aralığı, $1^\circ/\text{dakika}$ çekim hızı tercih edilerek

gerçekleştirilmiştir.

3.2.2.10. Mikro Yapı Analizleri

Mikro yapıların incelenmesi için referans çimento, yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolin katkılı çimentolar 28. gün sonunda FEI Quanta FEG 250 model basınç ayarı değiştirilebilen SEM cihazı ile Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarında tespit edilmiştir.

3.2.2.11. Termal Analizler

Hem ham hem de hidratasyon sonrası elde edilen çimento hamurlarının termal analizleri eş zamanlı (simultane) olarak gerçekleştirilmiştir. Eş zamanlı termal analizler (DSC “Diferansiyel Taramalı Kalorimetri”, TG “termal gravimetri”), kuru hava koşullarında, 10 °C/dk ısıtma ve 40-1000 °C sıcaklık aralıklarına belirlenmiştir. Bu analizlerde PÇ, YFC, kalsine kaolin ve diatomit için sırasıyla 48,7; 48,0; 48,1 ve 16,7 mg’lık numuneler kullanılmıştır. Hidrate olmuş R, 10YFC, 10KK ve 10D kodlu numuneler için ise sırasıyla 49,0; 49,1; 48,7 ve 48,7 mg’lık numuneler kullanılmıştır. DSC/TGA analizleri, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknoloji Merkezinde SETARAM (labSys evo) cihazı ile yapılmıştır.

3.2.2.12. Eğilme Dayanımı Deneyleri

TS EN 196-1 standardına uygun olarak hazırlanan çimento harç karışımları, 40x40x160 mm boyutlarındaki üç gözlü kalıplara yerleştirilmiştir (TS EN 196-1, 2016). Kalıplar 24 saat nem oranı %90 olan kür dolabında tutulmuştur. Sökülmesi bir gün sonra yapılan kalıplardaki numuneler, su havuzunda 20±1 °C sıcaklığa sahip olarak 2., 7., 28. ve 90. gün hidratasyon günlerine kadar bekletilmiştir. Numuneler havuzdan alınarak her bir süre sonunda kurulanmıştır. Kuvvet olarak 50±10 N/s uygulanarak numune ortadan kırılincaya kadar kuvvet artışı sağlanmıştır. Her bir hidratasyon günü için ortalama olarak üç örnek alınarak eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir.

3.2.2.13. Basınç Dayanımı Deneyleri

Hazırlanmış çimento numuneleri basınç dayanımı deneylerinde TS EN 196-1 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Belirlenen miktardaki içilebilen su kaba konulup, 450 g referans çimento, yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolin katkılı çimento numunelerinin 10 saniye içinde ayrı ayrı eklemesi yapılarak hazırlanmıştır. Düşük devirde karıştırıcı çalıştırılıp 30 saniye sonra 1350 g kum ilave edilip 30 saniye daha

karıştırmaya devam edilmiştir. Karıştırıcın hızı yükseltilerek 30 saniye çalıştırılmış ve 90 saniye karıştırma işlemi durdurularak kabın dibinde ve kenarında kalan malzemeler sıyrılarak kabın içine eklenmiştir. Karıştırma yüksek hızda 60 saniye daha uygulanmıştır. Karıştırma işleminden sonra 40x40x160 mm boyutlarındaki Atom Teknik marka kalıplara harcın yarısı dökülmüş ve Toni Technic marka ve 6135 sarsma tablasına oturtulmuştur. Cihaz dakikada 60 vuruş yaparak işlem sonlandırmış ve kalıpta kalan kısım için harç eklenerek aynı işlem tekrar yapılmıştır. Sarsma tablasından alınan kalıbın yüzeyinde fazla olan harç sıyrılarak düzeltilmiş ve cam plaka ile yüzeyi kapatılmıştır. İşlemleri tamamlanmış numuneler %90 neme sahip Atom Teknik marka 672 model kr dolabında 24 saat tutulmuş sonra kalıptan çıkarılarak sıcaklığı kr suyu 20±1 °C olan kr havuzuna basınç mukavemeti deneyi uygulanacağı 2., 7., 28. ve 90. hidrasyon günlerine kadar bekletilmiştir (TS EN 196-1, 2016).

Numuneler basınç dayanım testi yapılacağı gün Eskişehir ÇİMSA imento fabrikasında Toni Technic marka ve Toni Comp III 1511 model basınç test cihazı ile kuvvet 2400±200 N/s hızda uygulanmış ve arttırılmaya numune kırılıncaya kadar devam edilmiştir. Basınç dayanımı değeri kırıldığı andaki değer olarak kaydedilmiştir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölüm; çalışmada kullanılan hammaddelere uygulanan deneyler, referans ve katkılı çimento hamuru numuneleri ile yapılan deneyler ve basınç deneylerini içeren üç ana kısımdan oluşmaktadır.

4.1. HAMMADDELERE UYGULANAN ANALİZLER

Çalışmada kullanılan hammaddelere fiziksel analizler, kimyasal analizler, XRD, FT-IR, DSC/TGA ve SEM/EDS gibi analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar ilgili kısımlarda yer almıştır.

4.1.1. Fiziksel Analizler

Çalışmada kullanılan hammaddelerin fiziksel özelliklerini belirlemek için Blaine (özellik yüzey alanı), özgül ağırlık ve elek analizi gibi analizlerden elde edilen değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

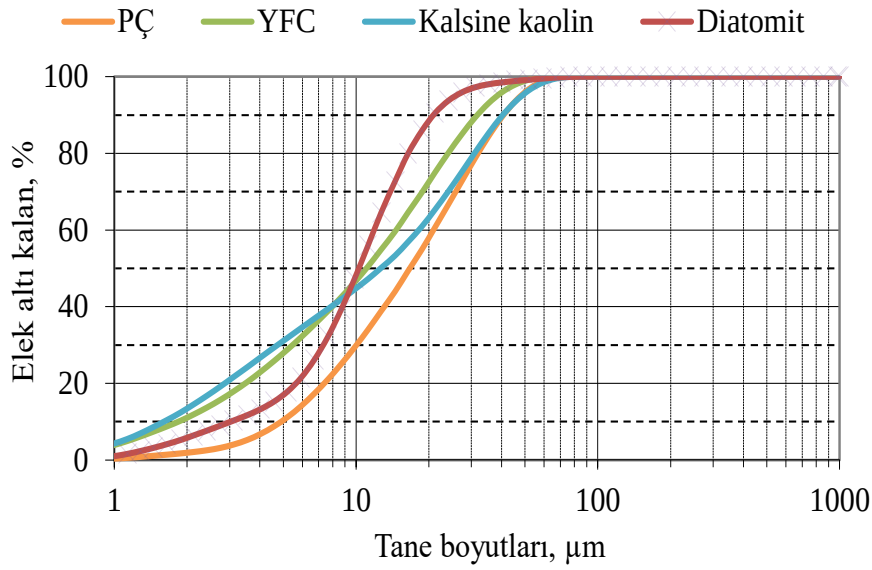
Çizelge 4.1. Hammaddelerin fiziksel özellikleri.

Hammaddeler	Blaine (cm ² /g)	Özellik ağırlık (g/cm ³)	Boyut aralığı (elek üstü)	
			(%)	
			>45 (µm)	>90 (µm)
PÇ	3858	3,12	4,4	0
YFC	4692	2,92	0,2	0
Kalsine kaolin	10254	2,94	1,2	0
Diatomit	9170	2,01	0,2	0

Çizelge 4.1’den elde edilen verilere göre üç puzolanın PÇ’ye göre daha büyük Blaine (özellik yüzey alanı) değerine ve daha küçük tane yapısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Özgül ağırlık değerleri ise referans çimentonun 3,12 g/cm³, YFC’nin 2,92 g/cm³, kalsine kaolinin 2,94 g/cm³ ve diatomitin ise 2,01 g/cm³’dür. Bu verilere göre her üç puzolanik malzemenin de PÇ’ye ikame edilmesiyle elde edilen katkılı çimentoların, daha düşük

özgül ağırlık değerlerine sahip olacağı söylenebilir.

Ayrıca çalışmada kullanılan hammaddelerin tane boyut dağılımı Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Hammaddelerin tane boyut dağılımları.

Elde edilen analiz sonuçlarına göre tüm puzolanik özellikteki malzemelerin, PÇ’ye kıyasla tane boyutu açısından daha ince olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.1). PÇ, YFC, kalsine kaolin ve diatomitin %90 elek altındaki oranlara göre sırasıyla 40, 30, 40 ve 20 µm, %50 elek altındaki oranlara göre 17, 11, 13 ve 10 µm boyutlarda olduğu görülmektedir. Elde edilen veriler, tüm mineral katkı malzemelerinin puzolanik özellik gösterebilmesi için yeterince küçük tane yapısına sahip olduğunu göstermektedir.

4.1.2. Kimyasal Analizler

PÇ, yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolinin kimyasal kompozisyonları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Hammaddelerin kimyasal kompozisyonları.

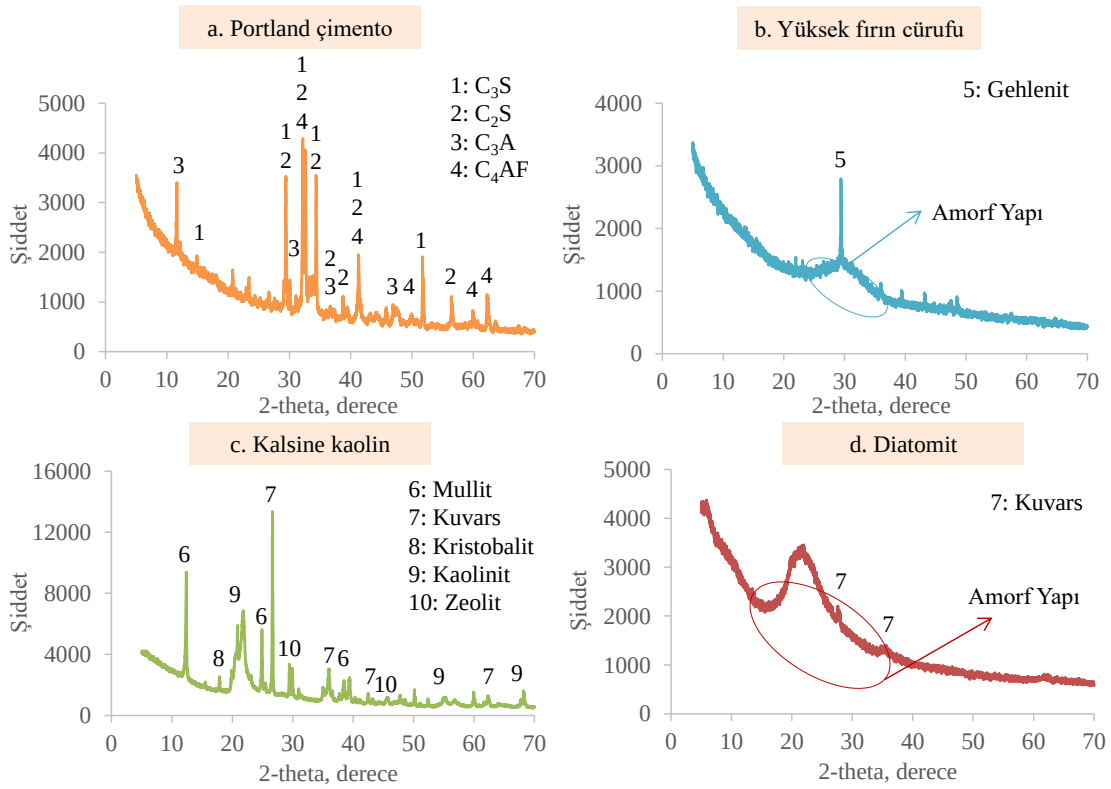
Kimyasal sembolü	Kimyasal kompozisyon	PÇ	YFC	Kalsine kaolin	Diatomit
S	SiO ₂ (S)	19,48	39,36	65,77	84,76
A	Al ₂ O ₃ (A)	4,96	13,13	17,21	2,34
F	Fe ₂ O ₃ (F)	3,27	0,76	0,36	0,97
C	CaO (C)	62,03	31,24	2,91	1,18
M	MgO (M)	1,55	7,53	0,48	0,49
S ⁻	SO ₃	3,20	1,69	0,6	0,017
N	Na ₂ O	0,31	0,02	0,27	0,44
K	K ₂ O	0,71	0,76	0,6	0,18
	S+A+F	-	-	83,34	88,07
	(C+ M)/ S	-	0,99	-	-
	(C+M+A)/ S	-	1,32	-	-
	Cl ⁻	0,0180	0,041	0,048	0,36
	Kızdırma kaybı	2,59	0,10	9,38	9,97
	Çözünmeyen Kalıntı	0,27	-	-	-
	Serbest CaO	1,14	0,73	1,02	0,87

Çizelge 4.2'deki verilere göre; PÇ'nin ana bileşenlerinin SiO₂ ve CaO olduğu, aynı zamanda kimyasal özelliklerinin (MgO, SO₃, Cl⁻, kızdırma kaybı) TS EN 197-1'de verilen sınır değerlerine uygunluk gösterdiği tespit edilmiştir (TS EN 197-1, 2012). YFC ana bileşenleri ağırlıklı olarak SiO₂, CaO ve Al₂O₃'den oluşmaktadır ve ağırlıkça SiO₂/Al₂O₃ (S/A) oranı 3,0'dır. YFC için hidrolik özelliklerinin tespitindeki önemli parametrelerden (C+M)/S değerinin 0,99 ile sınır değerin minimum 1 olmasıyla çok yakın olduğu, başka bir parametre olan (C+M+A)/S oranının 1,32 değerinde ve 1'den büyük olması, istenen hidrolik modül değerine YFC'nin sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca PÇ de olduğu gibi YFC'nin de kimyasal yapısındaki MgO, SO₃, Cl⁻, kızdırma kaybı gibi değerlerin, BS 6699 standardında belirtilen sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Bu nedenle de dayanım ve dayanıklılık açısından değerlendirildiğinde olumsuz bir etki etmeyeceği belirtilebilir (Çizelge 4.2) (Tokyay ve Erdoğan, 2011). Kalsine kaolinin kimyasal bileşenlerine bakıldığında yüksek oranda SiO₂ ve Al₂O₃ değerlerine sahip olduğu, Fe₂O₃, CaO, MgO ve SO₃ değerlerinin ise düşük olduğu görülmektedir. Diatomitin ana bileşeninde ise SiO₂ oranının %84,76 ile yüksek değerde olduğu söylenebilir. Kalsine kaolinin değer olarak kıyaslama yapıldığında K₂O değerinin Na₂O'den daha fazla olması, K⁺ iyonlarının biraz daha zengin olduğu; diatomitin ise Na₂O değerinin, K₂O değerine göre daha fazla olması ise Na⁺ iyonlarınca biraz daha zengin olduğu şeklinde belirtilebilir. Ayrıca kimyasal bileşime göre S+A+F'nin kalsine

kaolin için %83,34, diatomit için ise %88,07 olması doğal puzolanlar için belirtilen sınır değerlerinin %70'i aştığı ve puzolanik açıdan istenilen özelliklerde oldukları tespit edilmektedir (Çizelge 4.2) (TS 25, 2015).

4.1.3. Minerolojik Analizler

PÇ, yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolinin mineralojik yapıları XRD analizleriyle belirlenmiş ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



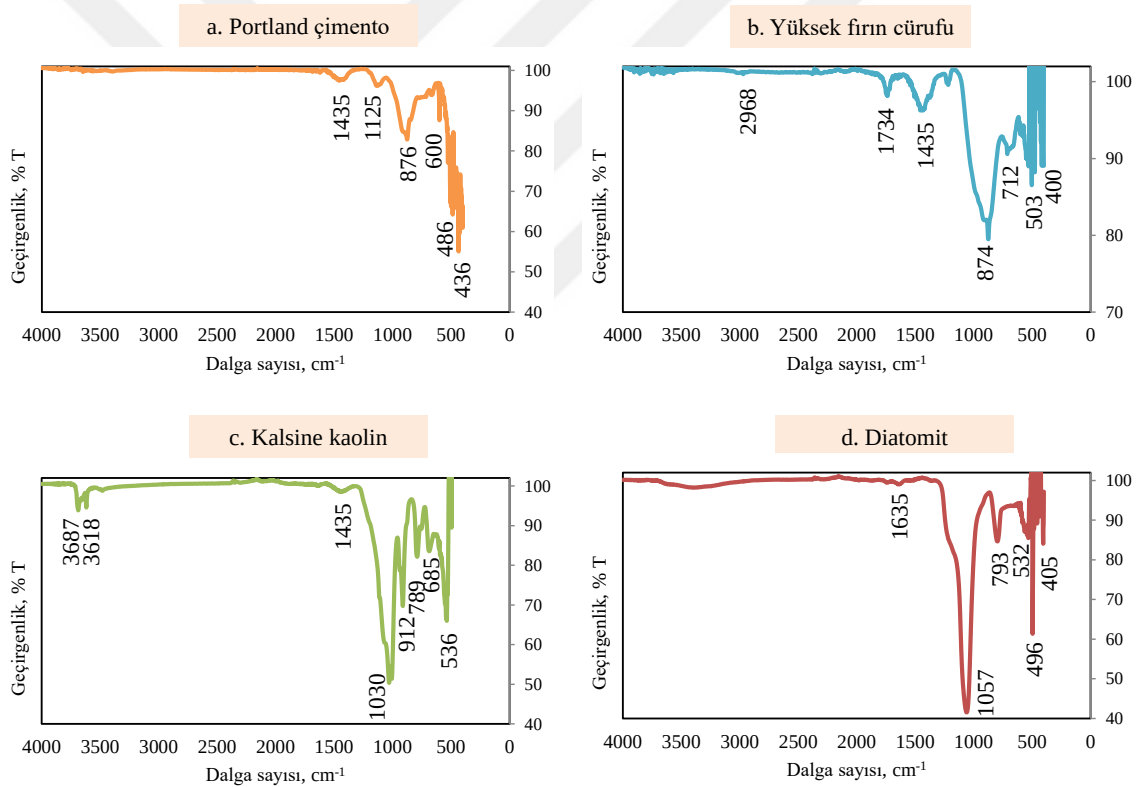
Şekil 4.2. Hammaddelerin XRD analizleri.

PÇ'nin XRD analizinde ana bileşenlerini C₃S (3CaOSiO₃), C₂S (2CaOSiO₃), C₃A (3CaO. Al₂O₃) ve C₄AF (4CaO. Al₂O₃ 3.Fe₂O₃) oluşturmaktadır. XRD desenlerinin, tipik bir PÇ'de olması gerektiği gibi kristallenmiş bir yapıda olduğu görülmektedir (Şekil 4.2a) (Choi ve Park, 2019; Xuquan vd., 2016). YFC'nin güçlü kırılma piki gehlenitten (Ca₂Al(AlSiO₇)) oluşmaktadır. Bununla birlikte YFC'nin camsı fazı 2θ'nın yaklaşık 20-40 derece aralığında maksimumda olduğu ve SiO₂, Al₂O₃ ve CaO den meydana gelen yoğun bir amorf yapı şeklinde kendini göstermiştir (Şekil 4.2b) (Şahin ve Koçak, 2022; Tokyay ve Erdoğan, 2011). Dolayısı ile, YFC'nin hidrolik özelliklerinin belirlenmesindeki en önemli parametrelerden biri olarak camsı fazın düşünülmesiyle,

camsı faz miktarı ve dayanım arasında yaklaşık olarak doğrusal bir ilişkinin olabileceği söylenebilir (Choi ve Park, 2019). Kalsine kaolinin XRD analizine göre; kuvars (SiO_2) ve mullitin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) güçlü kırılma pikleri ile kristobalit (SiO_2), kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), zeolit $((\text{M}^+, \text{M}^{+2})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ fazlarının küçük kırılma pikleriyle oluştuğu gözükmemektedir (Şekil 4.2c) (Sarde vd., 2022). Diatomitin XRD analizinde ise $2\theta=16-34^\circ$ arasında geniş yansıma amorf kuvarsın (camsı form), $2\theta=27.61^\circ$ ve 36.15° 'deki tepe noktalarındaki pikler ise kuvarsın varlığını açıklamaktadır (Şekil 4.2d) (Yao vd., 2018).

4.1.4. Moleküler Yapı Analizi

Hammaddelerin moleküllerin yapısındaki bağların tanımlanması için FT-IR analizleri gerçekleştirilmiş ve meydana gelen bağ yapıları Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Hammaddelerin FT-IR analizleri.

FT-IR analizine göre PÇ, 436, 486, 600, 876, 1125 ve 1435 cm^{-1} dalga sayılarında titreşim piklerine sahiptir (Şekil 4.3a). 436, 486 ve 600 cm^{-1} dalga sayılarındaki Si-O ile birlikte bulunan Al-O bağları titreşim pikleri vermektedir. Si-O bağları 876 cm^{-1} dalga sayısında titreşim piki izlenmektedir. PÇ'de 1125 cm^{-1} dalga sayısındaki pik alçıyı gösteren S-O bağlarını, 1435 cm^{-1} dalga sayısında görülen titreşim pikleri ise C-O bağlarını göstermektedir. Çok küçük olarak görüntülenen 3400-3600 cm^{-1} dalga sayıları arasındaki

pikler, su moleküllerinin bulunduğunu belirtmektedir (Şekil 4.3a) (De Oliveira vd., 2023; Şahin ve Koçak, 2022).

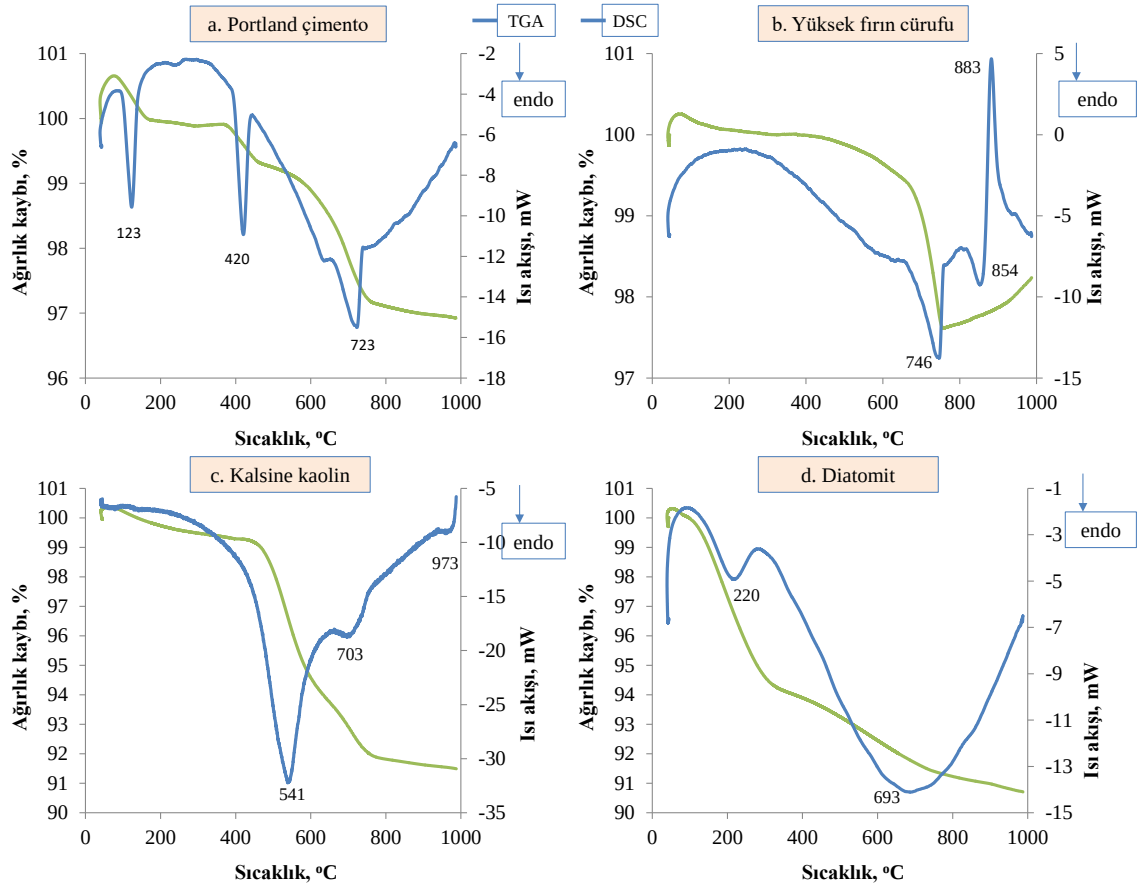
YFC'ye uygulanan FT-IR analizine göre 400, 503, 712, 874, 1217, 1435, 1734 ve 2968 cm^{-1} dalga sayılarındaki piklerden oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.3b). Si-O bağları 400 ve 503 cm^{-1} dalga sayılarındaki piklerde, Si-O ile birlikte bulunan Al-O bağlarına 712 cm^{-1} dalga sayısındaki titreşim pikinde izlenmektedir. 874 cm^{-1} 'deki pikte, YFC'nin AlO_4 gruplarının asimetrik gerilme titreşimine rastlanmaktadır. 1435 cm^{-1} dalga sayısında titreşim piki CO_3^{2-} molekülünün C-O asimetrik gerilme titreşimine atfedilen bu pikin, atmosfere maruz kalan cürufun karbonatlaşmasından kaynaklandığı zannedilmektedir. 1734 cm^{-1} dalga sayısındaki pik, cüruftaki su moleküllerinin O-H bağına atfedilmektedir. YFC bünyesinde yer alan kalsitteki karbon harmoniklerine, 2968 cm^{-1} dalga sayısındaki küçük pik bağlanmaktadır (Şekil 4.3b) (Adeniyi ve Ogundiran, 2020; Şahin ve Koçak, 2022). PÇ gibi YFC'nde su moleküllerinin varlığındaki 3400-3600 cm^{-1} dalga sayıları aralığında yine belirgin bir pik vermediği görülmektedir.

Kalsine kaolinin FT-IR analizine bakıldığında 536, 685, 789, 912, 1030, 1435, 3618 ve 3687 cm^{-1} dalga sayılarında titreşim piklerine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.3c). Kaolinin iç hidroksil grubu 3618 cm^{-1} dalga sayısında pikte ve 3687 cm^{-1} dalga sayısında iç yüzey hidroksil gruplarının $\nu(\text{O-H})$ gerilme titreşimlerine ait olarak değerlendirilmiştir. 1030 ve 685 cm^{-1} dalga sayılarındaki pikler Si-O gerilme titreşimlerine, 789 cm^{-1} de bulunan pik ise Al-O gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. 912 cm^{-1} dalga sayısındaki pik Al-OH eğilme titreşimleri olarak meydana gelirken; 536 cm^{-1} dalga sayısındaki pik ise Al-O-Si eğilme titreşimleri şeklinde görülmektedir. Kalsitin varlığı $\sim 1435 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayısındaki bir omuz bölgesi (karbonatın asimetrik gerilmesi) ile onaylanmaktadır (Huang vd., 2018; Salam, 2004).

Şekil 4.3d'de görüldüğü gibi 1635 cm^{-1} 'deki zayıf eğilme titreşim bandı ve 3400 cm^{-1} civarındaki geniş alan diatomitte olan suyun O-H grubuna bağlanabilir. Si-O-Si grubunun gerilme titreşimini 1057 cm^{-1} 'deki yoğun bant gösterir. 793 cm^{-1} 'deki bant, SiO-H grubunun titreşimine aittir. 496 ve 532 cm^{-1} 'deki tepe noktaları Si-O bağlarıyla ilişkilidir (Şekil 4.3d). FT-IR analizi sonucunda belirlenen bu karakteristik pikler diatomitin temel olarak SiO_2 'den oluştuğunu belirtmektedir (Costa vd., 2020; Qian vd., 2015).

4.1.5. Termal Analizler

Hammaddeler için eş zamanlı olarak tek bir numune üzerine uygulanmış DSC/TGA analizleri ile elde edilen veriler Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Hammaddelerin DSC/TGA analizleri.

PÇ'nin eş zamanlı yapılan DSC/TGA analizlerine göre 75-179 °C aralığındaki 123 °C'deki endotermik pik, çimento bünyesindeki nemden ve çimento üretiminde priz düzenleyici olarak kullanılan alçıtaşının ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) bünyesindeki kristal suyunu kaybetmesiyle, bu aralıktaki ağırlık kaybının %0,69 olduğu saptanmıştır. 365-421 °C aralığında 420 °C'deki endotermik pik, C_4AF ürünü olan Fe_2O_3 solüsyonunun oluşumundan kaynaklanmış olup bu aralıkta ağırlık kaybı %0,61 olarak ortaya çıkmıştır. 554-781 °C aralığındaki 723 °C'deki endotermik pik, kalsiyum karbonatın dekarbonasyonuna karşılık gelip bu bölgedeki ağırlık kaybı %1,98 olarak tespit edilmiştir (Gabrovšek vd., 2006; Sha vd., 1999). PÇ'deki toplam ağırlık kaybı ise %3,7 olarak bulunmuştur (Şekil 4.4a).

YFC'nin DSC/TGA analizine göre 653 °C'ye kadar ağırlık kaybı %0,81 değerinde ortaya çıkmıştır. 653-762 °C sıcaklık aralığında ise kütle kaybı %1,83 oranında bulunmuş, DSC

eğrisine göre endotermik tepe noktası 746 °C’de camsı geçiş sıcaklığına atfedilmektedir. YFC’nin kimyasal reaksiyon sonucunda 762 °C’den sonra TGA eğrisinden görüleceği üzere ağırlığında nispeten bir artış meydana gelmiştir. Kristallenme sıcaklığını 883°C’de ekzotermik tepe noktası göstermektedir (Fredericci vd., 2000). YFC’nin nemden dolayı ağırlık kaybı %0,2, depolanma esnasında atmosferdeki havayla reaksiyonu sonucunda karbonat fazlarının ağırlık kaybı ise %1,2 olarak tespit edilmiştir. YFC’nin ağırlık kaybının toplamı ise %1,76 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.4b).

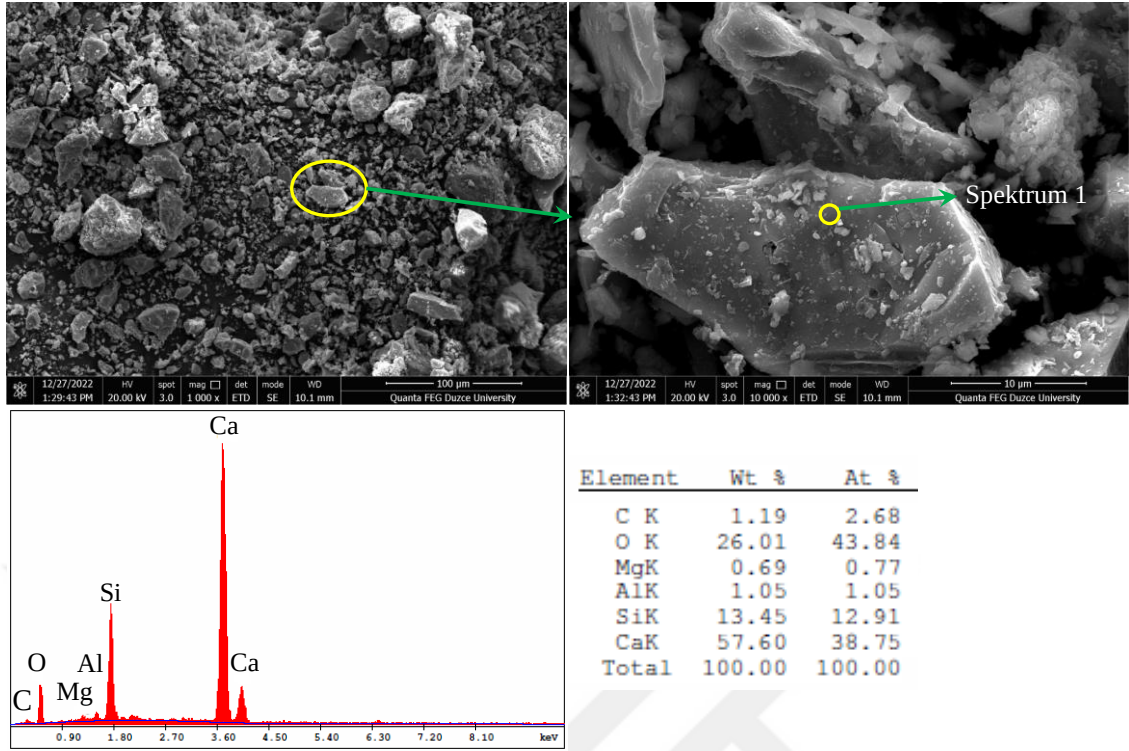
Kalsine kaolinin DSC/TGA eğrilerine göre su kaybı görülmemesinin nedeni bünyesindeki nemden kaynaklıdır. 412-634 °C sıcaklık aralığında kristal yapı içerisindeki kimyasal bağ ile bağlı suyun %5,29 oranında kütle kaybının olması, kristal suyun ve hidroksil gruplarının ayrılmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek reaktiviteye sahip olan metakaolinin oluşumunu 541 °C’deki endotermik pik göstermektedir. Kütle kaybı 634-777 °C sıcaklık aralığında %2,12 oranında, 777-998 °C sıcaklık aralığında ise %0,39 oranında meydana gelmiştir. 973 °C’de görülen pik ise metakaolin yapısının bozulduğu ve AlO₃ ve SiO₂ fazlarının oluştuğu bölge olarak değerlendirilmektedir (Salam, 2004). Kalsine kaolinin 40-1000 °C sıcaklık aralığında %8,51 oranında toplam ağırlık kaybı olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.4c).

DSC/TGA eğrileri incelendiğinde, diatomit farklı sıcaklık aralıklarındaki ağırlık kayıpları bakımından malzemelerin yapısında bulunan fiziksel ve kimyasal bağla bağlı olan suyun dehidratasyonunun en çok görüldüğü malzeme olmuştur. 340 °C’ye kadar boşlukta fiziksel olarak adsorbe edilmiş yüzeydeki su kaybı ile organik maddelerin yanmasıyla meydana gelen ağırlık kaybı olarak değerlendirilmekte olup bu aralıktaki ağırlık kaybının değerinin %5,9 olduğu belirlenmiştir. 340-756 °C aralığındaki ağırlık kaybı ise %2,81 olarak bulunmuştur. Bu aralıktaki metal katyonları ile koordineli yapısal suyun ve diatomitte meydana gelen karbonat minerallerinin ayrışmasından kaynaklanan ağırlık kaybının olduğu düşünülmektedir (Ma vd., 2015). Diatomitin toplam ağırlık kaybı 40-1000 °C sıcaklık aralığında %9,55 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.4d).

4.1.6. Taramalı Elektron Mikroskop Analizi

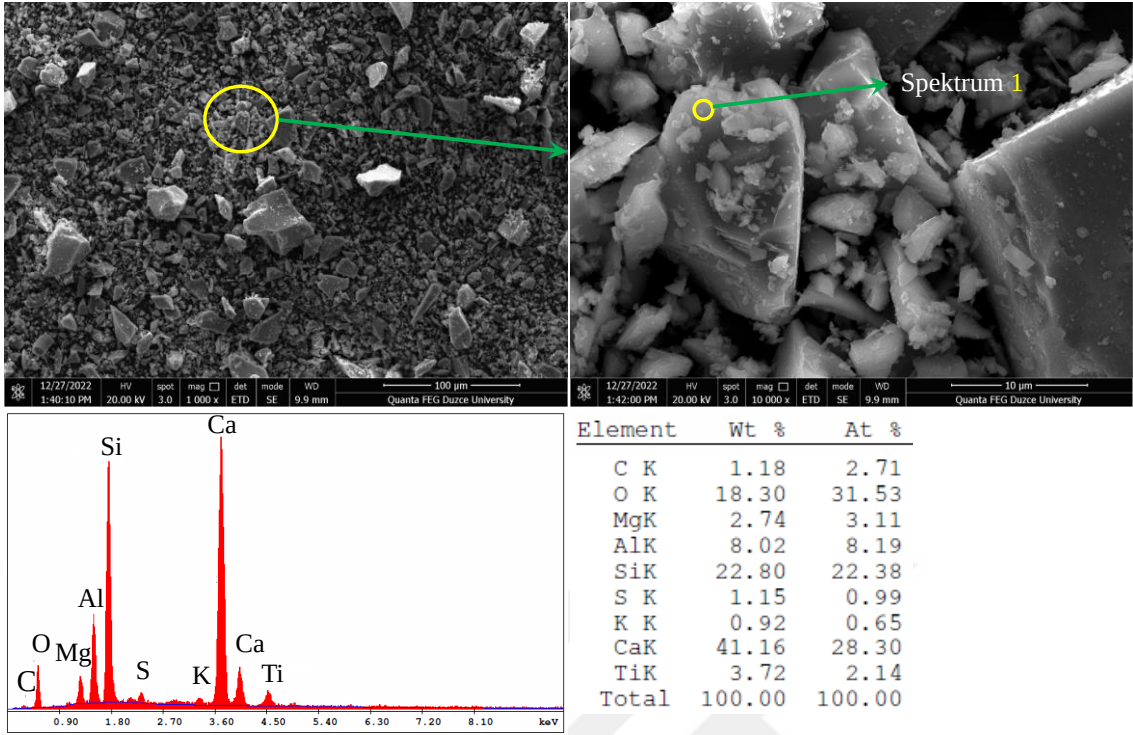
Hammaddelerin mikro yapılarını incelemek için gerçekleştirilen SEM/EDS analizlerinden elde edilen görüntüler Şekil 4.5-4.8 aralığında verilmiştir.

Portland çimento



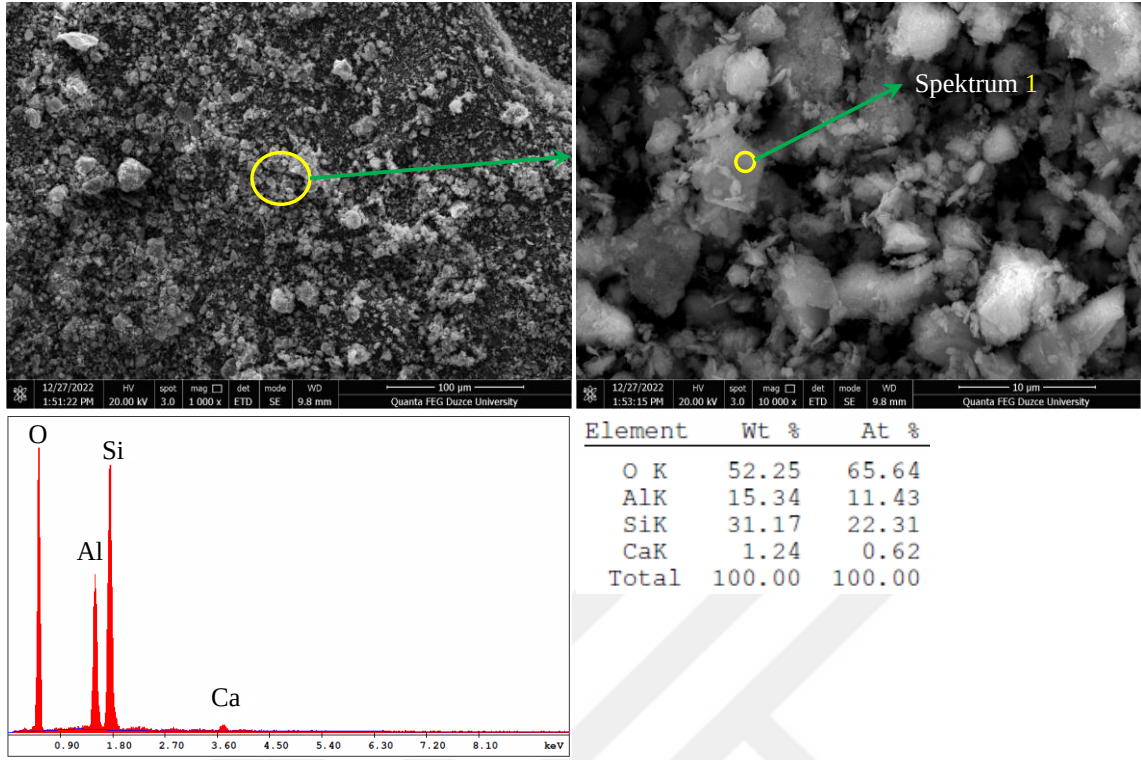
Şekil 4.5. PÇ'nin SEM/EDS analizi.

PÇ'nin SEM analizi sonucunda meydana gelen görüntüsüne bakıldığında farklı boyut ve şekillerde yapı olarak düzensiz olduğu görülmektedir (Şekil 4.5a). X-ışını spektrometresinde (EDS) numunenin ana bileşiminin Ca, Si ve O için karakteristik pikler gösterdiği (Şekil 4.5b), dolayısı ile PÇ'nin ana bileşeninin kimyasal analizinden belirlendiği gibi CaO ve SiO₂ olarak doğrulanmış olmaktadır (Çizelge 4.2).



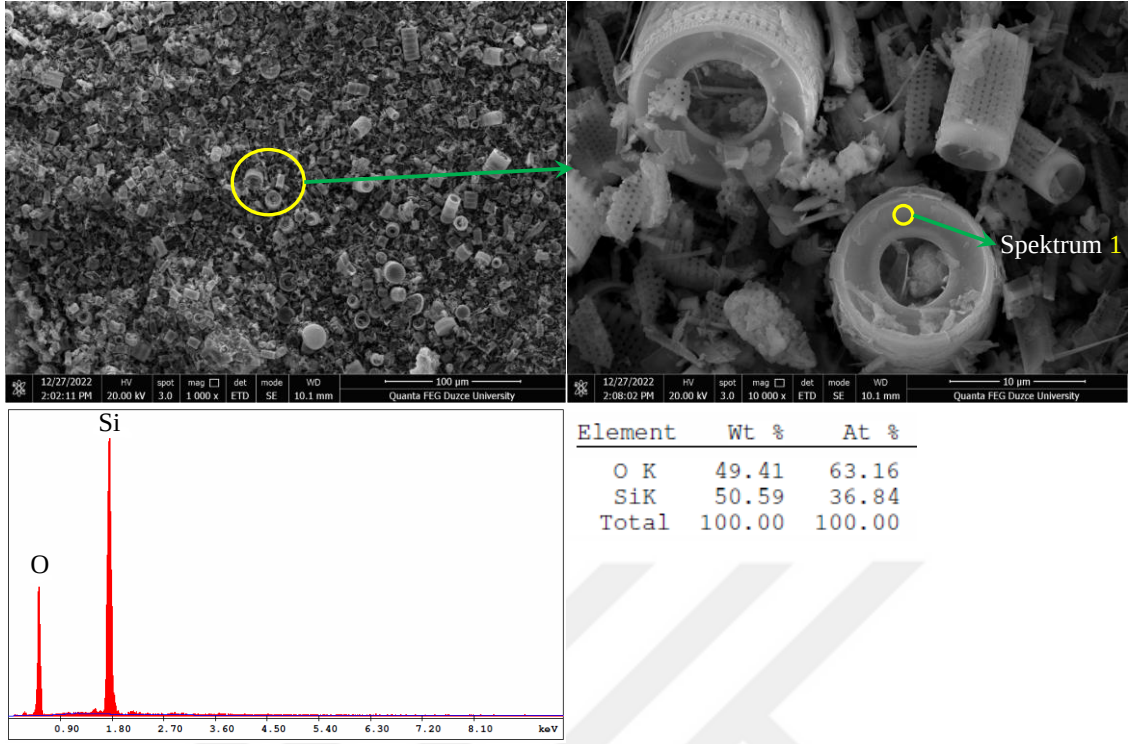
Şekil 4.6. YFC'nin SEM/EDS analizi.

YFC küresel olmayan tane şekillerinin ve esas olarak sürekli bir ağ yapısında olan camsı fazlardan oluştuğu Şekil 4.6'da görülmektedir (Şekil 4.6a). X-ışını spektrometresinde (EDS) numunenin ana bileşiminin Ca, Si, Al ve O için karakteristik pikler verdiği (Şekil 4.6b), bu yüzden YFC'nin kimyasal analizinden tespit edildiği gibi ana bileşeninin CaO, SiO₂ ve Al₂O₃ olarak doğrulandığı görülmektedir (Çizelge 4.2).



Şekil 4.7. Kalsine kaolin'in SEM/EDS analizi.

Kalsine kaolinin SEM görüntüsünde katmanlar arası boşluklara sahip, rastgele boyutlarda altıgen trombosit yapılar da pul pul plakalar halinde bir tane yapısı görülmektedir (Şekil 4.7a). X-ışını spektrometresinde (EDS) numunenin ana bileşiminin Si, Al ve O için karakteristik pikler verdiği (Şekil 4.7b), dolayısıyla kalsine kaolin'in ana bileşeninin kimyasal analizden bilindiği gibi SiO_2 ve Al_2O_3 olarak doğrulandığı görülmektedir (Çizelge 4.2).



Şekil 4.8. Diatomit'in SEM/EDS analizi.

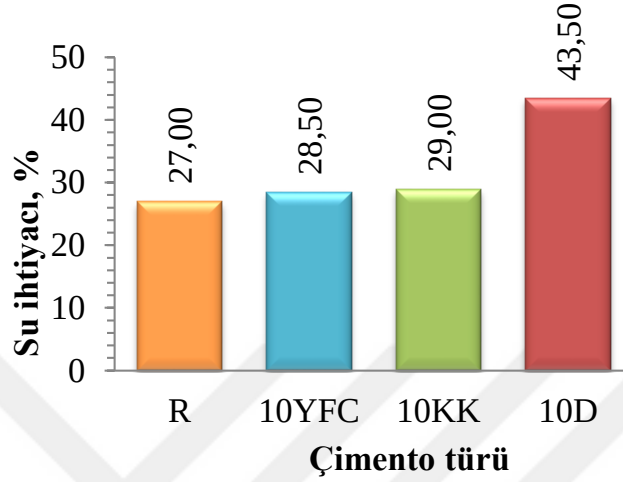
Diatomit, mikroorganizmaları kaplayan inorganik bir kabuk olarak meydana gelmektedir. Şekil 4.8'e göre diatomitin yaklaşık 5 µm çapında içi boş tüpler, halkalar, plakalar, oldukça gözenek sistemine sahip çeşitli şekillerde parçalar ve parçacıklar içerdiği görülmektedir. Ayrıca hasarsız kabuklar ve bu kabukların granülleri de bu görüntülerden izlenmektedir. Diatomitler tüm parçacıklar için ortak olan yaklaşık 0,5 µm çapında küçük açıklıklı mikro/nano-gözeneklere sahip bir bal peteği yapısı ile karakterize edilen birçok merkezli radyal simetriye sahiptir (Şekil 4.8a) (Ma vd., 2015). X-ışını spektrometresinde (EDS) numunenin bileşiminin Si ve O için karakteristik pikler verdiği (Şekil 4.8b), böylece Çizelge 4.2'deki kimyasal analizden saptandığı gibi diatomitin ana bileşeninin SiO₂ olarak doğrulanmış olduğu görülmektedir.

4.2. ÇİMENTO HAMURLARINA UYGULANAN DENEYLER VE ANALİZLER

Bu bölümde TS EN 196-3'e göre çalışmada kullanılan çimento hamuru numunelerine uygulanan su ihtiyacı, priz süreleri, genleşme deneyleriyle ilgili bilgiler verilmiştir (TS EN 196-3, 2017). Çimento hamurlarının hidratasyon gelişimlerini görebilmek için XRD, FT-IR, DSC/TGA ve SEM-EDS analizleri yapılarak ilgili bölümlerde sunulmuştur.

4.2.1. Çimento Hamurlarının Su İhtiyacı Deneyleri

Referans, yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolin ikameli çimento hamurlarına uygulanan su ihtiyacı deneyleri TS EN 196-3'e göre Şekil 4.9'da verilmiştir (TS EN 196-3, 2017).

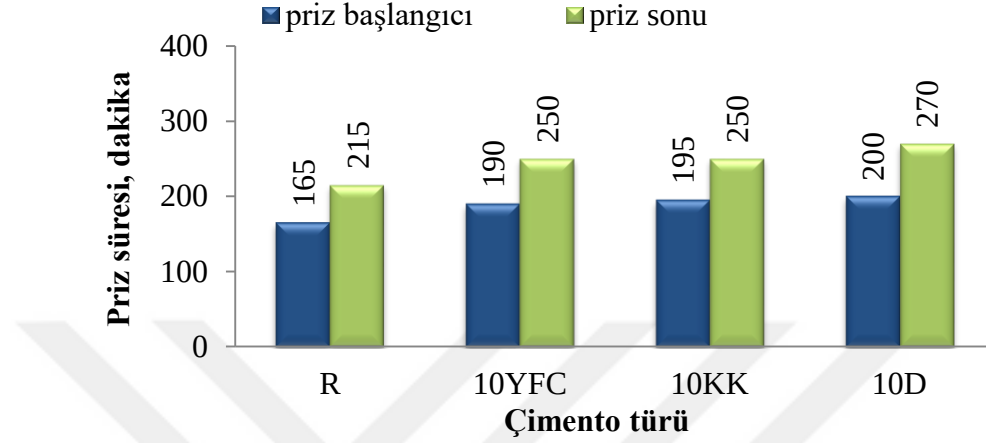


Şekil 4.9. Çimento hamurlarının su ihtiyaçları.

Çimento hamurlarının su ihtiyaç değerleri, her üç puzolanik malzemenin inceliği, fiziksel, kimyasal, mineralojik gibi yapısal özelliklerine göre farklılıklar göstermektedir. R kodlu çimento hamuru ile kıyaslandığında; 10YFC kodlu hamurda %5,6, 10KK kodlu hamurda %7,4 ve 10D kodlu hamurda ise %61,1 oranlarında su ihtiyacında artış izlenmektedir (Şekil 4.9). Her üç puzolanik malzemenin, hem tane yapısının küçük boyutlu olması hem de özgül yüzey alanının büyük olması nispeten su ihtiyacını artırmıştır. Ayrıca diatomit parçacıklarının yaklaşık 0,5 µm çapında küçük açıklıklı mikro/nano-gözeneklere sahip radyal simetriye sahip olmasının (Şekil 4.8a), diğer çimento hamurlarına kıyasla daha fazla suya ihtiyaç duymasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir.

4.2.2. Çimento Hamurlarının Priz Süreleri Deneyleri

Referans, yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolin katkılı çimento hamurlarına uygulanan priz süreleri deneyleri TS EN 196-3'e göre Şekil 4.10'da verilmiştir (TS EN 196-3, 2017).

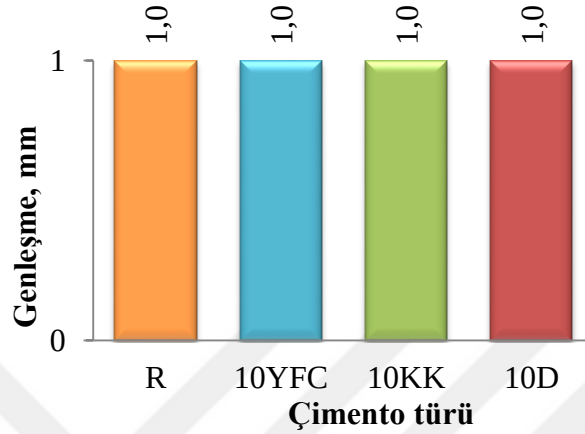


Şekil 4.10. Çimento hamurlarının priz süreleri.

Şekil 4.10'da verilen priz başlama süreleri içerisinde en kısa sürenin 165 dakikayla R kodlu çimento hamurunda, en yüksek sürenin 200 dakikayla 10D kodlu çimento hamurunda olduğu gözlemlenmiştir. Referans çimentoya göre, 10D, 10YFC, 10KK kodlu çimento hamurlarında başlangıç sürelerinde sırasıyla %21,21, %15,15 ve %18,18 oranında artış ortaya çıkmıştır. Priz sonu sürelerine bakıldığında aynı şekilde R numunesi 215 dakika ile en kısa süreyi, 10D kodlu numune ile en yüksek süreyi meydana getirmiştir. Referans çimento hamuruyla karşılaştırıldığında 10D, 10YFC, 10KK kodlu numunelerinde sırasıyla %34,88, %16,28 ve %16,28 oranında artış olmuştur (Şekil 4.10). Priz süreleri değerleri standartlara bakıldığında PÇ 42,5R çimentoları için priz başlangıç sürelerinin 60 dakikadan önce olamayacağı, priz sonu sürelerinin 600 dakikadan fazla olamayacağı gösterilmektedir (TS EN 196-3, 2017). Böylelikle çimento hamur numunelerinde priz süreleri standartta verilen değerler içerisinde olduğu için beton taze iken taşınması, yerleştirilmesi ve sıkıştırılması işlemlerinde problem yaşanmayacağı, kalıp sökmenin sorun olmadan yapılacağı ve betonun dış iklim şartlarından olumsuz etkilenmeyeceği düşünülmektedir.

4.2.3. Çimento Hamurlarının Genleşme Deneyleri

Referans, yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolin katkılı ikameli çimento hamurlarının TS EN 196-3'e göre belirlenen genleşme değerleri Şekil 4.11'de gösterilmiştir (TS EN 196-3, 2017).

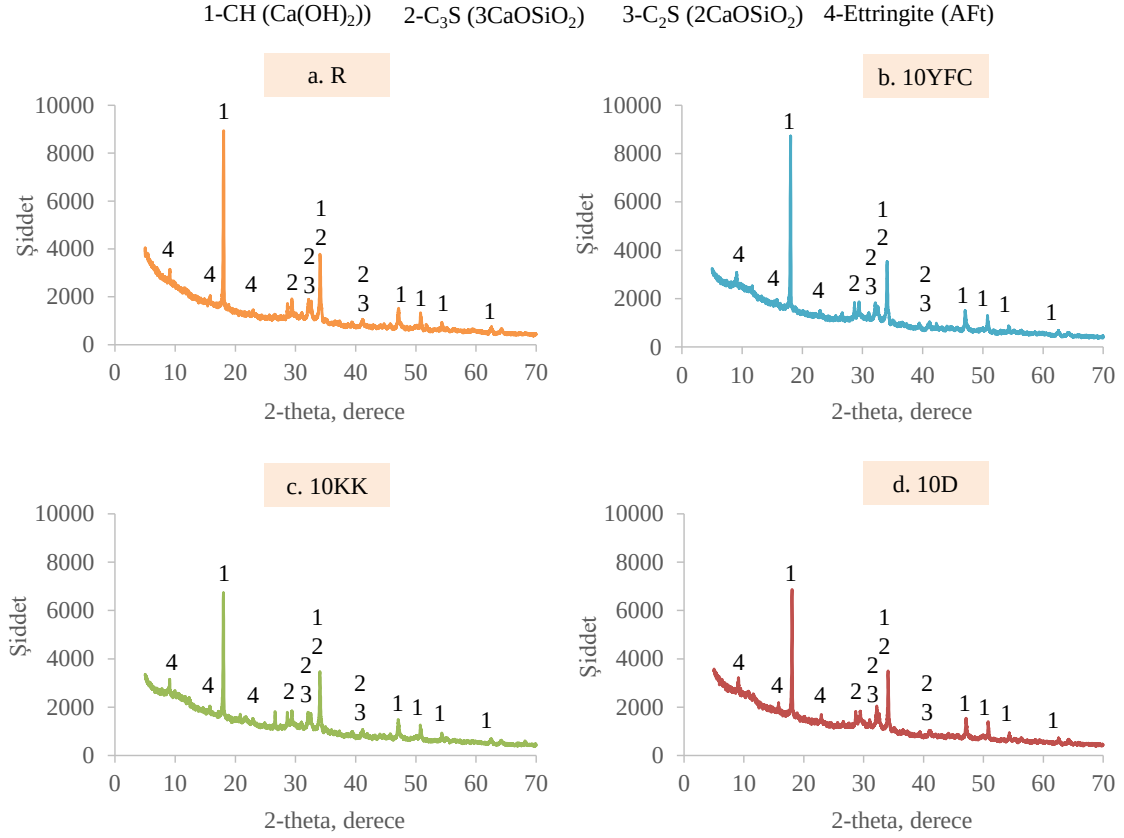


Şekil 4.11. Çimento hamurlarının genleşme değerleri.

Referans, yüksek fırın cürufu, diatomit ve kalsine kaolin katkılı çimento hamurlarının hacim genleşme değerlerini saptamak için Le Chatelier deneyi uygulanmıştır. Genleşme sebeplerinden olan, çimento yapısında fazlaca CaO ve MgO bulunduğunda betonda hasarlar meydana gelmektedir. Yapılan Le Chatelier deneyiyle elde edilen verilere göre genleşme değerleri referans ve tüm katkılı çimento hamur numunelerinde 1 mm olarak saptanmıştır. Standartlarda belirlenen değer olan 10 mm'nin altında olduğundan genleşme ile ilgili sorun yaşanmayacağı kabul edilmiştir (Şekil 4.11) (TS EN 196-3, 2017).

4.2.4. Çimento Hamurlarının XRD Analizleri

Çimento hamurlarının faz gelişimlerini incelemek için yapılan XRD analiz sonuçları Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

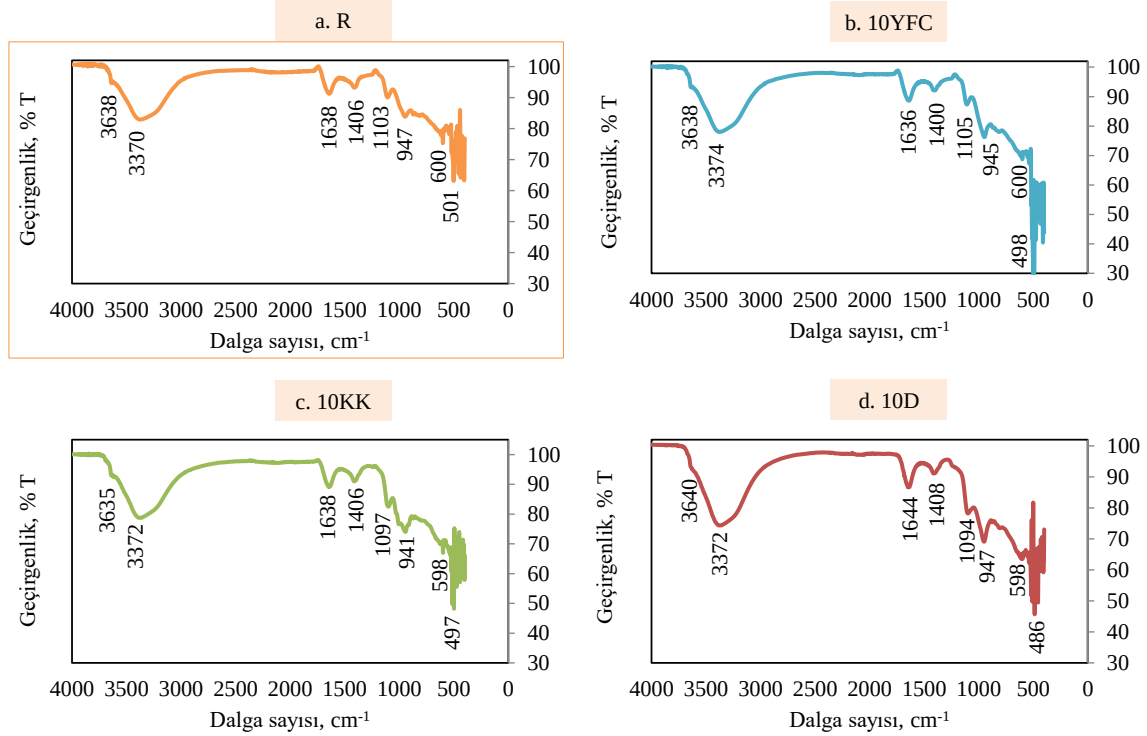


Şekil 4.12. Çimento hamurlarının XRD analizleri.

Şekil 4.12'de verilen tüm çimento hamurlarının esas olarak kristalize hidratasyon ürünleri olan portlandit (CH), C_3S , C_2S ve etrenjit (AFt)'ten oluştuğu görülmektedir. C-S-H jeli'nin amorf yapısı nedeniyle kırınım bantları XRD spektrumlarında net olarak izlenemez (Lei vd., 2016; Younes vd., 2018). Portlandit R, 10YFC, 10KK ve 10D kodlu çimento hamurları için ana hidratasyon ürünüdür ve iyi kristalleşmiş yapısıyla açıkça tanımlanmaktadır. Buna göre tüm puzolan ikameli çimentoların 28. hidratasyon gününde referans çimentoya nazaran CH içeriğinin nispeten azaldığı görülmektedir. Bu pik şiddetlerindeki azalma 10KK ve 10D kodlu çimento hamurunda daha net olarak görülmektedir. Bu durum; YFC, kalsine kaolin ve diatomit ikameli çimentoların daha sonraki yaşlarda PÇ'den daha fazla CH tükettiğini, dolayısı ile puzolanik özelliğinden dolayı portlandit ile reaksiyona girdiğini ve çimento benzeri hidratlı ürünlerin oluşumuna katkı sağlayan puzolanik malzemeler olduklarını göstermektedir. Bu nedenle ileri yaşlarda bu puzolanik malzemelerin daha fazla C-S-H ve daha az CH miktarı ortaya çıkarak çimento harçlarının dayanım ve dayanıklılık özelliklerine katkıda bulunabileceğini göstermektedir (Pınarcı ve Kocak, 2022; Schöler vd., 2015; Zhao vd., 2021).

4.2.5. Çimento Hamurlarının FT-IR Analizleri

Çimento hamurlarının kafes ve molekül yapılarına ait FT-IR grafikleri Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



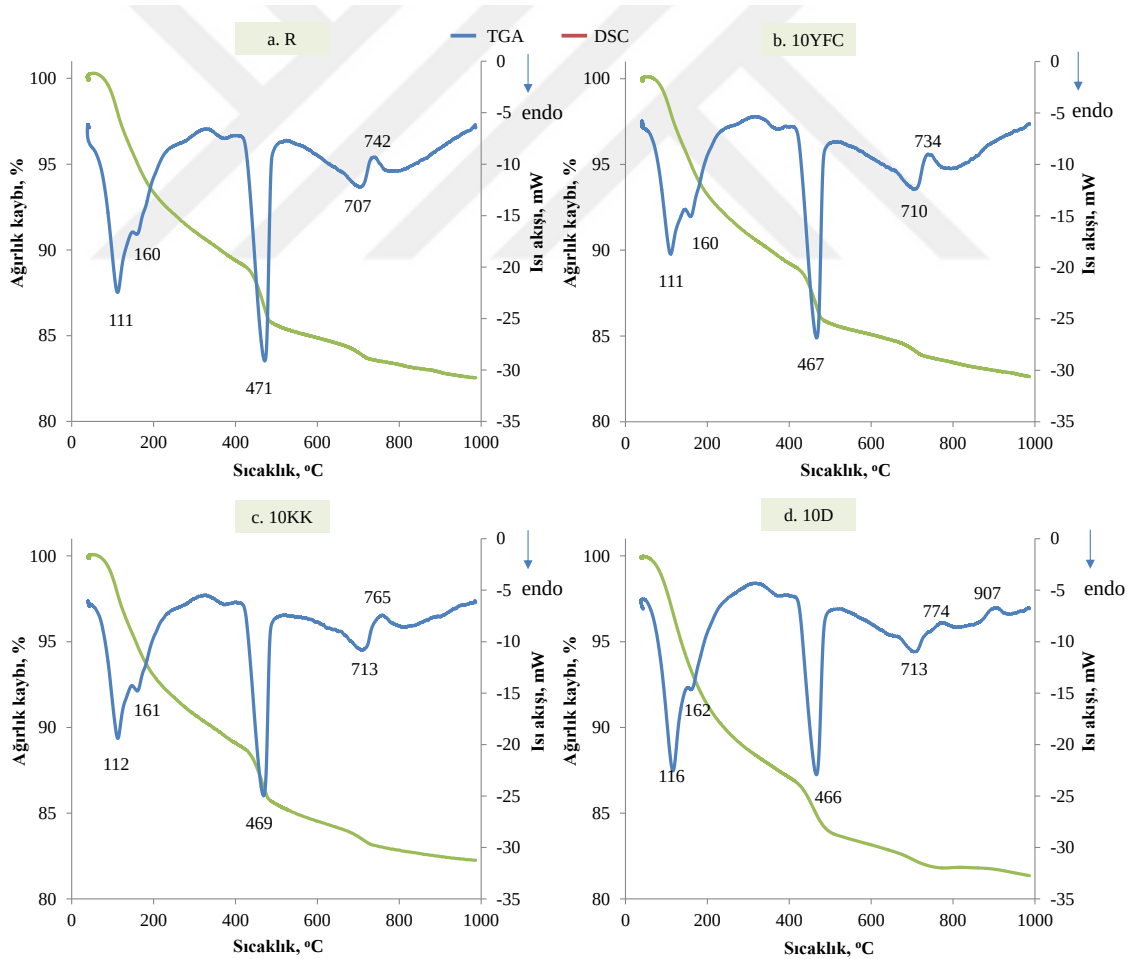
Şekil 4.13. Çimento hamurlarının FT-IR analizleri.

XRD-ışını kırınım yönteminde belirtildiği gibi çimento hamurlarının ana hidrasyon ürünü amorf yapıdaki C-S-H'dir. Bu nedenle XRD analizlerinde net olarak belirlenemeyen C-S-H oluşumunu izlemek ve diğer hidrasyon ürünlerini ve bunların nispi miktarını belirlemek için FTIR analizleri kullanılmaktadır. Şekil 0.13'ten izlenen değerler dikkate alındığında 486-501 cm⁻¹ aralığında henüz hidrasyona uğramamış CS'ler, 941-947 cm⁻¹ bölgesinde ise hidrate olmuş CS'ler varlığına rastlanmaktadır. Çimento hamurlarına ait sülfat fazları 1094-1105 cm⁻¹ aralığındaki bölgede yer alırken, portlanditin karbonasyonu nedeniyle oluşan karbonat fazları (CO₃⁻²) 1400-1408 cm⁻¹ aralığındaki bölgede yer almaktadır. Çimento hamurlarının yapısındaki moleküler su 1636-1644 cm⁻¹ aralığındaki bölgede izlenirken, C-S-H jellerinin yapısında bulunan su 3370-3374 cm⁻¹ aralığındaki bölgede, CH kristallerindeki su ise 3635-3640 cm⁻¹ aralığındaki bölgede görülmektedir. Bu bağlamda 10YFC, 10KK ve 10D kodlu çimento hamurlarının FT-IR analiz sonuçları bir bütün olarak değerlendirildiğinde, sırasıyla 945, 941 ve 947 cm⁻¹ dalga sayısındaki pik şiddetlerinin, 947 cm⁻¹ dalga sayısındaki pik şiddetine sahip R kodlu referans çimento hamuruna nispetle göreceli olarak yükseldiği ve

dolayısı ile daha fazla C-S-H oluşumunun gerçekleştiği ifade edilebilir. Ayrıca 10YFC, 10KK ve 10D kodlu çimento hamurlarının sırasıyla 498, 497 ve 486 cm^{-1} dalga sayısındaki pik şiddetlerinin, yine R kodlu referans çimento hamurundaki 501 cm^{-1} dalga sayısındaki pik şiddetine göre göreceli olarak yükselmesi hidrate olmayan CS'lerin ileriki yaşlarda hidrate olarak daha fazla C-S-H oluşumuna katkı sağlayarak çimento harçlarının dayanım ve dayanıklılık özelliklerine katkı sağlayacağını göstermektedir (Chen vd., 2018; Lei vd., 2016; Mollah vd., 2000; Pıncarcı ve Kocak, 2022; Richard vd., 2006; Saraya, 2014). Elde edilen verilere göre FT-IR sonuçlarıyla XRD sonuçlarının birbirleriyle uyumlu bulgular sağladığı ifade edilebilir.

4.2.6. Çimento Hamurlarının DSC/TGA Analizleri

Çimento hamurlarındaki meydana gelen faz gelişimlerini görebilmek için gerçekleştirilen DSC/TGA analiz sonuçları Şekil 4.14'te verilmiştir.

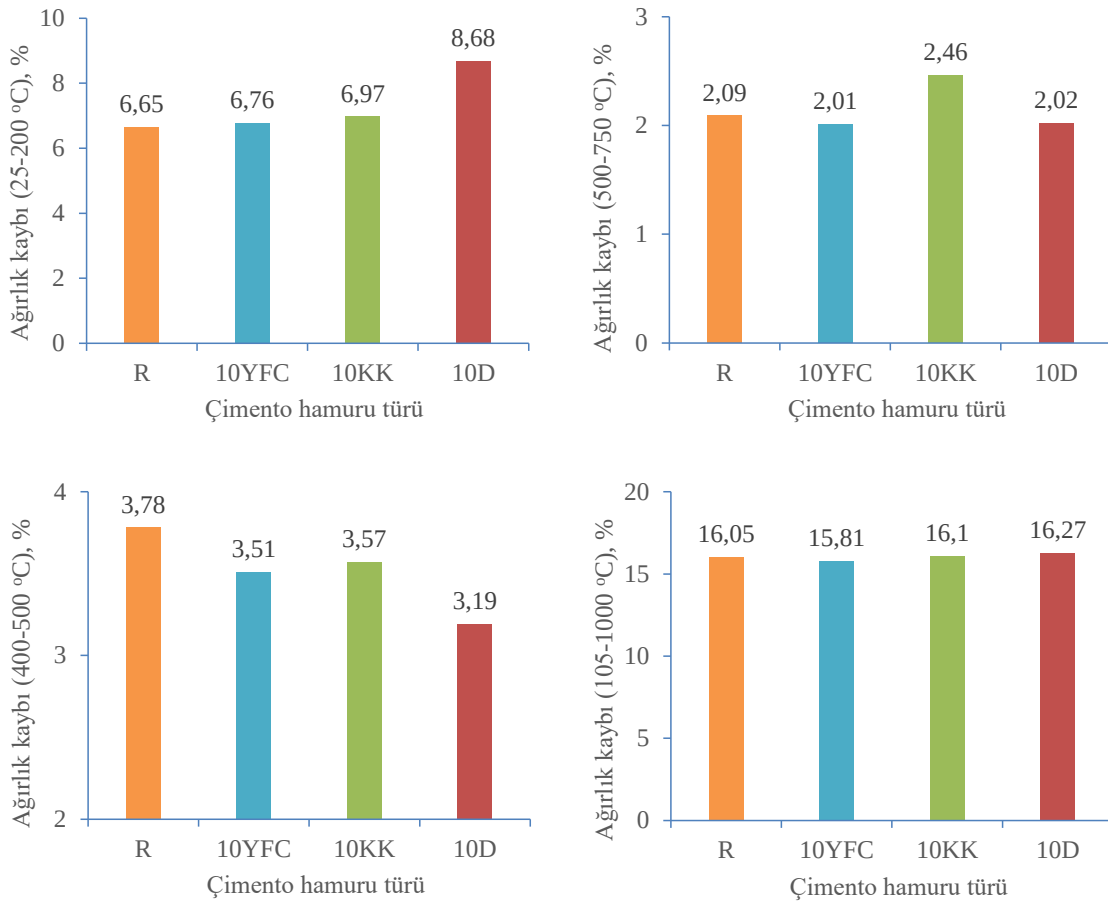


Şekil 4.14. Çimento hamurlarının DSC/TGA analizi.

Çimento hamurlarına uygulanan termal analizlerden elde edilen sıcaklık değerlerine göre;

- 25-200 °C: yapısal ve kristal su, C-S-H ve etrenjit (AFt) fazlarını,
- 400-500 °C: Portlandit'in ayrışmasını,
- 500-750 °C: CaCO_3 'ün ayrışmasını,
- 105-1000 °C: C-S-H, portlandit ve diğer hidratlı ürünlerin (kimyasal olarak bağlanmış su veya buharlaşmayan su içeriği) dehidrasyonu ve ayrışmasını göstermektedir (Bhattacharya ve Harish, 2018; Pınarcı ve Kocak, 2022; Zhang vd., 2018).

Bu bağlamda Şekil 4.14'teki verilerden hesaplanmış olan ağırlık kayıpları Şekil 4.15'te verilmiştir.

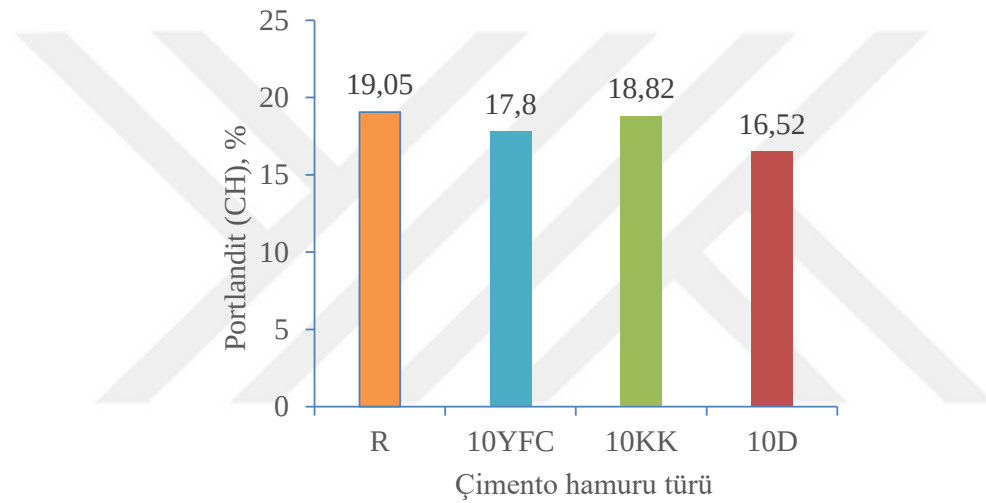


Şekil 4.15. Çimento hamurlarına ait farklı sıcaklıklardaki ağırlık kayıpları.

Çimento hamurundaki hidratasyon reaksiyonları sonucunda oluşan portlanditin (CH) toplam miktarı Denklem 4.1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$CH(\%)=x_1 * \frac{74}{18} + x_2 * \frac{74}{44} \quad (0.1)$$

Burada yer alan x_1 ve x_2 , sırasıyla portlanditin ve $CaCO_3$ 'ün ağırlık kayıplarını ifade etmektedir. Denklemde yer alan 18, 44 ve 74 değerleri ise sırasıyla H_2O , CO_2 ve CH'nin molekül ağırlıklarıdır (Bhattacharya ve Harish, 2018; Pınarcı ve Kocak, 2022; Zhang vd., 2018). Denklem 4.1'den hesaplanan tüm CH içeriği Şekil 4.16'da verilmiştir.



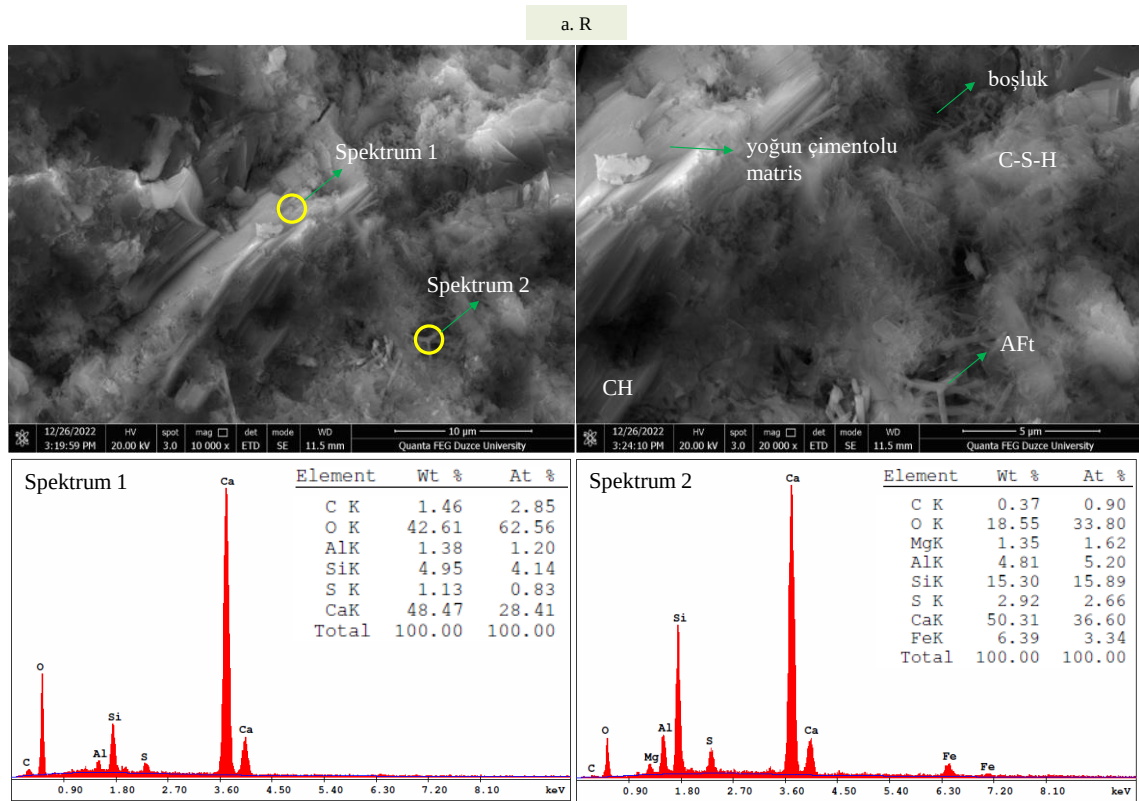
Şekil 4.16. Çimento hamurlarının CH içeriği.

Termal analiz sonucunda belirlenen 25-200 °C sıcaklık aralığındaki ağırlık kayıpları R, 10YFC, 10KK ve 10D kodlu çimento hamurlarda ise sırasıyla %6,65, %6,76, %6,97 ve %8,68 oranlarında yapısal ve kristal su ile C-S-H ve Aft fazlarının farklı aşamalarındaki dehidratasyonu şeklinde oluşmuştur (Şekil 4.15a). 400-500 °C sıcaklık aralığındaki ağırlık kayıpları ise R, 10YFC, 10KK ve 10D kodlu çimento hamurlarda ise sırasıyla %3,78, %3,51, %3,57 ve %3,19 oranlarında CH'nin ayrışması nedeniyle oluşmaktadır (Şekil 4.15b). $CaCO_3$ 'ün ayrışmasından kaynaklı 500-750 °C sıcaklık aralığındaki ağırlık kayıpları R, 10YFC, 10KK ve 10D kodlu çimento hamurlarda ise sırasıyla %2,09, %2,01, %2,46 ve %2,02 oranlarında meydana gelmiştir (Şekil 4.15c). C-S-H jel, CH ve diğer hidratlı ürünlerin dehidratasyonu nedeniyle ortaya çıkan ağırlık kayıpları da R, 10YFC, 10KK ve 10D kodlu çimento hamurlarda sırasıyla %16,05, %15,81, %16,1 ve %16,27 oranlarındadır (Şekil 4.15d). Denklem 4.1'e göre toplam CH içeriği R kodlu çimento hamurunda %19,05 oranında hesaplanırken, 10YFC, 10KK ve 10D kodlu çimento

hamurlarda %17,8, %18,82 ve %16,522 oranlarında hesaplanmıştır (Şekil 4.16). Bu verilere göre YFC, kalsine kaolin ve diatomitin puzolanik reaksiyon nedeniyle CH miktarını da azalttığı ve bu sonuçların XRD ve FT-IR analizleri sonucunda elde edilen bulgulara uygun olduğu söylenebilir.

4.2.7. Çimento Hamurlarının SEM Analizleri

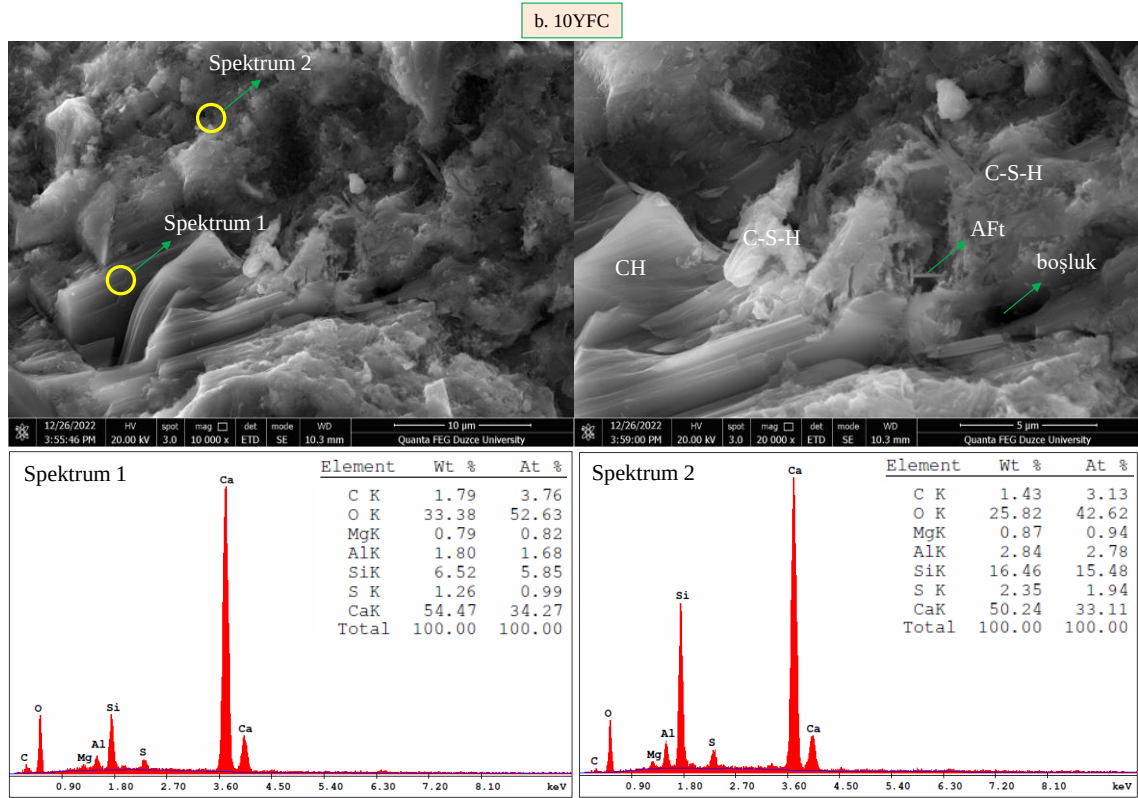
Çimento hamurlarına ait olan mikro yapıları inceleyebilmek amacıyla 10000 ve 20000 büyütmede görüntüleri elde edilmiş, bu görüntülerin iki farklı noktasındaki EDS belirlenmiştir. SEM ve EDS analizleri R kodlu çimento hamuru için Şekil 4.17’de; 10YFC, 10KK ve 10D kodlu çimento hamurlarının ise Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.17. Referans çimento hamurunun SEM görüntüsü.

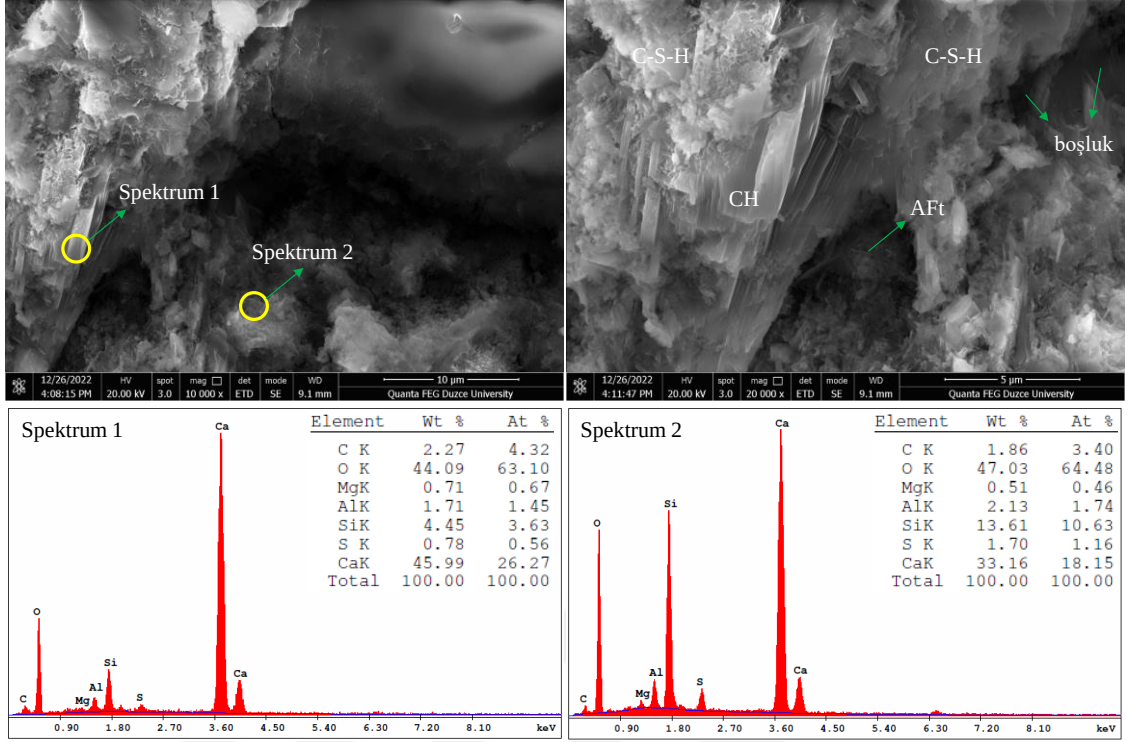
Referans çimento hamurunda şekilsiz jelin hakim fazı oluşturduğu ve boşlukları doldurarak kararlı bir yapı oluşturduğu izlenmektedir. Ancak yer yer çok küçük de olsa (1-2 µm civarı) boşluklara rastlanmıştır (Şekil 4.17). Ayrıca iğnemsî yapılı C-S-H’nin boşlukları doldurmaya çalıştığı görülmektedir. Bunun yanı sıra boşluklarda yer yer etrenjit oluşumlarına da rastlanmıştır. Ayrıca R kodlu çimento hamurun spektrum 1’de belirtilen EDS analizine göre, oksijen elementinin dışında birincil elementin Ca, ikincil

elementin ise Si olduğu görülürken, spektrum 2'ye göre birincil elementin Ca ve ikincil elementin ise Fe olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 4.17).



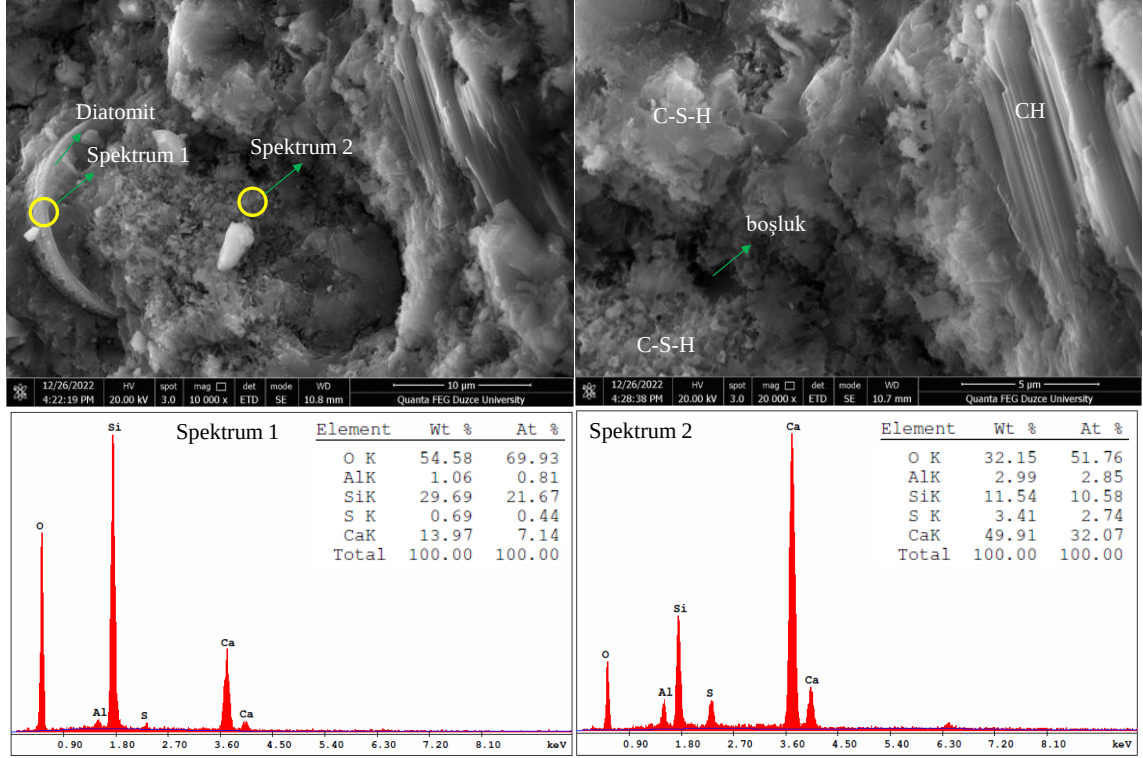
Şekil 4.18. 10YFC kodlu çimento hamurunun SEM görüntüsü.

%10 YFC ikame oranına sahip çimento hamurunda portlandit ve bulutumsu görünümdeki kaogüle C-S-H jel yapısı ana fazı oluşturmuştur. Klinker ve YFC taneleri, C-S-H'nin bulutumsu ve lifsi yapısıyla çevrelenmiş, böylelikle boşlukları doldurmaya çalışılmıştır. Ancak yine de 10YFC kodlu çimento hamurunda da bazı yerlerde 1-3 µm civarı boşluklar görülmektedir. Ayrıca R kodlu çimento hamurunda görülen yine boşluklarda yer yer etrenjit oluşumları görülmektedir (Şekil 4.18). 10YFC kodlu çimento hamurunda spektrum 1'de belirtilen EDS analizine göre, birincil elementin Ca, ikincil elementin ise Si olduğu, spektrum 2'ye göre birincil elementin Ca ve ikincil elementin ise spektrum 1'e nazaran daha yoğun miktarda yine Si olduğu izlenmektedir (Şekil 4.18).



Şekil 4.19. 10KK kodlu çimento hamurunun SEM görüntüsü.

10KK kodlu çimento hamurunda portlandit ve kaogüle jel yapısı ana fazı oluşturmuş ve metakaolin tanecikleri adeta bu fazın içine gömülmüştür. Ancak yine de 10YFC kodlu çimento hamurunda da bazı yerlerde 1- 5 µm civarlarında boşluklar ve bazı boşluklarda etrenjit oluşumları yer almaktadır (Şekil 4.19). 10KK kodlu çimento hamurunda spektrum 1’de belirtilen EDS analizine göre oksijen dışında, birincil elementin Ca, ikincil elementin ise Si, spektrum 2’ye göre birincil elementin Ca ve ikincil elementin ise spektrum 1’e nazaran daha yoğun miktarda yine Si elementi olduğu izlenmektedir (Şekil 4.19).



Şekil 4.20. 10D kodlu çimento hamurunun SEM görüntüsü.

Çalışmamızda kullanılan diatomit, oldukça gözenekli bir yapıya sahip disk benzeri silindirik şekillerde olup, bu yapısı sayesinde amorf fazların oluşumunu önemli ölçüde hızlandırmaktadır. 10D kodlu çimento hamurlarının yoğun bir yapı sergilemekte, diatomit ve matris arasındaki boşlukların çoğu bulutumsu yapıdaki C-S-H oluşumuyla ve hekzagonal yapıda CH fazlarıyla dolmaktadır. Bunun yanı sıra çimento hamurunda diatomit parçacıklarının gömülü olduğu kompakt bir kütle yapı izlense de yine yer yer 1-3 µm civarı boşluklara rastlanmakta olup, bu hamurun görüntülenen bölümünde etrenjit oluşumuna rastlanmamıştır (Şekil 4.20). 10D kodlu çimento hamurunun EDS analizinde, spektrum 1’de belirtilen birincil elementin Si, ikincil elementin ise Ca olduğu, spektrum 2’ye göre birincil elementin Ca ve ikincil elementin ise Si olduğu görülmektedir (Şekil 4.20).

Her üç puzolan ikameli çimento hamurların SEM görüntüleri genel olarak değerlendirildiğinde, puzolan tanelerinin daha yüksek yüzey alanı ve amorf silika içeriğine sahip olması nedeniyle portlandit ile reaksiyona beklendiği gibi girebildiği ve ikincil C-S-H jeli oluşumuna katkı sağlayarak puzolanik reaksiyonun gerçekleşmeye başladığı söylenebilir. Dolayısı ile bu durumda sertleşmiş çimento esaslı hamurların kompakt yapısıyla, çimento harçlarının mekanik özellikleri arasında iyi bir uyum olması

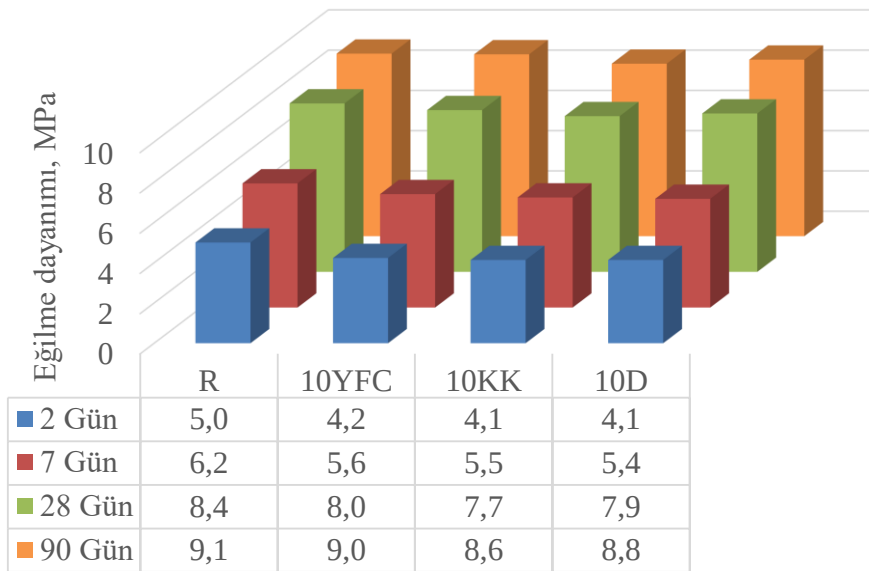
beklenebilir (Liu vd., 2020; Liu vd., 2021; Pınarcı ve Kocak, 2022; Türker ve Yeğınobalı, 2003).

4.3. ÇİMENTO HARÇLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Çimento harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımları; hidratasyon süresine, hammaddelerin fiziksel, kimyasal, mineralojik, moleküler, termal ve mikro yapı gibi yapısal özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu bağlamda çalışmanın bu bölümde çimento harçlarının mekanik özellikleri 2., 7., 28. ve 90. günlerinde elde edilen eğilme ve basınç dayanımı deneyleriyle belirlenerek ilgili başlıklarda açıklanmıştır.

4.3.1. Çimento Harçlarının Eğilme Dayanımları

PÇ ve YFC, kalsine kaolin ile diatomit ikameli çimento harçlarının 2., 7., 28. ve 90. günlerde belirlenen eğilme dayanım sonuçları Şekil 4.21’de verilmiştir.



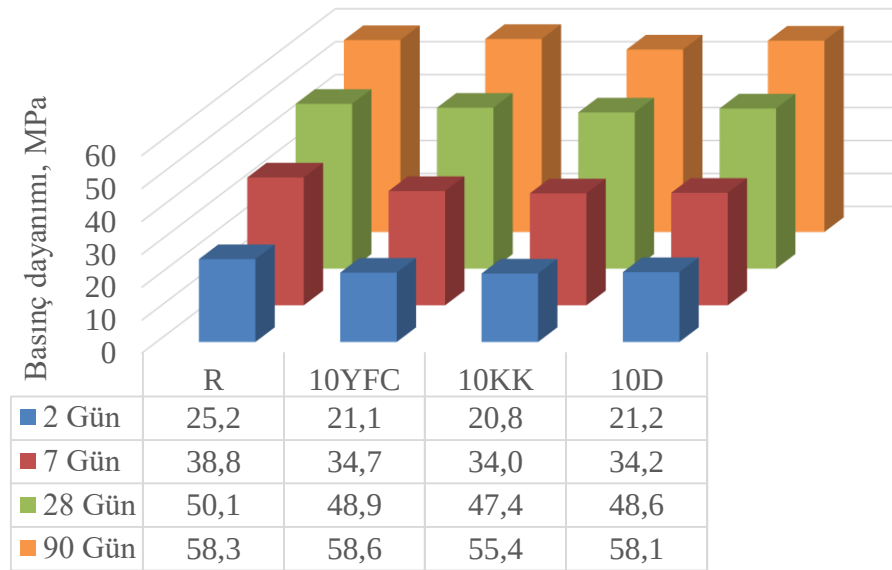
Şekil 4.21. Çimento harçların eğilme dayanımları.

Şekil 4.21’deki verilere göre çimento harçlarının 2. gün için en küçük eğilme dayanımının 4,1 MPa ile 10D ve 10KK kodlu numunelerde, en büyük eğilme dayanımının ise 5,0 MPa değeri ile R kodlu harç numunesinde olduğu görülmektedir. R kodlu numuneye göre, 10YFC, 10KK ve 10D kodlu numunelerin eğilme dayanımları sırasıyla %15,3, %17,3 ve %17,3 olarak azalmıştır. 7. gün için en küçük eğilme dayanımı 5,4 MPa ile 10D kodlu numunede, en büyük eğilme dayanımının 6,2 MPa ile R kodlu harç numunesinde

gerçekleşmiştir. Bu sonuçlara göre 10YFC, 10KK ve 10D kodlu numunelerin eğilme dayanımları R kodlu numuneye göre sırasıyla %8,6, %11,4 ve %12,4 oranında azalmıştır. 28. günde en küçük eğilme dayanımı 7,7 MPa ile 10KK kodlu numunede meydana gelirken, en büyük eğilme dayanımı 8,4 MPa ile R kodlu numunede oluşmuştur. 28. gündeki verilere göre 10YFC, 10KK ve 10D kodlu numunelerin eğilme dayanımları, R kodlu numuneye göre sırasıyla %4,0, %7,6 ve %6,0 oranında azalmıştır. 90. günde ise en küçük eğilme dayanımı 8,6 MPa ile 10KK kodlu numunede, en büyük eğilme dayanımı 9,1 MPa ile R kodlu harç numunesinde meydana gelmiştir. 90. gündeki verilere göre 10YFC, 10KK ve 10D kodlu örneklerin eğilme dayanımları R kodlu numuneye göre sırasıyla %0,4, %5,5 ve %3,3 oranında azalma elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, hidrasyon süresi arttıkça çalışmada tercih edilen YFC, kalsine kaolin ve diatomitin puzolanik özellikleri nedeniyle eğilme dayanımı açısından olumlu özellik gösterdiği ifade edilebilir. Ayrıca YFC'nin 90. günde hemen hemen R kodlu numunenin eğilme dayanım değerine ulaştığı ve kalsine kaolin ve diatomite nazaran eğilme dayanımı açısından nispeten daha iyi bir değere ulaştığı söylenebilir.

4.3.2. Çimento Harçlarının Basınç Dayanımları

PÇ ve YFC, kalsine kaolin ile diatomit ikameli çimento harçlarının 2., 7., 28. ve 90. günlerde belirlenen basınç dayanım sonuçları Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.22. Çimento harçlarının basınç dayanımları.

Şekil 4.22’den elde edilen sonuçlara göre 2. günde en yüksek basınç dayanımının 25,2 MPa ile R kodlu harç numunesinde, en düşük basınç dayanımının ise 20,8 MPa ile 10KK kodlu harç numunelerinde olduğu belirlenmiştir. Referans harç numuneleri ile karşılaştırıldığında, 10YFC, 10KK ve 10D kodlu örneklerin basınç dayanımları sırasıyla %16,3, %17,4 ve %15,7 olarak azalmıştır. 7. günde en yüksek basınç dayanımının 38,8 MPa ile R kodlu harç numunesinde, en düşük basınç dayanımı 34 MPa ile 10KK kodlu harç numunesinde olmuştur. Bunun yanı sıra 10YFC, 10KK ve 10D kodlu örneklerin basınç dayanımları referans harç numunesine göre sırasıyla %10,6, %12,4 ve %12,0 olarak azalmıştır. 28. günde en yüksek basınç dayanımı 50,1 MPa ile R kodlu harç numunesinde, en düşük basınç dayanımı ise 47,4 MPa ile 10KK kodlu harç numunesinde gerçekleşmiştir. Ayrıca 10YFC, 10KK ve 10D kodlu örneklerin basınç dayanımları referans harç numunesine göre sırasıyla %2,4, %5,2 ve %2,8 olarak azalmıştır. 90. günde ise en yüksek basınç dayanımının 58,6 MPa ile 10YFC kodlu harç numunesinde, en düşük basınç dayanımı 55,4 MPa ile 10KK kodlu harç numunesinde tespit edilmiştir. Bununla birlikte 10KK ve 10D kodlu örneklerin basınç dayanımları referans harç numunesine göre sırasıyla %4,9 ve %0,3 oranında azalırken, 10YFC kodlu harç numunesi %0,6 oranında artış göstermiştir (Şekil 4.22). Elde edilen veriler dikkate alındığında hidrasyon süresi arttıkça kullanılan tüm mineral katkıların pozolanik özellikleri nedeniyle olumlu özellik gösterdiği söylenebilir. Özellikle YFC’nin 90. günde referans çimentonun basınç dayanım değerini geçmesi, diğer pozolanik malzemelere göre basınç dayanımı açısından daha olumlu katkı sağladığını göstermektedir.

Genel olarak elde edilen basınç dayanımı verilerine göre; mineral katkı ikameli harç örneklerinin 2. ve 7. hidrasyon günlerindeki basınç dayanımlarının gelişim hızlarının referans çimentoya kıyasla daha düşük olduğu, ancak 28. ve 90. hidrasyon günlerinde basınç dayanım değerlerindeki gelişim hızlarının nispeten daha fazla olduğu görülmektedir. İlk hidrasyon günlerindeki basınç dayanım değerlerinin azalması, hidrasyon gelişimlerinin izlenmesi için yapılan XRD, FT-IR, DSC/TGA ve SEM/EDS analizlerinden elde edilen bulgulardan da izlenebileceği gibi pozolanik reaksiyon sonucu hidrasyonun hızının azalmasından dolayı daha az C-S-H açığa çıkması olarak ifade edilebilir. İleriki yaşlar olarak kabul edilen 28. ve özellikle 90. hidrasyon günlerinde ise daha yüksek yüzey alanı ve amorf silika içeriğine sahip olan mineral katkıların portlandit (CH) ile reaksiyona tahmin edildiği gibi girebildiği ve ikincil C-S-H jeli oluşumunu sağlayarak, SEM resimlerinde görüldüğü gibi daha kompakt bir yapı oluşturarak istenen

basınç dayanımı değerlerine ulaşıldığı görülmektedir (Şekil 4.18-19-20). Bunun yanı sıra tüm mineral katkı ikameli çimento harçlarının basınç dayanımları, TS EN 197-1’de belirtilen 2. hidratasyon gününde 20 MPa ve 28. hidratasyon gününde 42,5 MPa olan en küçük değerin üzerinde olduğu, dolayısı ile tüm mineral katkı ikameli çimento harçlarının 42,5 R dayanım sınıfını sağladığı ifade edilebilir (TS EN 197-1, 2012).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada CEM I 42,5 R Portland çimentoya %10 oranlarında YFC, kalsine kaolin ve diatomit olmak üzere üç farklı mineral katkı ikame edilerek dört farklı çimento üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Öncelikle hammaddeler üzerinde kimyasal, fiziksel, mineralojik, moleküler ve mikro yapı gibi analizler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu dört farklı çimento ile hazırlanan hamur ve harçların özelliklerini belirlemek için standart çimento deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden eğilme ve basınç dayanımları için 2., 7., 28. ve 90. hidrasyon günleri tercih edilmiştir. Ayrıca çimento hamurlarının hidrasyon gelişimleri 28 günde XRD, FT-IR, DSC/TGA ve SEM/EDS analizleriyle izlenmiştir.

Hammaddeler üzerinde yapılan analizlere göre:

- ✓ Tane boyut analiz değerlerine bakıldığında tüm mineral katkıların referans çimentoya nazaran daha küçük boyutlu olduğu ve en küçük tane boyutuna sahip malzemenin 20 µm tane boyutu esas alındığında diatomit olduğu;
- ✓ Özgül ağırlık ve Blaine değerlerine bakıldığında en düşük özgül ağırlık değerlerine sahip olan malzemenin diatomit, en yüksek Blaine değerine sahip malzemenin ise kalsine kaolin olduğu;
- ✓ Mineral katkıların kimyasal analizleri değerlendirildiğinde; YFC için hidrolik özelliklerine göre istenen hidrolik modül değerine sahip olduğu, kalsine kaolin ve diatomit için ise S+A+F değeri %70 sınır değerinin üzerinde olduğu, dolayısı ile her üç mineral katkının da puzolanik özellikleri açısından olumlu davranış gösterebileceği;
- ✓ Malzemelerin mineralojik özelliklerine göre; PÇ'nin XRD desenlerinin, tipik bir çimentoda olması gerektiği gibi kristallenmiş yapıda olduğu, YFC ve diatomitin amorf yapıda olduğu, kalsine kaolinin kuvars ve mullitin güçlü kırılma pikleri ile kristobalit, kaolinit, zeolit fazlarının küçük kırılma pikleriyle meydana geldiği;
- ✓ Malzemelerin moleküler özelliklerine göre çalışmada kullanılan PÇ, YFC, kalsine kaolin ve diatomitin bağ yapılarının literatürle uyumlu olarak elde edildiği;
- ✓ Eş zamanlı yapılan DSC/TGA analizlerinin literatürle uyumlu olduğu, PÇ, YFC,

kalsine kaolin ve diatomitin toplam ağırlık kayıplarının sırasıyla %3,7, %1,76, %8,51 ve %9,55 oranlarda meydana geldiği;

- ✓ Hammaddelerin mikro yapılarını incelemek için gerçekleştirilen SEM/EDS analizlerine göre; tüm malzemelerin kimyasal özelliklerdeki verilerle uyumlu olduğu, PÇ'nin farklı boyut ve şekillerde yapı olarak düzensiz olduğu; YFC'nin küresel olmayan tane şekillerinin ve esas olarak sürekli bir ağ yapısında olan camsı fazlardan oluştuğu; kalsine kaolinin katmanlar arası boşluklara sahip, rastgele boyutlarda altıgen trombosit yapılarda pul pul plakalar halinde bir tane yapısına sahip olduğu; diatomitin içi boş tüpler, halkalar, plakalar, oldukça gözenek sistemine sahip çeşitli şekillerde parçalar ve parçacıklar, hasarsız kabuklar ve bu kabukların granülleri, mikro/nano-gözeneklere sahip bir bal peteği yapısı ile karakterize edilen birçok merkezli radyal simetriye 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 en fazla su ihtiyacının görüldüğü hamurun %43,50 oranıyla diatomit ikameli çimentoda olduğu;
- ✓ Priz sürelerine göre tüm mineral katkı ikameli çimentoların priz başlama ve priz sonu sürelerinde referans çimento hamuruna kıyasla bir artış olduğu, ancak bu süreleri standartta verilen değerler içerisinde olduğu ve beton taze iken taşınması, yerleştirilmesi ve sıkıştırılması işlemlerinde problem yaşanmayacağı, kalıp sökme işleminin sorun olmadan yapılabileceği ve betonun dış iklim şartlarından olumsuz etkilenmeyeceği;
- ✓ Tüm çimento hamurlarının genleşme değerlerinin 1 mm olarak elde edildiği, dolayısı ile standartlarda belirlenen en yüksek değer olan 10 mm'nin altında olduğundan genleşme ile ilgili bir sorun yaşanmayacağı;
- ✓ XRD ile yapılan analizlere göre tüm mineral katkılı çimentoların referans çimentodan daha fazla CH tükettiği, dolayısı ile puzolanik özelliğinden dolayı portlandit ile reaksiyona girdiği, çimento benzeri hidratlı ürünlerin oluşumuna katkı sağlayan puzolanik malzemeler oldukları ve daha fazla C-S-H ve daha az CH miktarı ortaya çıkardıkları;
- ✓ FT-IR ile yapılan analizlere göre tüm mineral katkılı çimentoların referans çimento hamuruna göre, daha fazla C-S-H oluşumuna katkı sağlayarak çimento

harçlarının dayanım ve dayanıklılık özelliklerine katkı sağlayacağı;

- ✓ DSC/TGA ile yapılan analizlere göre tüm mineral katkılı çimentoların referans çimento hamuruna göre, YFC, kalsine kaolin ve diatomitin puzolanik reaksiyon nedeniyle CH miktarını da azalttığı ve bu sonuçların XRD ve FT-IR analiz sonuçlarıyla uyumlu olduğu,
- ✓ SEM görüntülerine göre, puzolan tanelerinin daha yüksek yüzey alanı ve amorf silika içeriğine sahip olması nedeniyle portlandit ile reaksiyona beklendiği gibi girebildiği ve ikincil C-S-H jeli oluşumuna katkı sağlayarak puzolanik reaksiyonun gerçekleşmeye başladığı söylenebilir.

Çimento harçları üzerinde yapılan eğilme ve basınç dayanımlarına göre:

- ✓ Eğilme dayanımı sonuçlarına göre tüm hidratasyon günlerinde en yüksek değer referans çimento harcında olduğu; ancak ilerleyen günlerde tüm mineral katkılı çimento harçlarında referans çimentoya nazaran daha fazla artış olduğu ve özellikle YFC ikameli çimento harcında 90. günde hemen hemen referans çimentonun eğilme dayanım değerine ulaştığı ve kalsine kaolin ve diatomite nazaran eğilme dayanımı açısından nispeten daha iyi bir değere ulaştığı;
- ✓ Basınç dayanımı sonuçlarına göre yine eğilme dayanımlarında görüldüğü gibi tüm mineral katkılı çimento harçlarında referans çimentoya nazaran ilerleyen hidratasyon günlerinde artış olduğu, 2., 7. ve 28. hidratasyon gününde en yüksek değer referans çimento harcında olduğu, ancak 90. günde YFC ikameli çimento harcındaki basınç dayanımı değerinin referans çimentonun üzerinde elde edildiği;
- ✓ İlk hidratasyon günlerindeki basınç dayanım değerlerinin azalmasının nedeni olarak erken yaşlarda puzolanik reaksiyon sonucu hidratasyonun hızının azalmasından dolayı daha az C-S-H açığa çıkması; ileriki yaşlarda daha yüksek yüzey alanı ve amorf silika içeriğine sahip olan mineral katkıların portlandit (CH) ile reaksiyona girmesiyle ikincil C-S-H jeli oluşumunun sağlanmasıyla istenen basınç dayanımı değerlerine ulaşılabilirdiği;
- ✓ Tüm mineral katkı ikameli çimento harçlarının basınç dayanımlarının, TS EN 197-1’de belirtilen 2. gün için 20 MPa ve 28. gün için 42,5 MPa olan en küçük değer üzerinde elde edildiği, dolayısı ile tüm mineral katkı ikameli çimento harçlarının 42,5 R dayanım sınıfını sağladığı ifade edilebilir.

Sonuç olarak endüstriyel bir atık olan YFC’nin, doğal bir malzeme olan diatomitin ve ısıtılmış işlem uygulanarak elde edilen kalsine kaolinin 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.

Bu çalışmada CEM I 42,5 R tip çimento, %10 oranında YFC, kalsine kaolin ve diatomit ikameli çimentoların hidratasyon reaksiyonları bir bütün olarak incelenmiştir. Ancak diğer çimento tipleri ve mineral katkıların ayrı ayrı ya da birlikte ikamesi ile üretilen çimentoların XRD, FT-IR, termal analiz ve SEM gibi analizlerinin yapılacak diğer çalışmalarda kullanılmasının hidratasyon reaksiyonlarının daha iyi anlaşılması açısından yararlı olacağı ve literatüre, çimento ve beton sektörüne katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



6. KAYNAKLAR

- Ababneh, A., Matalkah, F., & Aqel, R. (2020). Synthesis of kaolin-based alkali-activated cement: Carbon footprint, cost and energy assessment. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 8367–8378.
- Ababneh, A., Matalkah, F., & Matalkeh, B. (2022). Effects of kaolin characteristics on the mechanical properties of alkali-activated binders. *Construction and Building Materials*, 318(December 2021), 126020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126020>
- Agra, T. M. S., Lima, V. M. E., Basto, P. E. A., & Melo Neto, A. A. (2023). Characterizing and processing a kaolinite-rich water treatment sludge for use as high-reactivity pozzolan in cement manufacturing. *Applied Clay Science*, 236(March), 106870. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106870>
- Aksakal, E. L., Angin, I., & Sari, S. (2021). Effects of freeze-thaw cycles on consistency limits of soils amended with diatomite. *Soil and Tillage Research*, 213(March), 105144. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105144>
- Ayub, A., Mohd Yunus, N. Z., Abang Hasbollah, D. Z., Yaacob, H., Jusoh, S. N., & Ahmad, K. (2023). Compressibility behaviour on carbonation of ground granulated blast furnace slag (GGBS) treated kaolin. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 130(January), 103362. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103362>
- Aziz, A., Stocker, O., El Amrani El Hassani, I. E., Laborier, A. P., Jacotot, E., El Khadiri, A., & El Bouari, A. (2021). Effect of blast-furnace slag on physicochemical properties of pozzolan-based geopolymers. *Materials Chemistry and Physics*, 258(March 2020), 123880. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123880>
- Ballari, S. O., Raffikbasha, M., Shirgire, A., Thakur, L. S., Thenmozhi, S., & Sarath Chandra Kumar, B. (2023). Replacement of coarse aggregates by industrial slag. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.491>
- Bariş, K. E., & Tanaçan, L. (2021). Improving the geopolymeric reactivity of Earth of Datça as a natural pozzolan in developing green binder. *Journal of Building Engineering*, 41(May). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102760>

- Bhattacharya, M., & Harish, K. V. (2018). An integrated approach for studying the hydration of portland cement systems containing silica fume. *Construction and Building Materials*, 188, 1179–1192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.114>
- Bumanis, G., Vitola, L., Stipniece, L., Locs, J., Korjaks, A., & Bajare, D. (2020). Evaluation of Industrial by-products as pozzolans: A road map for use in concrete production. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00424. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00424>
- Çalışkan, M. (2018). 'Doğal Diatomit (Çaldıran-Van) Üzerine Basic Blue Ve Neutral Red Boyar Maddelerinin Adsorpsiyon Ve Denge Çalışması', Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Ordu, Türkiye.
- Çetin, M., & Taş, B. (2012). Biyolojik Orijinli Tek Doğal Mineral: Diatomit. *Tübbav Bilim Dergisi*, 5(2), 28–46.
- Chen, X., Zhou, M., Shen, W., Zhu, G., & Ge, X. (2018). Mechanical properties and microstructure of metakaolin-based geopolymer compound-modified by polyacrylic emulsion and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 190, 680–690. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.116>
- Chinh Chu, D., Kleib, J., Amar, M., Benzerzour, M., & Abriak, N.-E. (2021). Recycling of dredged sediment as a raw material for the manufacture of Portland cement – Numerical modeling of the hydration of synthesized cement using the CEMHYD3D code. *Journal of Building Engineering*, 103871. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103871>
- Choi, Y. C., & Park, B. (2019). Enhanced autogenous healing of ground granulated blast furnace slag blended cements and mortars. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(4), 3443–3452. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.010>
- Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler Ve Uygunluk Kriterleri (2012). Türk Standartları Enstitüsü TS EN 197-1.
- Çimento deney metodları - Bölüm 6: İncelik tayini (2020). Türk Standartları Enstitüsü TS EN 196-6.
- Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini (2016). Türk Standartları Enstitüsü TS EN 196-1.
- Çimento deney metotları - Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini (2017). Türk Standartları Enstitüsü TS EN 196-3.

Çimento Deney Yöntemleri - Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi (2013). Türk Standartları Enstitüsü TS EN 196-2.

Costa, J. A. C., Martinelli, A. E., do Nascimento, R. M., & Mendes, A. M. (2020). Microstructural design and thermal characterization of composite diatomite-vermiculite paraffin-based form-stable PCM for cementitious mortars. *Construction and Building Materials*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117167>

Dabbaghi, F., Sadeghi-nik, A., Ali, N., & Nasrollahpour, S. (2021). Characterizing fiber reinforced concrete incorporating zeolite and metakaolin as natural pozzolans. *Structures*, 34(February), 2617–2627. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.025>

Dai, J., Wang, Q., Lou, X., Bao, X., Zhang, B., Wang, J., & Zhang, X. (2021). Solution calorimetry to assess effects of water-cement ratio and low temperature on hydration heat of cement. *Construction and Building Materials*, 269, 121222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121222>

Das, M., Adhikary, S. K., & Rudzionis, Z. (2021). Effectiveness of fly ash, zeolite, and unburnt rice husk as a substitute of cement in concrete. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.005>

De Oliveira, A. M., Oliveira, A. P., Vieira, J. D., Junior, A. N., & Cascudo, O. (2023). Study of the development of hydration of ternary cement pastes using X-ray computed microtomography, XRD-Rietveld method, TG/DTG, DSC, calorimetry and FTIR techniques. *Journal of Building Engineering*, 64(September 2022), 105616. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105616>

Deboucha, W., Leklou, N., Khelidj, A., & Oudjit, M. N. (2017). Natural pozzolana addition effect on compressive strength and capillary water absorption of Mortar. *Energy Procedia*, 139, 689–695. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.273>

Demir, S. (2020). 'Kaolin Ve Sodyum Silikat Esaslı İnorganik Bağlayıcının Basma Dayanımına Kimyasal Kompozisyonun Etkisinin Araştırılması', Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye.

Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan-Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri (2015). Türk Standartları Enstitüsü TS 25.

Dorn, T., Blask, O., & Stephan, D. (2022). Acceleration of cement hydration – A review of the working mechanisms, effects on setting time, and compressive strength development of accelerating admixtures. *Construction and Building Materials*, 323(January), 126554. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126554>

- Fang, K., Wang, D., Zhao, J., & Zhang, M. (2021). Utilization of ladle furnace slag as cement partial replacement : Influences on the hydration and hardening properties of cement. *Construction and Building Materials*, 299(July), 124265. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124265>
- Fredericci, C., Zanutto, E. D., & Ziemath, E. C. (2000). Crystallization mechanism and properties of a blast furnace slag glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 273(1–3), 64–75. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(00\)00145-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(00)00145-9)
- Gabrovšek, R., Vuk, T., & Kaučič, V. (2006). Evaluation of the hydration of Portland cement containing various carbonates by means of thermal analysis. *Acta Chimica Slovenica*, 53(2), 159–165.
- Gündeşli, U. (2008). 'Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması', Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
- Gündüz, L., & Kalkan, Ş. O. (2017). Diatomit Agregaların Çimento Esaslı Hafif Harç Özelliklerinin Gelişimine Etkisi. 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, Kütahya, Türkiye.
- Hu, K., Zhang, C., Chen, T., Li, K., Liu, Y., Chen, Q., Wei, S., & Li, X. (2023). Selective recovery of lanthanum from magnesium-containing solution via phosphoric acid modified kaolin prepared by a simple mechanochemical process. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(2). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104498>
- Huang, X., Huang, T., Li, S., Muhammad, F., Xu, G., Zhao, Z., Yu, L., Yan, Y., Li, D., & Jiao, B. (2016). Immobilization of chromite ore processing residue with alkali-activated blast furnace slag-based geopolymer. *Ceramics International*, 42(8), 9538–9549. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.033>
- Huang, Y., Deng, J., Wang, W., Feng, Q., & Xu, Z. (2018). Preliminary investigation of pozzolanic properties of calcined waste kaolin. *Medziagotyra*, 24(2), 177–184. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.24.2.18192>
- Igliński, B., & Buczkowski, R. (2017). Development of cement industry in Poland – History, current state, ecological aspects. A review. *Journal of Cleaner Production*, 141, 702–720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.139>
- Karatas, M., Benli, A., & Arslan, F. (2020). The effects of kaolin and calcined kaolin on the durability and mechanical properties of self-compacting mortars subjected to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 265, 120300.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120300>

- Karpova, E., Skripkiūnas, G., Barauskas, I., Barauskienė, I., & Hodul, J. (2021). Influence of carbon nanotubes and polycarboxylate superplasticiser on the Portland cement hydration process. *Construction and Building Materials*, 304(April). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124648>
- Kasaniya, M., Thomas, M. D. A., & Moffatt, E. G. (2021). Efficiency of natural pozzolans, ground glasses and coal bottom ashes in mitigating sulfate attack and alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 149(September 2020), 106551. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106551>
- Koçak, Y. (2008). 'Çimento-Puzolan Etkileşiminde Moleküler Ve Elektrokinetik Davranışların Araştırılması', Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Kulea, H. (2014). Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi ve Gıda Analizlerinde Kullanımı. *Gıda*, 39(4), 235–241.
- Laonapakul, T., Suthi, T., Otsuka, Y., Mutoh, Y., Chaikool, P., & Chindaprasirt, P. (2022). Fluoride adsorption enhancement of Calcined-Kaolin/Hydroxyapatite composite. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(11), 104220. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104220>
- Lauermannová, A. M., Lojka, M., Jankovsky, O., Faltyšová, I., Pavlikova, M., Pivak, A., Záleská, M., & Pavlik, Z. (2021). High-performance magnesium oxychloride composites with silica sand and diatomite. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 957–969. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.028>
- Lei, D. Y., Guo, L. P., Sun, W., Liu, J., Shu, X., & Guo, X. L. (2016). A new dispersing method on silica fume and its influence on the performance of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 115, 716–726. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.023>
- Li, R., Lei, L., & Plank, J. (2023). Influence of PCE superplasticizers on the fresh properties of low carbon cements containing calcined clays: A comparative study of calcined clays from three different sources. *Cement and Concrete Composites*, 139(November 2022), 105072. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105072>
- Liu, J., Qin, Q., & Yu, Q. (2020). The effect of size distribution of slag particles obtained in dry granulation on blast furnace slag cement strength. *Powder Technology*, 362, 32–36. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.115>

- Liu, J., Yu, Q., Zuo, Z., Yang, F., Duan, W., & Qin, Q. (2017). Blast furnace slag obtained from dry granulation method as a component in slag cement. *Construction and Building Materials*, 131, 381–387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.040>
- Liu, K., Shui, Z., Sun, T., Ling, G., Li, X., & Cheng, S. (2019). Effects of combined expansive agents and supplementary cementitious materials on the mechanical properties, shrinkage and chloride penetration of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 211, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.143>
- Liu, R., Yang, Y., Zhao, X., & Pang, B. (2021). Quantitative phase analysis and microstructural characterization of Portland cement blends with diatomite waste using the Rietveld method. *Journal of Materials Science*, 56(2), 1242–1254. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05429-1>
- Ma, S. C., Wang, Z. G., Zhang, J. L., Sun, D. H., & Liu, G. X. (2015). Detection analysis of surface hydroxyl active sites and simulation calculation of the surface dissociation constants of aqueous diatomite suspensions. *Applied Surface Science*, 327, 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.12.006>
- Ma, Z., Lu, X., Wu, C., Liu, C., Liu, Z., & Zhang, H. (2017). Assessment of combination of pressure-relief pulsation flow and diatomite filter-aid in membrane fouling control. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 80, 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.07.040>
- Maraveas, C. (2020). Production of sustainable construction materials using agro-wastes. *Materials*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/ma13020262>
- Mert, M. (2021). 'Ponza Tozu Ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Alkali İle Aktivite Edilmiş Malzemenin Fiziksel, Mekanik Ve İçyapı Özellikleri', Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- MolaAbasi, H., Kharazmi, P., Khajeh, A., Saberian, M., Jamshidi Chenari, R., Harandi, M., & Li, J. (2022). Low plasticity clay stabilized with cement and zeolite: An experimental and environmental impact study. *Resources, Conservation and Recycling*, 184(May 2021), 106408. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106408>
- Mollah, M. Y. A., Yu, W., Schennach, R., & Cocke, D. L. (2000). A Fourier transform infrared spectroscopic investigation of the early hydration of Portland cement and the influence of sodium lignosulfonate. *Cement and Concrete Research*, 30(2), 267–273. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00243-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00243-4)

- Monteagudo, S. M., Moragues, A., Gálvez, J. C., Casati, M. J., & Reyes, E. (2014). The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis. Morphological evolution of the solid phases. *Thermochimica Acta*, 592, 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.08.008>
- Mouli, M., & Khelafi, H. (2008). Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan. *Building and Environment*, 43(1), 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.038>
- Müezzinoğlu, G. (2009). 'Farklı Mineralojik Yapıya Sahip Pozolanların Pozolanik Aktivitelerinin İncelenmesi', Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, Türkiye.
- Najimi, M., & Ghafoori, N. (2019). Engineering properties of natural pozzolan/slag based alkali-activated concrete. *Construction and Building Materials*, 208, 46–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.107>
- Najimi, M., Ghafoori, N., & Sharbaf, M. (2018). Alkali-activated natural pozzolan/slag mortars: A parametric study. *Construction and Building Materials*, 164, 625–643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.222>
- Nas, S. (2012). 'Portland çimento ve uçucu kül ikameli çimentoların hidrasyon gelişimleri ile fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin araştırılması', Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, Türkiye.
- Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. I. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties - A review. *Construction and Building Materials*, 105, 423–434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153>
- Özdemir, İ. (2020). 'Pirinç Kabuğu Külü İkameli Çimento Harçlarının Hidrasyon Gelişiminin Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması', Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, Türkiye.
- Özdöl, G. (2004). 'Çimentonun Fiziksel Özelliklerinin Üretilen Standart Harcın Mukavemetine Etkilerinin Araştırılması', Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Özer, E. (2009). 'Niğde Yöresi Fesleğen Yayla Kaolin Kilinden Metakaolin Üretilebilirliğinin Araştırılması', Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, Türkiye.

- Pınarcı, İ. (2022). 'Diatomit Ve Pomza İkameli Çimentoların Hidratasyon Reaksiyonlarının Ve Yüzey Özelliklerinin Spektroskopik Yöntemlerle Araştırılması', Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, Türkiye.
- Pınarcı, İ., & Kocak, Y. (2022). Hydration mechanisms and mechanical properties of pumice substituted cementitious binder. *Construction and Building Materials*, 335(March). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127528>
- Qian, T., Li, J., Min, X., Deng, Y., Guan, W., & Ning, L. (2015). Diatomite: A promising natural candidate as carrier material for low, middle and high temperature phase change material. *Energy Conversion and Management*, 98, 34–45. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.071>
- Raheem, A. A., Abdulwahab, R., & Kareem, M. A. (2021). Incorporation of metakaolin and nanosilica in blended cement mortar and concrete- A review. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125852>
- Ramezaniapour, A. A., Mortezaei, M., & Mirvalad, S. (2021). Synergic effect of nano-silica and natural pozzolans on transport and mechanical properties of blended cement mortars. *Journal of Building Engineering*, 44(April 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102667>
- Rasam, S., Moshfegh Haghighi, A., Azizi, K., Soria-Verdugo, A., & Keshavarz Moraveji, M. (2020). Thermal behavior, thermodynamics and kinetics of co-pyrolysis of binary and ternary mixtures of biomass through thermogravimetric analysis. *Fuel*, 280(March), 118665. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118665>
- Richard, T., Mercury, L., Poulet, F., & d'Hendecourt, L. (2006). Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy as a tool to characterise water in adsorption/confinement situations. *Journal of Colloid and Interface Science*, 304(1), 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.08.036>
- Şahin, Y. İ., & Koçak, Y. (2022). Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimentoların Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(2), 802–814.
- Salam, Ç. (2004). 'Fiziksel ve Kimyasal İşlemlerin Kaolin'in Yapısına Etkileri'. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye.
- Sapal, S. S., & Wegner, L. D. (2017). Effectiveness of a natural pozzolan from southern Saskatchewan for cement replacement in concrete. İçinde *6th International*

- Saraya, M. E. S. I. (2014). 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*, 72, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.071>
- Sarde, B., Patil, Y., Dholakiya, B., & Pawar, V. (2022). Effect of calcined kaolin clay on mechanical and durability properties of pet waste-based polymer mortar composites. *Construction and Building Materials*, 318(November 2021), 126027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126027>
- Sarıdemir, M., Çelikten, S., & Yıldırım, A. (2020). Mechanical and microstructural properties of calcined diatomite powder modified high strength mortars at ambient and high temperatures. *Advanced Powder Technology*, 31(7), 3004–3017.
- Sawhani, P., Tyagi, D., Rajput, V., Sahu, M., Gupta, G., Jha, A., & Agrawal, A. (2023). Physical and mechanical behaviour of polyester-based composites with micro-sized blast furnace slag as filler material. *Materials Today: Proceedings*, xxxx, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.277>
- Schöler, A., Lothenbach, B., Winnefeld, F., & Zajac, M. (2015). Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, 55, 374–382. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.001>
- Sha, W., O'Neill, E. A., & Guo, Z. (1999). Differential scanning calorimetry study of ordinary Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 29(9), 1487–1489. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00128-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00128-3)
- Shafiq, N., Nuruddin, M. F., Khan, S. U., & Ayub, T. (2015). Calcined kaolin as cement replacing material and its use in high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 81, 313–323. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.050>
- Snelson, D. G., Wild, S., & O'Farrell, M. (2008). Heat of hydration of Portland Cement-Metakaolin-Fly ash (PC-MK-PFA) blends. *Cement and Concrete Research*, 38(6), 832–840.
- Soysat, F. (2019). Çelik Fiber Ve Polipropilen Fiberle Güçlendirilmiş Yüksek Performanslı Beton Özellikleri Üzerine Silis Dumanı Ve Metakaolinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, Türkiye.

- Su Le' Mya Thwin, N., & Myat Thwe, E. (2023). Investigation on the strength behaviors of ordinary and Kaolin-modified concretes severely attacked by sulfuric acid. *Materials Today: Proceedings*, xxxx, 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.114>
- Sun, M., Zou, C., & Xin, D. (2020). Pore structure evolution mechanism of cement mortar containing diatomite subjected to freeze-thaw cycles by multifractal analysis. *Cement and Concrete Composites*, 114(July), 103731. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103731>
- Tchamdjou, W. H. J., Cherradi, T., Abidi, M. L., & De Oliveira, L. A. P. (2017). Influence of different amounts of natural pozzolan from volcanic scoria on the rheological properties of portland cement pastes. *Energy Procedia*, 139, 696–702. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.274>
- Tokay, M., & Erdoğan, K. (2011). *Cüruflar ve Cüruflu Çimentolar, Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu*, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Türkiye.
- Topçuoğlu, Y. A., & Gürocak, Z. (2023). Uçucu Kül, Silis Dumanı Ve Tüf İle Stabilize Edilmiş Bentonitte Meydana Gelen Moleküler Değişimlerin Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) Yöntemi İle Belirlenmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), 94–112.
- Tulashie, S. K., Ebo, P., Ansah, J. K., & Mensah, D. (2021). Production of Portland pozzolana cement from rice husk ash. *Materialia*, 16(February), 101048. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101048>
- Türker P. & Yeğınobalı A. (2003). Farklı puzolanik sistemlerin hidrasyon karşılaştırılması. *Çimento ve Beton Dünyası*, 8(46), 52–66.
- Uğur, O. (2018). 'Ön Isıtıcı Ve Kalsinatörlü Çimento Fabrikasına Ait Döner Fırın Prosesi Üzerinde Enerji Ve Ekserji Analizlerinin Uygulanması', Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, Türkiye.
- Villca, A. R., Soriano, L., Font, A., Tashima, M. M., Monzó, J., Victoria Borrachero, M., & Payá, J. (2021). Lime/pozzolan/geopolymer systems: Performance in pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 276, 122208. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122208>
- Vincent, T., Gholampour, A., Ozbakkaloglu, T., & Ngo, T. D. (2021). Waste-based alkali-activated mortars containing low- and high-halloysite kaolin nanoparticles. *Journal*

- Xu, P., Li, X., Wei, R., Yang, C., Shen, T., Wang, P., & Zhang, G. (2023). High adaptability and stability FeCo₂O₄/diatomite composite for efficient peroxymonosulfate activation: Performance, water matrix impact, and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 462(December 2022), 142204. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142204>
- Xuquan, H., Jiang, M., Zhao, X., & Tang, C. (2016). Mechanical properties and hydration mechanisms of high-strength fluorogypsum-blast furnace slag-based hydraulic cementitious binder. *Construction and Building Materials*, 127, 137–143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.152>
- Yao, G., Lei, J., Zhang, X., Sun, Z., Zheng, S., & Komarneni, S. (2018). Mechanism of zeolite X crystallization from diatomite. *Materials Research Bulletin*, 107(April), 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2018.07.021>
- Yılmaz, Z. (2004). 'Hidrotermal İşlemlerle Kaolin'in Dekompozisyonu', Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye.
- Younes, M. M., Abdel-Rahman, H. A., & Khatatb, M. M. (2018). Utilization of rice husk ash and waste glass in the production of ternary blended cement mortar composites. *Journal of Building Engineering*, 20(July), 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.001>
- Yuan, L., Qiu, J., Guo, Z., Zhang, S., Wan, X., & Sun, X. (2023). Microscale and macroscale strength behaviors of blast furnace slag- cement based materials: Modeling and analysis. *Construction and Building Materials*, 376(March), 131016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131016>
- Yünsel, T. Y., Ersoy, A., & Ehsani, A. (2019). X-ışını difraksiyonu yöntemi ile kantitatif mineral içeriği tayini ve çalışma şartlarının etkisi. *Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 16–28.
- Zhai, Q., & Kurumisawa, K. (2021). Effect of accelerators on Ca(OH)₂ activated ground granulated blast-furnace slag at low curing temperature. *Cement and Concrete Composites*, 124(July). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104272>
- Zhang, B., Tan, H., Shen, W., Xu, G., Ma, B., & Ji, X. (2018). Nano-silica and silica fume modified cement mortar used as Surface Protection Material to enhance the impermeability. *Cement and Concrete Composites*, 92(May), 7–17.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.012>

- Zhang, L., Jia, Y., Shu, H., Lu, X., Bai, F., Zhao, Q., & Tian, D. (2021). The effect of basicity of modified ground granulated blast furnace slag on its denitration performance. *Journal of Cleaner Production*, 305. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126800>
- Zhao, Y., Gao, J., Xu, Z., Li, S., Luo, X., & Chen, G. (2021). Long-term hydration and microstructure evolution of blended cement containing ground granulated blast furnace slag and waste clay brick. *Cement and Concrete Composites*, 118(February), 103982. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103982>
- Zhou, C. H., & Keeling, J. (2013). Fundamental and applied research on clay minerals: From climate and environment to nanotechnology. *Applied Clay Science*, 74, 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.013>
- Žibret, L., Wisniewski, W., Horvat, B., Božič, M., Gregorc, B., & Ducman, V. (2023). Clay rich river sediments calcined into precursors for alkali activated materials. *Applied Clay Science*, 234(January). <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106848>

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ayperi TANIK

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU			
Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İnşaat Müh.	Düzce Üniversitesi	2023
Lisans	İnşaat Müh.	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	2019
Lise		Bolu Atatürk Anadolu Lisesi	2014