

**FARKLI ATIK TİPLERİNİN KLİNKER FAZLARI VE DAYANIMI ÜZERİNE  
ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Perihan ARSEVEN

Danışman

Prof. Dr. Meltem DİLEK

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FARKLI ATIK TIPLERİNİN KLİNKER FAZLARI VE DAYANIMI ÜZERİNE  
ETKİLERİ**

**PERİHAN ARSEVEN**

**DANIŞMAN**

**Prof. Dr. Meltem DİLEK**

**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TEMMUZ 2024**

## TEZ ONAY SAYFASI

Perihan ARSEVEN tarafından hazırlanan “**FARKLI ATIK TİPLERİNİN KLİNKER FAZLARI VE DAYANIMI ÜZERİNE ETKİLERİ**” adlı tez çalışması, lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 31/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Meltem DİLEK İmza

**Başkan** : Dr. Öğr. Üyesi Erten AKBEL İmza

**Üye** : Doç. Dr. İbrahim BULDUK İmza

**Üye** : Prof. Dr. Meltem DİLEK İmza

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

.....  
Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

**beyan ederim.**

**24/07/2024**

**İmza**

**Perihan ARSEVEN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### FARKLI ATIK TIPLERİNİN KLİNKER FAZLARI VE DAYANIMI ÜZERİNE ETKİLERİ

Perihan ARSEVEN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Meltem DİLEK

Türk Çimento Sektörü, enerji gereksinimi ve bertaraf amaçlı olarak tüm atık tiplerini atık yakma lisansı kapasitelerine göre tesislerinde alternatif yakıt veya hammadde olarak kullanabilmektedir. Alternatif yakıt ve hammadde kullanımı ile doğal kaynakların tüketimini azaltmak ana hedefdir. Bu durum çevre kirliliğinin önlenmesi ve enerji tasarrufu açısından yüksek önem arz etmektedir. Bu çalışmada alternatif yakıt olarak ömrünü tamamlamış atık lastik ve ambalaj atıkları kullanılmıştır. Bu atıklar ön işlem olarak parçalama işlemine tabi tutulmuştur. Parçalama işleminin akabinde yanma prosesine doğrudan kalsinatörden beslenerek dahil edilmiştir.

Bu tez çalışmasında farklı oranlarda kullanılan alternatif yakıtların yanmasıyla açığa çıkan küllerin klinker bünyesine doğrudan infiltrasyonu ile değişen klinker kimyası ve dayanıma etkileri ile fosil yakıtlardan farkları incelenmiştir. SEM-EDS, XRD, optik mikroskop, ICP, kalorimetre, karbon-kükürt gibi test cihazları kullanılarak optimum yakıt paçalına karşın optimum hammadde reçete önerisi hazırlanmıştır.

Tüm bu değerlendirmeler sonucunda, %50 alternatif yakıt (%100 aty)-% 50 fosil yakıt kullanılarak üretilen klinkerin diğer karışım oranlarına göre daha verimli olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmada üretilen klinkerin dayanımlarına bakıldığında 2 günlük dayanım sonucu 26.4 MPa, 7 günlük dayanım sonucu 40.6 MPa ve 28 günlük dayanım sonucu 48.5 MPa olarak gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında fosil yakıtlara ek olarak hazırlanan alternatif yakıtlardan atık ambalajın ömrünü tamamlamış atık lastiğe göre daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Alternatif yakıt, atık, XRF, Optik mikroskop

**2024, xiii + 57 sayfa**



## **ABSTRACT**

M. Sc. Thesis

### **KLINKER PHASES OF DIFFERENT WASTE TYPES AND ITS EFFECTS ON STRENGTH.**

Perihan ARSEVEN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Chemical Engineering

**Supervisor:** Prof. Meltem DİLEK

Turkish Cement Sector can use all types of wastes as alternative fuel or raw material in its facilities according to waste combustion licence capacities for energy requirement and disposal purposes. The main goal is to reduce the consumption of natural resources by using alternative fuels and raw materials. This is of high importance in terms of preventing environmental pollution and saving energy. In this research, end-of-life waste tyres and packaging wastes were used as alternative fuels. These wastes are subjected to shredding process as a pre-treatment. Following the shredding process, it is included in the combustion process by feeding directly from the calciner. In this thesis research, the effects of the ash released by the combustion of alternative fuels used in different ratios on the clinker chemistry and strength and the differences from fossil fuels were investigated by direct infiltration into the clinker body. By using test devices such as SEM-EDS, XRD, optical microscope, ICP, calorimetry, carbon-sulphur, an optimum raw material recipe proposal was prepared for the optimum fuel mix.

As a result of all these evaluations, it was seen that clinker produced using 50% alternative fuel (100% rdf) - 50% fossil fuel is more efficient.

When the strengths of the clinker produced in the study were examined, it was observed that the 2-day strength result was 26.4 MPa, 7-day strength result was 40.6 MPa and 28-

day strength result was 48.5 MPa. In the light of these results, it is concluded that waste packaging performs better than alternative fuels prepared in addition to fossil fuels.

**Keywords:** Alternative fuel, waste, XRF, Optical microscope

**2024, xiii + 57 pages**



## TEŐEKKÖRLER

Bu alıőma boyunca benden desteęini hiçbir zaman esirgemeyen çok deęerli danıőman hocam Prof. Dr. Meltem DİLEK'e, deęerli katkılarından dolayı eęitim hayatım sűresince beni her zaman destekleyen baőta eőim aęrı ARSEVEN olmak űzere aileme teőekkűrű bir borç bilirim.

Perihan ARSEVEN

Afyonkarahisar 2024



## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜRLER.....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ .....	xi
1.GİRİŞ.....	1
2.LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	3
2.1 Yakıt.....	3
2.1.1 Fosil Yakıt.....	4
2.1.2. Alternatif Yakıt .....	5
2.2. Atık .....	5
2.2.1 Atık Lastikler.....	6
2.2.2 Ambalaj Atıkları.....	6
2.3 Atık Besleme Noktaları.....	7
2.3.1. Alev Borusu.....	7
2.3.2. İntikal Bölgesi .....	8
2.3.3. Kalsinatör Bölgesi.....	8
2.4 Klinker Üretimi.....	8
2.5 Klinker Fazları .....	9
2.6 Klinker Modülleri .....	10
2.7.1 XRD .....	12
2.7.2 Optik Mikroskop .....	12
2.7.3 SEM -EDS.....	13

2.7.4 Rietveld Metodu.....	13
2.8 Literatür Bilgileri .....	13
3.MATERYAL ve METOD .....	17
3.1. Kalorifik Analiz .....	18
3.2 XRD Analizi .....	21
3.3. Optik Mikroskop Analizi .....	21
3.4 SEM-EDS Analizi.....	23
3.5 Çimento Dayanım Analizi .....	23
4. BULGULAR .....	26
4.1 %25 Alternatif Yakıt - %75 Fosil Yakıt Beslemesi.....	26
4.1.1. Atık Lastik Kullanılarak Üretilen Klinkerin Mikroskop Analizi.....	26
4.1.2. Atık Lastik Kullanılarak Üretilen Klinkerin XRD Analizi .....	30
4.1.3. Atık Lastik Kullanılarak Üretilen Klinkerin SEM-EDS Analizi .....	34
4.2 %75 Alternatif yakıt - %25 Fosil yakıt Beslemesi .....	38
4.3 %50 Alternatif Yakıt (%50 ötl+%50 aty) -%50 Fosil Yakıt .....	42
4.4 %50 Alternatif Yakıt (%100 ötl) -%50 Fosil yakıt.....	45
4.5 % 50 Alternatif Yakıt (%100 aty)-% 50 Fosil Yakıt .....	48
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	51
6.KAYNAKLAR.....	53
7.ÖZGEÇMİŞ.....	57

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

## Kısaltmalar

---

$Al_2O_3$  : Alüminyum oksit

ALM: Alümina modülü

ATY: Atıktan türetilmiş yakıt

$C_2S$ : Belit

$C_3A$ : Alüminat

$C_3S$ : Alit

$C_4AF$ : Ferrit

CaO : Kalsiyum oksit

$CO_2$  : Karbon dioksit

$Fe_2O_3$  : Demir (III) oksit

ICP: Inductively Coupled Plasma

$K_2O$  : Potasyum oksit

KDF/LSF: Kireç doygunluk faktörü/Lime saturation factor

LSF : Kireç Doygunluk Faktörü

MgO: Magnezyum oksit

$Na_2O$  : Sodyum oksit

$NO_x$  : Nitrojen oksit

ÖTL: Ömrünü tamamlamış lastik

S.CaO: Serbest kireç

S. $SiO_2$ : Serbest silika

SEM :Taramalı elektron mikroskop

$SiO_2$  : Silisyum dioksit

SM: Silika modülü

$SO_2$  : Kükürt dioksit

XRD: X-Işını Difraksiyon spektroskopisi

XRF: X-Işınları spektrometresi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 4.1. Referans klinker.....	27
Şekil 4.2. Referans klinker (belit dağılımları).....	27
Şekil 4.3. Referans klinker (serbest kireç görüntüsü).....	28
Şekil 4.4 % 25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinker.....	28
Şekil 4.5 % 25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinker alit üstü belit görüntüsü.....	29
Şekil 4.6 % 25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinkere ait alüminat fazı.....	29
Şekil 4.7 % 25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinkere ait ayrılmamış faz dağılımı .....	30
Şekil 4.8 Referans örneğe ait XRD spektrumu.....	31
Şekil 4.9 % 25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinkere örneğe ait XRD spektrumu-1.....	31
Şekil 4.10 % 25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinkere ait XRD spektrum-2 .....	32
Şekil 4.11 Referans örneğe ait SEM -EDS analizi-1 .....	34
Şekil 4.12 Referans örneğe ait SEM -EDS analizi-2 .....	35
Şekil 4.13 Referans örneğe ait SEM -EDS analizi-3 .....	36
Şekil 4.14 Atık lastik yakılarak üretilen örneğe ait SEM -EDS analizi-1.....	36
Şekil 4.15 Atık lastik yakılarak üretilen örneğe ait SEM -EDS analizi-2 .....	37
Şekil 4.16 %75 Alternatif yakıt- %25 fosil yakıt beslemesi sonucu elde edilen XRD spektrumu.....	39
Şekil 4.17 %75 Alternatif yakıt - %25 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinkerin mikroskop görüntüsü - (Serbest kireç).....	40

<b>Şekil 4.18</b> %75 Alternatif yakıt - %25 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinker mikroskop görüntüsü (Amber belit-saçaklanma).....	41
<b>Şekil 4.19</b> %50 Alternatif yakıt- %50 fosil yakıt beslemesi sonucu elde edilen XRD spektrumu.....	42
<b>Şekil 4.20</b> %50 Alternatif yakıt (%50 ötl+%50 aty) -%50 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinkerin mikroskop görüntüsü (Amber belit).....	44
<b>Şekil 4.21</b> %50 Alternatif yakıt (%50 ötl+%50 aty) -%50 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinkerin mikroskop görüntüsü (Kirlilik).....	44
<b>Şekil 4.22</b> %50 Alternatif yakıt- %50 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinkerin XRD spektrumu.....	45
<b>Şekil 4.23</b> Klinker mikroskop görüntüsü (Kirlilik).....	46
<b>Şekil 4.24</b> Klinker mikroskop görüntüsü (Serbest kireç kümeleri).....	47
<b>Şekil 4.25</b> Klinker mikroskop görüntüsü (Alit ikizlenmesi).....	47
<b>Şekil 4.26</b> %50 Alternatif yakıt- %50 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinkerin XRD spektrumu.....	48
<b>Şekil 4.27</b> %50 Alternatif yakıt (%100 ötl) -%50 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinkerin görüntüsü.....	50

## **ÇİZELGELER DİZİNİ**

	<b>Sayfa</b>
<b>Çizelge 2.1.</b> Bazı alternatif yakıt türlerinin net kalorifik değerleri .....	5

<b>Çizelge 4.1</b> Referans örneğe ait XRD spektrum sonuçları.....	32
<b>Çizelge 4.2</b> % 25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinkere ait XRD spektrum sonuçları-1.....	32
<b>Çizelge 4.3</b> % 25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinkere ait XRD spektrum sonuçları-2 .....	33
<b>Çizelge 4.4</b> Rietveld analiz sonuçları.....	33
<b>Çizelge 4.5</b> Referans örneğe ait SEM -EDS analizi-1.....	35
<b>Çizelge 4.6</b> Referans örneğe ait SEM -EDS analizi-2.....	35
<b>Çizelge 4.7</b> Referans örneğe ait SEM -EDS analizi-3.....	36
<b>Çizelge 4.8</b> Atık lastik yakılarak üretilen örneğe ait SEM -EDS analizi-1.....	37
<b>Çizelge 4.9</b> Atık lastik yakılarak üretilen örneğe ait SEM -EDS analizi-2.....	37
<b>Çizelge 4.10</b> Numunelere ait klinker parametreleri.....	38
<b>Çizelge 4.11</b> Numunelere ait klinker parametreleri ve klinker dayanımları.....	38
<b>Çizelge 4.12</b> %75 Alternatif yakıt- %25 fosil yakıt beslemesi sonucu elde edilen klinkerin XRD sonuçları .....	39
<b>Çizelge 4.13</b> %50 Alternatif yakıt- %50 fosil yakıt beslemesi sonucu elde edilen klinkerin XRD sonuçları.....	43
<b>Çizelge 4.14</b> %50 Alternatif yakıt- %50 fosil yakıt beslemesi sonucu elde edilen klinkerin XRD sonuçları.....	45
<b>Çizelge 4.15</b> %50 Alternatif yakıt- %50 fosil yakıt beslemesi sonucu elde edilen klinkerin XRD sonuçları.....	48
<b>Çizelge 4.16</b> % 50 Alternatif Yakıt (%100 aty)-% 50 fosil yakıt kullanılarak üretilen klinker sonuçları .....	49

## RESİMLER DİZİNİ

<b>Resim 3.1</b> Alternatif yakıt olarak kullanılan atık ambalaj numunesi (ATY).....	18
<b>Resim 3.2</b> Alternatif yakıt olarak kullanılan ömrünü tamamlamış lastik numunesi (ÖTL).....	19
<b>Resim 3.3</b> Atık ambalaj numunesinin öğütülmüş hali .....	19
<b>Resim 3.4</b> Ömrünü tamamlamış lastik numunesinin öğütülmüş hali.....	19
<b>Resim 3.5</b> Öğütme cihazı.....	20
<b>Resim3.6</b> Kalorimetre analiz cihazı .....	20
<b>Resim 3.7</b> XRD analiz cihazı.....	21
<b>Resim 3.8</b> Optik mikroskop cihazı.....	22
<b>Resim 3.9</b> Optik mikroskop için hazırlanan klinker numunesi .....	22
<b>Resim 3.10</b> Harç karıştırma makinesi .....	23
<b>Resim 3.11</b> Şok tablası.....	24
<b>Resim 3.12</b> Numune kür dolabı.....	24
<b>Resim 3.13</b> Eğilme-basınç dayanım test analiz cihazı.....	25

## 1.GİRİŞ

Çimentonun betonda kullanımının çok uzun bir geçmişi olduğu bilinmektedir. Çimentoların endüstriyel üretimi 19. yüzyılın ortalarında, ilk olarak şaftlı fırınlarla başlamış, daha sonra bu fırınların yerini dünya çapında standart ekipman olarak döner fırınlara bırakmıştır. Günümüzde yıllık küresel çimento üretimi 2.8 milyar tona ulaşmıştır ve bu rakamın her geçen yıl artması beklenmektedir (Schneider vd. 2011). Çimento üretimi, küresel inşaat sektöründe kritik bir rol oynar ve bu süreç, hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 1400°C-1500°C) ısıtılmasıyla klinker adında bir ürün elde edilmesini içerir. Bu işlem, enerji tüketimini artırırken aynı zamanda önemli ölçüde karbon emisyonuna yol açar. Günümüzde, modern çimento tesisleri, enerji verimliliğini artırma ve çevresel etkileri azaltma hedefi doğrultusunda çeşitli teknolojiler ve yöntemler geliştirmiştir. Bu yenilikler arasında atık ısı geri kazanım sistemleri ve alternatif yakıt kullanımı gibi stratejiler öne çıkarak, üretim sürecinin sürdürülebilirliğini önemli ölçüde geliştirmektedir (Reddy ve Kumar 2023).

Günümüzde enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği özellikle endüstriyel üretim süreçlerinde büyük öneme sahiptir. Çimento sektörü, enerjinin yoğun olarak kullanılması sebebiyle en çok yakıt ihtiyacı olan sektörlerden bir tanesidir. Artan talepler neticesinde çevresel etkiler, ekonomik faydalar ve enerji verimliliği konuları gündem güne önem arz etmektedir. Bu sebeple son yıllarda, çimento üretimi sırasında ortaya çıkan karbon emisyonlarının azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması amacıyla alternatif yakıt kullanımı giderek artış göstermektedir. Çimento üretim maliyetlerinin yaklaşık %25'ini yakıt, % 14'ünü ise enerji oluşturmaktadır. Çimento endüstrisinde yakıt maliyetlerini düşürmek amacıyla, küresel çapta, atık malzemeler (örneğin, endüstriyel atıklar, geri dönüştürülemeyen atık yağlar, çözücüler, atık plastikler, geri dönüştürülemeyen ambalaj malzemeleri, kirlenmiş topraklar, ticari atıklar ve kentsel katı atıklardan ayrıştırılan parçalar) alternatif yakıtlar veya enerji kaynakları olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Jayaraman 2011). Literatür araştırmalarına göre çimento endüstrisi yüksek enerji kullanımını azaltmak için (enerji maliyetleri tipik olarak Portland çimentosunun üretim maliyetlerinin %30-40'ını temsil eder) ve sürdürülebilir kalkınma için alternatif yakıtlara güvenmektedir. Alternatif yakıt ikamesinin önemli avantajı, yenilenemeyen enerji

kaynaklarının korunması ve atık bertaraf alanlarının azaltılmasıdır (Willitsch vd. 2002). Alternatif yakıtlardan, atık ambalajlar ve atık lastikler, genellikle geri dönüştürülemeyen veya bertaraf edilmesi zor olan malzemeler arasında yer almaktadır. Bu tür atıkların çimento üretiminde alternatif yakıt olarak kullanılması, hem çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamakta hem de yakıt maliyetlerini azaltmaktadır. Atık ambalajlar ve lastikler, yüksek enerji içerikleri sayesinde çimento fırınlarında verimli bir şekilde yanabilirken, aynı zamanda atık yönetimi sorunlarına da sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

Alternatif yakıtlar, geleneksel fosil yakıtlarla kıyaslandığında farklı enerji verimliliği seviyelerine sahip olabilir. Bu, klinker üretim sürecinde gerekli olan enerji miktarını ve yakıtın yanma sıcaklığını etkileyebilir. Aynı zamanda, farklı alternatif yakıtlar, farklı yanma özelliklerine sahiptir. Bu özellikler, fırın içindeki sıcaklık dağılımını, yanma hızını ve yanma sürecinin verimliliğini etkileyebilir. Yakıtın yanma sıcaklığı ve kimyasal bileşimi de , üretilen klinkerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkileyebilir. Bu bağlamda, seçilen alternatif yakıtın proses süreciyle uyumlu olması gerekir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde; yakıt tiplerinin klinker dayanımları üzerine çalışmaların yetersiz olduğu görülmüştür. Bu tez araştırmasında, birden fazla yakıt tipi kullanılmıştır. Ayrıca seçilen alternatif yakıt tipleri farklı oranlarda yakılarak klinker dayanımı üzerine etkisi daha geniş incelenmiştir.

Bu amaçla, Çimsa Afyon fabrikasında ömrünü tamamlamış atık lastik ve ambalaj atıkları alternatif yakıt olarak kullanılmıştır. Atık lastik ve atık ambalajlar farklı oranlarda fosil yakıtlarla analiz edilerek optimum verimli çalışma hedeflenmiştir. Atıkların kullanım öncesi analizleri, kullanımı ile klinker kimyası ve dayanımı üzerine etkileri incelenmiştir. Ek olarak analiz süresince kimyasal, mineralojik ve fiziksel özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi amacıyla X-Işınları spektrometresi (XRF), X-Işını Difraksiyon spektroskopisi (XRD), optik mikroskop, Inductively Coupled Plasma (ICP), kalorimetre, karbon-kükürt gibi test cihazlarından faydalanılmıştır.

## 2.LİTERATÜR BİLGİLERİ

Çimento sektörüne her geçen gün talep artmaktadır. Bu durum da sektördeki yakıtların yönünün alternatif yakıtalara dönmesine neden olmuştur. Daha sürdürülebilir bir çevre için alternatif kaynakların kullanılması, karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) salınımını azaltarak ve atık yönetimini iyileştirerek büyük fayda sağlar. Karbon nötr, atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarının, aynı miktarda CO<sub>2</sub>'nin atmosferden çekilmesi veya emisyonların dengelemesiyle sıfıra indirilmesi anlamına gelir, yani net sıfır karbon salınımıdır. Karbon nötrlüğünü sağlamak için yenilenebilir enerji kullanımı ve enerji verimliliğini artırma gibi stratejiler kullanılmaktadır. Dünya genelinde büyük bir karbon salınımı kaynağı olan çimento sektörü, üretim sürecinde yoğun enerji tüketir ve bu enerji genellikle fosil yakıtlardan sağlanır. Ayrıca, çimento üretiminde kireç taşının kalsinasyonu sırasında önemli miktarda CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleşir. Bu nedenle, çimento sektörünün karbon nötr hale gelmesi için alternatif yakıtların kullanımı büyük önem taşır (Olivier vd. 2021).

### 2.1 Yakıt

Çimento üretiminde kullanılan yakıtlar, yüksek sıcaklıkta klinker üretimi için gerekli olan termal enerjiyi sağlamak amacıyla kritik bir rol oynar. Bu süreç, çimento fırınlarında 1400-1450°C sıcaklıklara ulaşmayı gerektirir ve bu sıcaklıkların elde edilmesi için yüksek enerji içeriğine sahip yakıtlar kullanılır. Çimento üretiminde hem geleneksel fosil yakıtlar hem de alternatif yakıtlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Rahman ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada çimento endüstrisinde alternatif yakıtlar kullanımının, üretim maliyetlerini azalttığı ve tesis performansını artırarak daha yüksek enerji verimliliği sağladığı sonucuna varılmıştır (Rahman vd. 2013). Birincil yakıtlar, doğrudan doğadan elde edilen ve işlenmeden enerji üretiminde kullanılan yakıtlardır. Bu yakıtlar, fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz) ve yenilenebilir enerji kaynakları (hidroelektrik, rüzgar, güneş enerjisi, biyokütle) gibi doğal enerji kaynaklarından elde edilir. İkincil yakıtlar, birincil yakıtların işlenmesi veya dönüştürülmesiyle elde edilen yakıtlardır. Bu yakıtlar genellikle daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve belirli uygulamalar için daha uygun hale getirilmiştir.

### 2.1.1 Fosil Yakıt

Çimento fabrikalarında yakıt olarak genellikle fosil yakıtlar ve petrokok tercih edilmektedir. Fosil yakıtlar arasında kömür, bitümlü şist, fuel oil, doğalgaz taş kömürü ve linyit kömürü bulunmaktadır. Çimento üretiminde fosil yakıtlar ve ya petrokok birincil yakıt olarak kabul edilir. Bu yakıtlar yandıktan sonra ana kül bileşenleri silis ve alüminyum bileşiklerinden oluşur. Bu bileşikler, klinkerizasyon sürecinde hammaddelerle birleşerek klinkerin bünyesine girer ve klinkerin bir parçasını oluşturur. Hammadde bileşen oranlarını ve buna uygun yakıt karışımını hesaplarken bu durumun dikkate alınması hem klinkerizasyon süreçleri hem de son ürün kalite spektleri açısından önemlidir.

Çimento sektöründe yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlar ise petrokok ile yerli ve ya ithal linyittir. Linyit yakıt karışımında petrokoka kıyasla yanmayı kolaylaştıran yakıt olarak kullanılır. Bunun yanı sıra hammadde ile birleştiğinde alkali-kükürt dengesi için de rolü büyüktür. Petrokok başlıca karbondan oluşan siyah renkli katı bir yakıt olup, kükürt elementini, metallerin elementel şekillerini ve uçucu olmayan inorganik bileşikleri içerir (Bahar ve Uysal, 2018). Üretimdeki işlem şartlarına bağlı olarak uçucu madde içeriği çok düşük değerlerden %15 değerine kadar değişebilir (Arin, 2011).

Petrokokun ısı değeri 7500 kcal/kg, ithal taş kömürün ısı değeri 6000-6300 kcal/kg, yerli linyitin ısı değeri 3500-4500 kcal/kg ve yerli taşkömürünün ısı değeri ise 6000 kcal/kg'dır (Bahar ve Uysal, 2018). Petrokok, düşük kül içeriği ve yüksek ısı değeri ile dikkat çeken, petrol rafinasyonundan elde edilen katı bir yakıttır. Petrokok içeriğindeki kükürt muhteviyatı ile linyitten farklılık göstermektedir. İçerdiği kükürt miktarına göre sınıflandırılan petrokok yakıt karışımı belirlenirken hammaddedeki alkali bileşikler ile bağlanması önemlidir. Bu yakıt, bazı durumlarda doğal gaz veya yakıt yağı kadar verimli olabilir. Tipik olarak, kuru bazda standart bir petrokok % 85,5 karbon, % 12,9 uçucu madde ve %1,6 kül içerir. Klinkerin kimyasal özelliklerini açığa çıkan kül miktarı da etkiler. Petrokokta külün az olması çimento kalitesi için istenen bir özelliktir. Dökme olarak ithal edilmekte ve ya Türkiye'deki petrol rafinerilerinden yine dökme olarak tedarik edilmektedir. Çimento sektöründen farklı olarak demir çelik, kireç ve elektrik santralleri gibi bir çok sektörde ısı enerji kaynağı olarak petrokok tercih edilmektedir.

### 2.1.2. Alternatif Yakıt

Alternatif yakıt, atıkların ısıl değer açısından kullanılabilir bölümlerinden elde edilen enerji kaynağıdır. Alternatif yakıt ve hammadde kullanımının artırılması, çevre kirliliğinin azaltılması, doğal hammadde kaynaklarının korunması ve enerji tasarrufu açısından büyük önem taşır (Wojtacha-Rychter vd. 2021). Sıklıkla kullanılan bazı alternatif yakıt türlerinin spesifik enerjileri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

**Çizelge 2.1** Bazı alternatif yakıt türlerinin net kalorifik değerleri (kcal/kg) (Chinyama, 2011)

Yakıt	Net Kalori (kcal/kg)
Petrokok	7500
Polietilen	10900
Hafif akaryakıt	9900
Ağır akaryakıt	9250
Katran	9050
Kauçuk	8560
Atık yağlar	7000-9500
Atık lastikler	7140
Yağlı kontamine atıklar	3500
Bitki kabukları	4760
Atıktan türetilmiş yakıt (ATY)	2800
Solventler	7500
Arıtma çamuru	3000

Çizelge 2.1’den görüldüğü üzere, spesifik enerjileri en yüksek olan alternatif yakıt tiplerine örnek olarak polietilen, akaryakıt ve atık lastikler verilebilir.

### 2.2. Atık

Şehir atıkları, evsel arıtma tesisi çamurları, atık lastikler, ağartma toprakları, petrol atıkları gibi atıkların oluşturdukları çevre kirliliğinin yanı sıra bu atıkların depolanması sırasında geniş alanlara ihtiyaç duyulmaktadır (Tunçez. 2021). Çimento fabrikalarında

alternatif yakıt ve hammadde kullanımının, çevre ve insan sağlığı açısından önemli faydaları bulunmaktadır. Ek olarak, atıkların çimento fabrikalarında değerlendirilmesi ile sürdürülebilir bir atık yönetim sistemi oluşturulmakta, çevreye doğrudan ve/veya dolaylı etkisi olan atıkların uygun bir sistematik içinde imhası sağlanmaktadır (Ordu ve Öztürk. 2017).

### **2.2.1 Atık Lastikler**

Otomobil endüstrisinden gelen atık olan lastikler, yüksek karbon içeriklerinden dolayı kalorisi de oldukça yüksek bir atık türüdür. Ömrünü tamamlamış lastiklerin kontrolü yönetmeliğine göre (ÖTL) atık lastikler çimento fırınlarında Çevre ve Orman Bakanlığında lisans alınarak kullanılabilir ve özel atık olarak tanımlanmaktadır. Bu atıklar, kömür gibi konvansiyonel yakıtlardan daha yüksek ısı değere sahip olup çimento fabrikalarında ikincil yakıt olarak kullanılabilir (European Commission-Directorate.2003). Bu nedenle çimento sektöründe atık lastiklerin kullanımının her geçen gün arttığı bilinmektedir. Atık lastikler haricinde endüstriyel ve kentsel atıların bünyesinde bulunan plastik atıklar, Cl dezavantajları olduğu unutulmadan klinker fırınlarında kullanılabilir.

### **2.2.2 Ambalaj Atıkları**

Atıktan türetilmiş yakıtlara örnek olarak ambalaj atıkları verilebilir. Ambalaj atıkları her türlü ürünün korunması, taşınması sırasında kullanılan karton, plastik, metalik ve cam malzemelerdir. Ambalaj atıkları ticari veya endüstriyel faaliyetler sonucu elde edilebilir. Bu ambalaj atıkları genel olarak doğada çok uzun bir süre bozulmadan kalabildikleri için hem çevre hem de insan sağlığı için çok büyük bir risk oluşturmaktadır. Ambalaj atıklarından kaynaklı bu olumsuz etkileri minimuma indirmek için geri dönüşüm süreçleri önem teşkil etmektedir. Atıktan türetilmiş yakıtlara örnek olarak ambalaj atıkları verilebilir. Ekonomik açıdan bakıldığında, ambalaj atıkları yakıt maliyetlerini düşürerek

Üretim süreçlerinde verimliliği artırabilir. Atıktan türetilmiş yakıtlar endüstriyel proseslerde ikincil yakıt olarak kullanılmaktadır.

### **2.3 Atık Besleme Noktaları**

Çimento retimi, farklı ana proses rotaları, ekipman tasarımları, işletme yöntemleri ve yakıt tüketimi ile çeşitlilik gösterir (European IPPC Bureau, 2011). Çimento reticileri genellikle alternatif yakıtları fiyat ve bulunabilirliklerine göre seçerler; ancak bu seçimde enerji içeriği, nem ve uçucu madde içeriği gibi yakıt bileşiminin diğer özellikleri de son derece önemlidir. Sıvı, katı, yarı katı, toz veya büyük topaklar halindeki alternatif yakıt formları gibi çeşitli form ve özellikler dikkate alınmalıdır. Farklı alternatif yakıt türleri, yakıtın doğrudan fırındaki yanma bölgesine veya ön ısıtma sistemine beslenebilmesi için esnek bir yakıt besleme sistemi gerektirir (Kaantee vd. 2004).

Çimento fabrikalarında atıklar, alev borusu, intikal ve prekalsinatr sistemlerinden beslenebilmektedir. Atıklar döner fırında yakılmadan önce, yakma şartlarına göre hazırlanmaktadır. Atıklar döner fırına atıklar, fırın ana alev borusundan ve kalsinatrden beslenmektedir (Ordu ve ztrk, 2017). Tehlikeli atık grubuna girebilecek olan alternatif kaynakların sadece alev borusundan beslenmesi gerekmektedir. Bir yakıtın sisteme en uygun hangi noktadan beslenebileceğini yakıtın kimyasal kompozisyonu, fiziksel özellikleri (boyut, nem) ve fırın içinde ortalama kalma süresi göz önüne alınarak karar verilmelidir. Fırın içinde kalma süresi uzadıkça, yanmamış malzemenin klinkerle birlikte soğutma ünitesine geçmesi muhtemeldir.

#### **2.3.1. Alev Borusu**

Kalsinatr olmayan n ısıtıcılı sistemlerde alternatif yakıtlar genellikle alev borusundan beslenir. Bu bölgeden beslemesi yapılacak malzemenin hafif olması tercih edilir. Alev borusundan beslenebilecek alternatif yakıtların özellikleri önemlidir. Belirli kalorifik değerde, tane boyutunda, yoğunlukta ve nem içeriğine sahip olması gerekir. Örneğin,

kâğıt, kumaş artığı gibi malzemeler 35 mm'den, ince plastik kıymıkları 20 mm'den, kauçuk gibi sert plastik kıymıkları ise 10 mm'den küçük olmalıdır. Alev borusunda daha fazla alternatif yakıt besleyebilmek için, intikaldeki oksijenin en az %1.5 olması gerekmektedir.

### **2.3.2. İntikal Bölgesi**

Ön ısıtıcı sistemleri olan tesislerde, alternatif yakıt besleme noktası olarak tercih edilen intikal bölgesinde tehlikeli atık grupları sisteme beslenememektedir. Alev borusu bölgesine göre daha düşük sıcaklığı olan intikal bölgesinde, tüm yanma işlemi 95<sup>0</sup>C de bitebilecek olan alternatif yakıtlar tercih edilmelidir. Atıktan türetilmiş yakıtlardan elde edilen peletler ya da ömrünü tamamlamış tüm veya parçalanmış lastikler bu bölgeden sisteme beslenebilirler (Jayaraman 2011).

### **2.3.3. Kalsinatör Bölgesi**

Kalsinatörü büyük/geniş olan sistemlerde, beslenecek atığın parça boyu daha büyük, sistemde kalma süresi daha uzun olabilmektedir. Yapılan incelemeler sonucu, kalsinatör bölgesinde verimli bir alternatif yakıt beslenmesi yapılırsa, bu bölgede kömürsüz kalsinasyona geçilebilmesinin mümkün olacağı tespit edilmiştir. Çatı izolasyonunda kullanılan keçeler, çeşitli damıtma arıtmalarından kalan atıklar ve atıktan türetilmiş yakıtlar bu bölgeden beslenebilmektedirler. İnce taneler pnömatik sistemlerle beslenirken, tane boyu daha iri olan atıklar mekanik yöntemlerle beslenmelidir (Theulen 2015).

## **2.4 Klinker Üretimi**

Çimento üretim süreci, temel olarak taş ocağından çıkarılan malzemelerin farin hazırlama, farinin ön ısıtılması, fırın işlemi, klinker soğutma, öğütme, depolama ve sevkiyat aşamalarını içerir. Klinker, daha sonra alçı ve diğer katkı maddeleriyle birlikte

öğütülerek çimento haline getirilir. Kalsinasyon sürecinin gerçekleştiği ön ısıtıcı kulesi ve klinkerleştirme işlemi sırasında termal enerji üretimi için yakıtlar kullanılır (Rahman vd. 2013).

Önceden kalsine edilmiş ham maddeler yaklaşık 1000°C sıcaklıkta fırına girer. Yakıt olarak kömür, petrokok, gaz, petrol ve alternatif yakıtlar kullanılabilir. Bu kalsine edilmiş ham maddeler 1450°C' ye kadar malzeme sıcaklıklarına ulaşması için döner fırına beslenir. Fırın dakikada yaklaşık 3-5 kez döner ve hammadde fırının giderek daha sıcak bölgelerinden aleve doğru akar. Yoğun ısı, farini kısmen eriterek klinkere dönüştüren kimyasal ve fiziksel reaksiyonlara neden olur. Hammaddenin toz olarak değil (kuru fırınlarda olduğu gibi) ıslak bulamaç olarak beslendiği ıslak fırınlar gibi daha eski ve çok daha az verimli teknolojiler de mevcuttur. Fırından çıkan sıcak klinker, bir kısmı yanma havası olarak kullanılabilen büyük miktarlarda hava kullanılarak soğutulur. Soğutucular, çimentonun performansını belirleyen klinker minerallerinin oluşturulması için gereklidir (Cembureau 2019).

## **2.5 Klinker Fazları**

Öğütülmüş kalker ve diğer hammaddeler belirli oranlarda karıştırılmakta ve döner fırınlarda pişirildikten sonra klinker elde edilmektedir. Çimentonun ana malzemesi olan yarı mamul klinker ve istenilen çimento çeşidine göre alçı taşı, tras, kül, demir gibi diğer katkı maddeleri ile karıştırılarak çimento değirmeninde öğütülmesiyle toz halindeki bağlayıcı olan çimento elde edilmektedir (Bilgin ve Koç 2013). Alternatif yakıtların uygulanmasındaki potansiyel kısıtlamalardan biri, yanma yan ürünlerinin klinkere dahil olması nedeniyle nihai klinker bileşimidir (Chinyama 2011). Ham madde karışımının sinterleme sırasındaki reaksiyon dizisi, sırasıyla C<sub>3</sub>S (alit), C<sub>2</sub>S (belit), C<sub>3</sub>A (aluminat) ve C<sub>4</sub>AF (ferrit) gibi ana klinker fazlarına dönüşen düzenli ara bileşiklerin oluşumu ve ayrışmasıyla hem katı hem de likit faz mekanizmalarını kapsamaktadır. Tipik bir Portland çimentosu klinkeri bileşiminin %90'ından fazlası, karma oksit formundaki dört ana bileşen tarafından oluşturulmaktadır.

Endüstriyel döner fırınlarda yüksek sıcaklıklarda (1350-1450 °C) gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda aşağıdaki klinker mineral fazları oluşmaktadır (Tsakiridis vd. 2014).

Alit (C<sub>3</sub>S) en önemli klinker mineralidir çünkü nihai uygulamada basınç dayanımının gelişimine en büyük katkıyı sağlar (Höckfors vd. 2015). Alüminatlar, ferritler ve alüminaferritler içeren klinker fazları çimento kimyası bağlamında tipik olarak C<sub>3</sub>A ve C<sub>4</sub>AF olarak ifade edilir (Taylor 1997).

Klinker bünyesinde % 40-70 oranında alit (C<sub>3</sub>S) fazı olabilmektedir. Alit, hidrolik reaksiyonun hızlı gelişmesini sağlayan ve çimento dayanımı ile hidrasyon ısısını kontrol eden faz olarak nitelendirilmektedir. 1250 °C'nin altında sabit bir soğutma hızının (yavaş olmamak kaydıyla), belli sıcaklıklara kadar kararlılığını korumaktadır. Soğutma hızı çok yavaş olduğu takdirde ise alitin (C<sub>3</sub>S) bir kısmı çözünmekte ve belit (C<sub>2</sub>S) oluşmaktadır (Korkmaz 2021). Katı eriyik fazları ve silikat fazları klinker fazlarını iki gruba ayırmaktadır. Silikat fazları C<sub>3</sub>S (Alit), 3CaO.SiO<sub>2</sub>; C<sub>2</sub>S (Belit) 2CaO.SiO<sub>2</sub>; katı eriyik fazlar, 3CaO. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; C<sub>3</sub>A (Tri kalsiyum alüminat), C<sub>4</sub>AF 4CaO. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; (tetrakalsiyum alüminaferrit) (Bullerjahn vd. 2014). Klinker ana fazlarının miktarları Bogue formülleri, mikroskop ve XRD Rietveld analizi ile tespit edilmektedir.

## 2.6 Klinker Modülleri

İstenilen özelliklerde klinker üretimi için, her fabrikanın kendisine özel olan hammadde karışım oranlarının belirlenmesinde kullanılan kalite parametreleri bulunmaktadır. Fabrikalar tarafından takip edilen kalite parametreleri:

Kireç Doygunluk Faktörü (Lime Saturation Factor, LSF): Klinker hammadde karışımının hazırlanmasında, klinker fazlarının oluşabilmesi için gerekli olan CaO miktarının tespiti için kullanılan kalite parametresidir.

$Al_2O_3/Fe_2O_3$  oranının 0.64'ten büyük olduğu durumlarda aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$LSF = \frac{Cao}{2.8SiO_2 + 1.65Al_2O_3 + 0.35Fe_2O_3} \quad (2.1)$$

$Al_2O_3/Fe_2O_3$  oranının 0.64'ten küçük olduğu durumlarda aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$LSF = \frac{Cao}{2.8SiO_2 + 1.1Al_2O_3 + 0.7Fe_2O_3} \quad (2.2)$$

Silika Modülü (SİM; SM) ise klinker oluşumu esnasındaki katı/sıvı oranını gösterir ve aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2.3)$$

Silika modülünün yüksek olması pişme zorluğuna, yakıt tüketiminin, toz miktarının artmasına ve çimentonun donma ve priz sürelerinin uzamasına neden olmaktadır.

Alümina Modülü (ALM) sıvı evrenin bileşimini belirlemektedir. Alümina modülü aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$ALM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (2.4)$$

Alümina modülünün düşük olması klinkerde sadece ferrit ( $C_4AF$ ) fazının oluşmasına, alüminat ( $C_3A$ ) fazının oluşmamasına neden olmaktadır (TCMB 2003).

## 2.7 Enstrümental Analizler

Klinkerler, çimento üretiminde temel hammaddelerin fırın işlemi sonucunda oluşan bileşiklerdir. Klinkerin bileşimi üzerinde detaylı bir inceleme sağlanması, çimento kalitesini etkileyen minerallerin varlığını, miktarını ve dağılımını belirler. Klinker bileşimi üzerinde yapılan analizlere örnek olarak XRD, SEM-EDS ve optik mikroskop

verilebilir. Bu analizler, klinkerin kimyasal bileşimini belirlemek için önemlidir; çünkü bu bileşim, nihai çimento ürününün kalitesini, dayanıklılığını ve performansını belirleyen temel faktörlerden biridir.

### **2.7.1 XRD**

XRD; jeolojide minerallerin ve kayaların tanımlanmasında, metal ve alaşım analizlerinde, seramik ve çimento sanayiinde, ince film kompozisyonu tayininde, polimer analizlerinde ve sentezlenen malzemelerin yapısının aydınlatılmasında kullanılır. XRD cihazı, çok az miktardaki numunelerin (sıvı, toz, kristal ve ince film halinde) analiz edilmesine olanak tanır. Analiz için gelen numuneden homojen bir örnek alınır. XRD kırınım deseninin pik pozisyonları, minerallerin nitel olarak tanımlanması için gerekli bilgileri sağlar. Pik şiddetleri ise kristal yapısı, örgüsü ve numunedeki mineral miktarları hakkında bilgi verirken, pik şekilleri kristaller ve gerinim hakkında bilgi sunar. Çimento hammaddeleri ve çimento üretim sürecinin farklı aşamalarında pişen malzemede oluşabilen arkanit, spurrit, langbeinit, silvit gibi minerallerin tespitinde ve mineralojik analizlerinde de kullanılmaktadır (TCMB, 2013)

### **2.7.2 Optik Mikroskop**

Alit ( $C_3S$ ), belit ( $C_2S$ ), alüminalit ( $C_3A$ ), ferrit ( $C_4AF$ ) gibi çimento klinkerindeki kristal yapılar optik mikroskop altında gözlemlenebilir ve tanımlanabilir. Bu kristallerin şekil, büyüklük ve dağılımı, klinkerin fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında bilgi verir. Alınan numunelerde erken dayanım, geç dayanım, kirlilik, renk özellikleri ve priz alma süresiyle ilgili yorumlar yapılabilir. Örneğin; çimento mukavemetinin ana kaynağı olan alit ( $C_3S$ ) fazı erken dayanımda etkili olup, kristal yapıları genellikle altıgen levha şeklinde ve köşelidir. Belit ( $C_2S$ ) fazı ise alitlerin aksine dairesel bir şekle sahiptir ve uzun süreli dayanımda etkilidir. Dağılımları ise klinker soğutma ünitesinin performansı hakkında yorum kabiliyeti kazandırır. Hızlı soğutma, yavaş soğutma gibi durumlarda klinkerdeki bu fazlar doğrudan etkilenir ve son ürün kalitesinde kendini gösterir. Ferrit fazı da koyu renk klinker oluşumunu destekler.

### 2.7.3 SEM -EDS

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), ışık yerine elektronları kullanarak görüntü oluşturan ve malzemelerin çok yüksek ölçekli büyütmelerde incelenmesini sağlayan bir cihazdır. SEM cihazları, genellikle 10 kat ile 500.000 kat arasında değişen geniş bir büyütme yelpazesi sunar. Bu geniş büyütme aralığı, numunenin yüzeyindeki mikroskobik ve nanometrik detayların incelenmesini mümkün kılar. Bu mikroskop, topografik yüzey incelemeleri, morfolojik analizler, şekil ve boyut analizleri, malzeme kompozisyonunun belirlenmesi ve kristalografi gibi alanlarda kullanılır.

### 2.7.4 Rietveld Metodu

Rietveld metodu, kristal yapıların X-ışını toz difraksiyon verileri kullanılarak belirlenmesinde, deneysel ve teorik difraksiyon verilerinin en iyi uyumunu sağlayacak şekilde optimize edilen parametreler üzerinden çalışan bir analiz tekniğidir (Rietveld, 1969). Çimentoda bulunan klinker fazlarını belirlemek için kullanılır. Bu fazlar arasında alit (C3S), belit (C2S), trikalsiyum alüminat (C3A) ve tetrakalsiyum alüminoferrit (C4AF) bulunur. Ek olarak farklı fazların oranlarını belirlemek ve herhangi bir faz karışımını analiz etmek için kullanılır.

## 2.8 Literatür Bilgileri

Mokrzycki ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada; çimento klinkeri üretiminde fosil yakıtların alternatif yakıtlarla ikame edilmesi ile fosil yakıt rezervlerini koruduğu ve biyojenik atıklar söz konusu olduğunda sera gazı emisyonlarını azalttığına vurgu yapmıştır. Buna ek olarak, alternatif yakıtların kullanımının çimento üretim maliyetlerinin düşürülmesine yardımcı olabileceğini öngörmüştür. Bu çalışmada, birçok çimento fabrikasının kullandığı fosil yakıtın bir kısmının atık geri kazanılmış yakıtlar gibi alternatif yakıtlarla değiştirilebileceğini göstermiştir. Çalışmanın özetinde atıkların çimento fabrikaları tarafından alternatif yakıt olarak kullanılmasının hem ekolojik hem de ekonomik açıdan faydalı olduğunu göstermiştir. Döner fırınlardaki yüksek sıcaklık,

gaz akışının yüksek hızı ve uzun partikül depolama süresi gibi koşulları incelemiş ve alternatif yakıtların kullanımının ekolojik açıdan güvenli olduğu sonucuna varmıştır. Ek olarak çalışmada yakıt olarak kullanılan atığın maliyeti fosil yakıtların maliyetini aşmadığına vurgu yapmıştır (Mokrzycki 2003).

Rahman ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada; geçmişte yapılan araştırmalar ile fosil yakıtlarla birlikte farklı alternatif yakıt türlerinin uygun karışımlarını kullanarak maksimum fayda elde edilebileceğini incelemiştir. Yapılan analizler, alternatif yakıtların kullanımının CO<sub>2</sub> ve diğer emisyonların (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, toz) azaltılmasına katkı sağlayabileceğini ve termal enerji tüketimini düşürebileceğini göstermektedir. Ancak, bu etkinin büyüklüğünü belirlemek için spesifik tesis verilerine dayalı kapsamlı çalışmalar yapılması gerekmektedir. Mevcut literatür, atık yüzdeleri ile tesis performansı arasındaki ilişkiyi net bir şekilde ortaya koymakta yetersiz kaldığından daha fazla araştırma yapılması gerektiğini vurgulamaktadır (Rahman, 2013).

Strigáč çalışmasında; çimento üretiminde kullanılan alternatif yakıtların ve hammaddelerin klinker kalitesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Klinker kalitesi, alit (C<sub>3</sub>S) ve belit (C<sub>2</sub>S) içerikleri ile değerlendirilmiştir. Araştırma, alternatif yakıt külü ve hammadde ilavelerinin genellikle belit içeriğini artırıp alit miktarını azalttığını göstermektedir. Kullanılan alternatif yakıtlar arasında et-kemik unu, kanalizasyon çamuru ve kağıt çamuru yer alırken, alternatif hammaddeler metalürjik cüruflar akışkan yataklı yanma uçucu külü ve atık cam olmuştur. Akışkan yataklı yanma uçucu külü, çimento klinkeri üretiminde istenmeyen anhidrit (CaSO<sub>4</sub>) oluşumu nedeniyle uygun olmayan bir alternatif hammadde olarak değerlendirilmiştir. Genel olarak, test edilen tüm alternatif yakıtlar ve hammaddeler klinker fazlarının gelişimini önemli ölçüde etkilemiştir. Yüksek SiO<sub>2</sub> içeriği, belit miktarını artırırken, artan alkali miktarı reaktif ortorombik C<sub>3</sub>A'nın oluşumunu teşvik etmiştir. Et-kemik unu, kanalizasyon çamuru ve kağıt çamuru, klinker üretimi için orta derecede uygun olarak değerlendirilmiştir (Strigáč, 2015).

Serrano-González ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada; çimento endüstrisinde alternatif yakıtların kullanımı, ekolojik ve ekonomik avantajları nedeniyle giderek artan bir öneme sahip olduğuna vurgu yapmaktadır. Bu çalışma, beş farklı alternatif yakıtın sekiz endüstriyel klinker numunesinin reaktivitesi üzerindeki etkilerini çeşitli analitik

tekniklerle incelemektedir. Klinker numuneleri arasında belirgin farklılıklar tespit edilmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) spektroskopisi analizleri, alit ( $C_3S$ ) ve trikalsiyum alüminat ( $C_3A$ ) fazlarında, özellikle erken hidrasyon ve mukavemetle ilişkili hafif değişiklikler göstermiştir. Kalori sonuçları, düşük  $SO_3$  içeriğine sahip klinkerlerde sülfat tükenme piki ve kimyasal katkı maddelerinin davranışında değişiklikler olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, modifiye klinkerlerin kullanımında katkı maddesi dozajının ayarlanması gerektiğini işaret etmekte ve gelecekteki araştırmalara ışık tutmaktadır (Serrano-González vd. 2017).

Chatterjee ve Syi'nin yaptığı bir çalışmada; çimento üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik artan baskıların, alternatif yakıtların araştırılması ve geliştirilmesine odaklanılmasına neden olduğuna vurgu yapılmıştır. Çimento döner fırınlarının doğal özellikleri, normalde diğer proseslerde yasaklanan birçok yakıtın kullanımına olanak tanımaktadır. Bu çalışma, kullanılmış karbon astar, endüstriyel yağlar ve kullanılmış lastikler gibi üç alternatif yakıtın süreç modellemesi ve simülasyonu yoluyla değerlendirilmesini ele almaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre,  $CO_2$  emisyonu açısından endüstriyel yağlar en iyi seçenek olarak belirlenirken, kullanılmış karbon kaplama en kötü seçenek olmuştur. Bununla birlikte, kullanılmış karbon astar, yem malzemesi gereksinimlerini %15'e kadar azaltabilir. Fırın emisyonları ve ağır metallerin varlığı normlar dahilinde kalmakta, ancak uçucu bileşikler ve klor bileşikleri gibi faktörler süreç etkilerini artırmaktadır. Klinkerin mikro yapısında, özellikle alit kristal boyutları ve matris fazında önemli değişiklikler gözlemlenmiştir. Alkali alüminat oluşumu ve alkalinin belit fazına dahil olması da belirli operasyonel koşullar altında olasıdır. Bulguların doğrulanması için daha fazla araştırma önerilmektedir (Chatterjee ve Syi 2019).

Chatziaras ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada; klinker pişirme prosesi için çeşitli alternatif yakıtların kullanımının oldukça uygun olduğuna vurgu yapmaktadır. Çalışmada bu yakıtların kullanımı için ürün kalitesini korurken proses kontrolünü optimize etmeye odaklanılmıştır. Çalışma, birçok çimento fabrikasının fosil yakıtların bir kısmını atık geri kazanılmış yakıtlarla değiştirdiğini göstermektedir. Bu değişim, enerji maliyetlerini düşürerek fabrikalar için rekabet avantajı sağlamaktadır. Aynı zamanda, atık miktarının azalmasıyla daha az çöp sahası kullanılmakta ve çevreye olan olumlu etkiler artmaktadır.

Döner fırınlardaki yüksek sıcaklık ve gaz akışı gibi koşullar, alternatif yakıtların ekolojik açıdan güvenli bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Çimento endüstrisinde birlikte işleme, atıklardan enerji ve malzeme geri kazanımı için en uygun yöntem olarak görülmekte ve sıkı kontrol altında yenilenemeyen kaynakların toplumsal atıklarla ikame edilmesi, hem toplum hem çevre hem de endüstri için güvenli bir çözüm sunmaktadır. Alternatif yakıtların maliyeti, fosil yakıtların maliyetini aşmamaktadır, bu da ekonomik bir avantaj sunmaktadır (Chatziaras vd. 2014).



### 3.MATERYAL VE METOD

Alternatif yakıt olarak ömrünü tamamlamış lastik ve ambalaj atıkları Afyon çevresinden temin edildikten sonra analize hazır edilmek için öğütüldü. Atıklar heterojen bir şekilde temin edildi ve analize uygun hale getirildi. Akabinde kalorifik analizleri ve klinker bünyesine etki edecek bileşenleri tespit etmek için yüksek sıcaklık fırınlarında yakılıp külü elde edildi.

1. %25 Alternatif yakıt (%50 ötl+%50 aty) - %75 Fosil yakıt

Yapılacak ilk analizde % 25 alternatif yakıt, % 75 fosil yakıt kullanıldı. % 25 alternatif yakıt içeriği ise, % 50 ömrünü tamamlamış lastik, % 50 atık ambalajdan oluşmaktadır.

2. %75 Alternatif yakıt (%50 ötl+%50 aty) - %25 Fosil yakıt

Yapılacak ikinci analizde % 75 alternatif yakıt, % 25 fosil yakıt kullanıldı. % 75 alternatif yakıt içeriği ise, % 50 ömrünü tamamlamış lastik, % 50 atık ambalajdan oluşmaktadır.

3. %50 Alternatif yakıt (%50 ötl+%50 aty) -%50 fosil yakıt

Yapılacak üçüncü analizde ise, % 50 alternatif yakıt, % 50 fosil yakıt kullanıldı. % 50 alternatif yakıt içeriği ise, % 50 ömrünü tamamlamış lastik, % 50 atık ambalajdan oluşmaktadır.

4. %50 Alternatif yakıt (%100 aty) -%50 fosil yakıt

Yapılacak bir diğer analizde ise, % 50 alternatif yakıt, % 50 fosil yakıt kullanıldı. %50 alternatif yakıt içeriği ise, % 100 ömrünü tamamlamış lastikden oluşmaktadır.

5. %50 Alternatif yakıt (%100 ötl) -%50 fosil yakıt

Yapılacak son analizde ise, % 50 alternatif yakıt, % 50 fosil yakıt kullanıldı. %50 alternatif yakıt içeriği ise, % 100 atık ambalaj olarak belirlendi.

Yapılacak tüm analizlere pişme deneyleri gerçekleştirildi. Pişme deneyleri kademeli olarak 1000°C' den 1500°C'ye kadar sıcaklıkta 20 °C/dk ısıtma hızında pişme deneyleri gerçekleştirildi. Yapılan deneyler için elde edilen klinkerin XRD analizleri PANALYTICAL - CUBIX cihazı kullanılarak optik mikroskop görüntüleri ise LEICA MICROSCOPE DM- 2700 cihazı kullanılarak çekildi. Örnekler üzerinde yapılan XRD

analiz sonuçları Rietveld metodu ile işlenerek klinkerin minerolojik kompozisyonu bulundu. Yapılacak tüm analizler sonucu üretilen klinkere dayanım testleri uygulandı.

Analizlerin tamamı Çimsa Çimento Ar-Ge ve Afyon Fabrika Kalite Laboratuvarlarında gerçekleştirildi. Endüstriyel deneme sürecine dahil edilecek karışım seçildiğinde Afyon Çimento San. T.A.Ş. döner fırınında endüstriyel denemeler gerçekleştirildi ve XRD, optik mikroskop, çimento dayanım testleri ve kalorifik analizler için Kalite Laboratuvarı ve Çimsa Beton laboratuvarları kullanıldı.

### 3.1. Kalorifik Analiz

Kalorifik analiz, bir yakıtın enerji içeriğini belirlemek için yapılan bir analiz türüdür. Yakıtın yanmasıyla açığa çıkan ısının miktarını ölçmeye odaklanır ve yakıtın verimliliği hakkında bilgi verir. Kalorifik analiz için, LECO-AC 500 cihazı kullanıldı. Tüm kalorifik analizlerde 0.5-1 gram numune ve 12 cm yakma teli tartıldı. Bu numune ile kalorifik analiz için katı yakıt tableti yapıldı. Numune cihaza yerleştirildi. 5 ml saf su eklenerek, 30-35 atmosfer basınçta oksijen gazı ile dolduruldu. Kalorimetre suyu ayarlanarak bilgiler bilgisayara girildi. Tüm kalorifik analizler bu şekilde gerçekleştirilmiştir.



**Resim 3.1** Alternatif yakıt olarak kullanılan atık ambalaj numunesi (ATY)



**Resim 3.2** Alternatif yakıt olarak kullanılan ömrünü tamamlamış lastik numunesi (ÖTL)



**Resim 3.3** Atık ambalaj numunesinin öğütülmüş hali



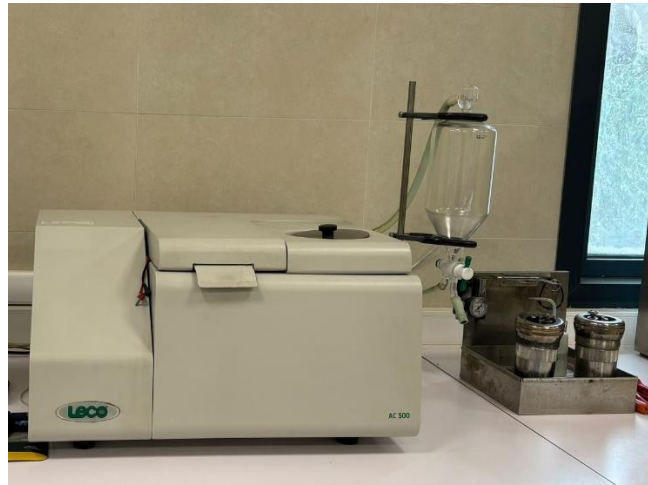
**Resim 3.4** Ömrünü tamamlamış lastik numunesinin öğütülmüş hali

Çalışmalarda alternatif yakıt olarak kullanılan atık ambalaj ve ömrünü tamamlamış lastik numunesi Resim 3.1 ve Resim 3.2 de verilmiştir. Ömrünü tamamlamış lastik ve atık ambalaj numuneleri bir çimento fabrikasından temin edilmiştir. Numuneler analiz için uygun boyutlara getirilmesi amacıyla öğütme işlemine tabii tutuldu. Bu işlem için Resim 3.5 de görülen RETSCH SM-300 cihazı kullanıldı. Öğütme işlemi 60 sn süreyle RETSCH cihazında gerçekleştirildi. Numunelerin öğütme işlemi sonrası görüntüleri Resim 3.3 ve Resim 3.4 de yer almaktadır. Öğütme sonrası numune boyutları 10 mm olarak ayarlandı.



**Resim 3.5** Öğütme cihazı

Öğütme işlemi sonrası kalorifik analiz için numuneler Resim 3.6' da yer alan LECO AC-500 kalorimetre cihazına alındı. Kademeli olarak 1000°C' den 1500°C'ye kadar 20 °C/dk ısıtma hızında pışme deneyleri gerçekleştirildi.



**Resim 3.6** Kalorimetre analiz cihazı

Yapılan analizler sonucu ömrünü tamamlamış lastik için kalori 6350 kcal/kg ; atık ambalaj için ise 6530 kcal/kg olarak bulunmuştur.

### 3.2 XRD Analizi

XRD analizi için numuneler 2 °C/dk hızında ısıtma işlemine tabii tutuldu. Analiz cihazı olarak Resim 3.7’ de yer alan PANALYTICAL – CUBIX3 cihazı kullanıldı. Dalga boyu 7-70 λ olarak belirlendi.



**Resim 3.7** XRD analiz cihazı

### 3.3. Optik Mikroskop Analizi

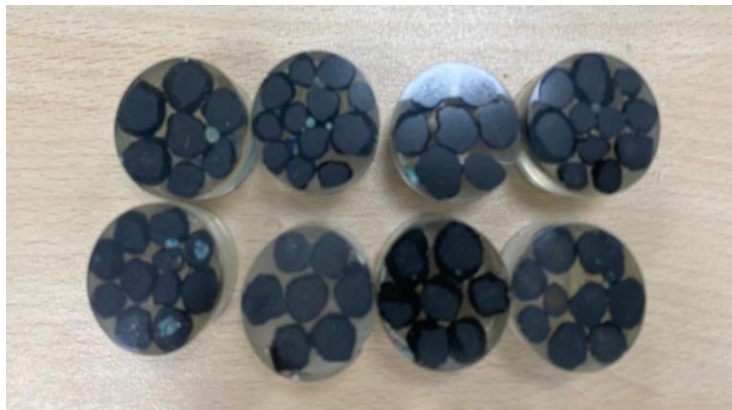
Üretilen klinkerlerde optik mikroskop kullanımı, mikroyapısal bileşenlerin incelenmesi ve klinkerin kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla yapıldı. Optik mikroskop analizi için Resim 3.8’ de görülen LEICA MICROSCOPE DM- 2700 cihazı kullanıldı.

Analiz için 50 gram klinker numunesi alındı. Ardından reçineye gömme işlemi uygulandı. Öğütülmüş numunenin reçine ile gömülmesi, kesme ve parlatma işlemlerine hazır hale getirilmesi için gereklidir. Bu işlem için 2 gram numune kullanıldı. Bu aşamada öğütülmüş numune, bir kalıp içerisinde reçine ile gömülerek sertleştirildi. Ardından numunelere kesme ve parlatma işlemi uygulandı. Bu kesme işlemi reçine sonrası

sertleşmiş numunenin uygun kesme aletleri ile kesilmesini kapsar. Uygun boyutlarda kesilen numunelerin yüzeyi zımparalanarak parlak hale getirildi. Resim 3.9’ de kesme ve parlatma işlemleri sonrası analiz için hazır hale gelen numuneler görülmektedir. Parlatici olarak METKON – FORCIPOL 300 cihazı kullanıldı. Ardından hazırlanmış numune, mikroskop sahasına yerleştirilerek odaklandırıldı. 20x büyütme sağlanarak numuneler üstten aydınlatmayla görüntülendi.



**Resim 3.8** Optik mikroskop cihazı



**Resim 3.9** Optik mikroskop için hazırlanan klinker numunesi

### 3.4 SEM-EDS Analizi

SEM-EDS analizleri, malzemelerin mikroyapısal ve kimyasal bileşimlerini detaylı bir şekilde incelemek için kullanılır. SEM, malzemenin yüzey morfolojisini ve iç yapısını görüntülerken, EDS bu görüntülerin kimyasal bileşimini analiz eder. SEM-EDS analizleri sonucu üretilen klinkerin yüzey yapısı incelenmektedir. Atıklardan yanma sonucu elde edilen klinkerin dış yapısı belirlenir. Bu analizler Mersin Üniversitesi Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

### 3.5 Çimento Dayanım Analizi

Farklı alternatif ve fosil yakıt yakılarak elde edilen klinker numunelerinin 2 , 7 ve 28 günlük dayanımları tespit edilmiştir. Bu analiz sonucu, alternatif yakıt kullanımının klinker dayanımı üzerine etkisi yorumlandı. Numuneler Resim 3.10' da yer alan çimento harç karıştırma makinesi yardımıyla hamur kıvamına geldi. Resim 3.1'de hazırlanan numuneler prizma şeklini alması amacıyla cihaza yerleştirildi. Dayanım testleri için kullanılan prizma numunelerinin boyutları 40 cm x 5 cm olarak belirlenmiştir.



**Resim 3.10** Harç karıştırma makinesi



**Resim 3.11** Şok Tablası

Numune türü olarak standart prizma numuneler kullanıldı. Numuneler prizma kalıplara yerleştirildi. Kalıplar, en kesitleri 40 mm x 40 mm ve uzunlukları 160 mm olacak şekilde standartlara uygun olarak hazırlandı. Numuneler kalıptan çıkartılmaksızın, sıcaklığı (20,0 ± 1,0) °C ve bağıl nem oranı en az % 90 olan rutubetli kür dolabında kürlenme süreleri boyunca bekletildi.



**Resim 3.12** Numune kür dolabı

Numunelerin tutulduğu kür tank havuzu Resim 3.12’ de görülmektedir. Kür işlemi, çimentonun hidrasyon reaksiyonlarının tamamlanması ve nihai dayanımını kazanması

için gerekli olan nem ve sıcaklık koşullarının sağlanmasını amaçlar. Numunelerin su içerisinde küre tabii tutulması için kullanılan kür tankları ve bu tanklara yerleştirilen ızgaralar, çimentoyla tepkimeye girmeyecek malzemelerden oluşmaktadır. Kürleme sırasında suyun sıcaklığı  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$  da sabit tutuldu. Çalışma yapılan her bir numune için ayrı ayrı numuneler hazırlanarak hepsi numune kür dolabına yerleştirildi ve eğilme-basınç dayanım test cihazına tabii tutuldu.



**Resim 3.13** Eğilme-basınç dayanım test analiz cihazı

Numune kür dolaplarında bekletilen sertleşmiş prizma numune, Resim 3.13' de görülen eğilme-basınç dayanım test cihazına yerleştirildi. Analizlerin tümü için TONI-TECHNIC 2016 marka dayanım test cihazı kullanıldı. Numune iki destek noktası arasında yerleştirildi ve numunenin kırıldığı noktadaki maksimum yük değeri kaydedildi. Eğilme altında kırılana kadar yük uygulandı. Eğilme dayanımı tayini için kullanılan deney cihazı, 10 kN yükleme kapasitesinde seçilerek,  $(50 \pm 10) \text{ N/s}$  yükleme hızını sağlandı. Eğilme dayanımı MPa cinsinden hesaplandı.

Eğilme ve basınç dayanım testleri, üretilen çimento ve betonda istenen kalite standartlarının sağlanıp sağlanmadığını kontrol etmek için kullanılır. Tüm bu işlemler TS EN 196 standartına uygun olarak gerçekleştirildi.

## 4. BULGULAR

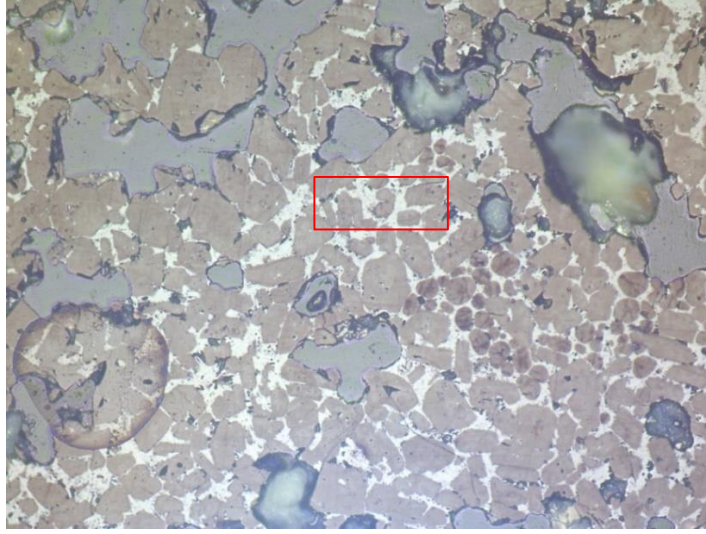
Bu çalışmada farklı oranda alternatif yakıt ve fosil yakıt kullanılarak yapılan bu çalışmada beslenen atıkların klinker mikro yapısı ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Klinker mikro yapısı ve fiziksel özelliklerinin incelenmesinde XRD, SEM-EDS ve optik mikroskopik analizlerinden yararlanılmıştır. Çimento üretiminde en uygun alternatif yakıt ve oranı belirlenmiştir.

### 4.1 %25 Alternatif Yakıt - %75 Fosil Yakıt Beslemesi

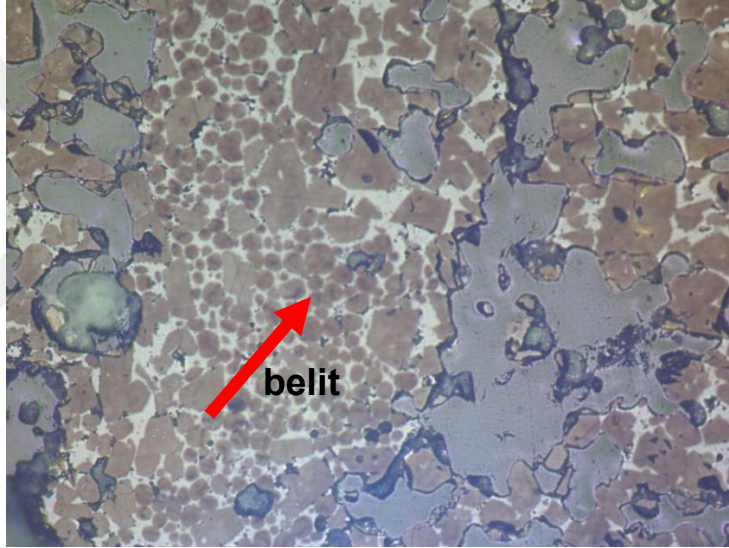
Yapılan ilk incelemelerde referans klinker ile %25 alternatif yakıt, % 75 fosil yakıt ile üretilen klinkerler kıyaslanmıştır. % 25'lik alternatif yakıt içeriğinde ise %50 oranında ömrünü tamamlamış lastik ve %50 oranında atık ambalaj kullanılmıştır. Referans klinkeri revizyondan sonra üretilen klinkeri temsil etmektedir. Revizyon süreci, üretim tesislerinde verimliliği artırmak, kaliteyi iyileştirmek ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla yapılan bir dizi işlemi kapsar. Referans klinker ise, çimento fabrikasında yapılan bakım, onarım veya teknolojik güncellemelerden sonra üretilen klinkeri ifade eder. Lastikli klinker ise kalsinatör bölgesinden beslenen ömrünü tamamlamış lastik kullanılarak üretilen klinkerleri temsil etmektedir.

#### 4.1.1. Atık Lastik Kullanılarak Üretilen Klinkerin Mikroskop Analizi

Ömrünü tamamlamış atık lastik kullanılarak üretilen klinkere moleküler ve atomik düzeyde yapılarının anlaşılması amacıyla mikroskopik analiz yapılmıştır. Referans klinkerin optik mikroskop görüntüsü (Resim 4.1) ömrünü tamamlamış lastik kullanılarak üretilen klinkerin optik mikroskop görüntüsü (Resim 4.2) ile karşılaştırılmıştır.



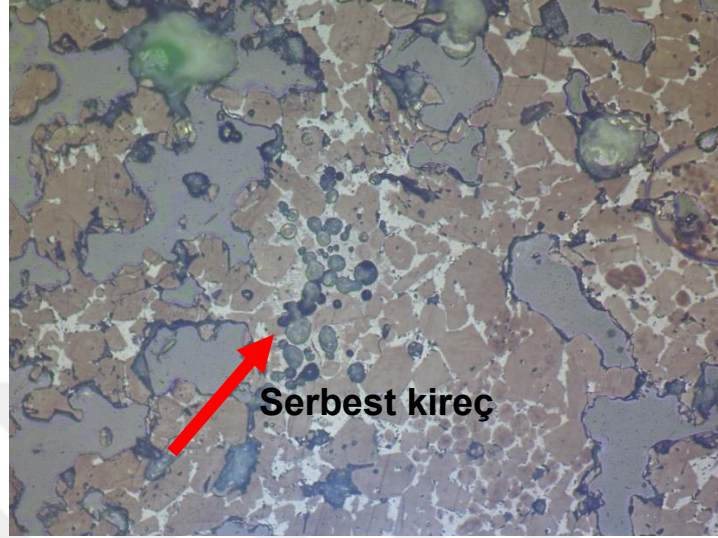
Şekil 4.1 Referans klinker (20x)



Şekil 4.2 Referans klinker 20x (belit dağılımları)

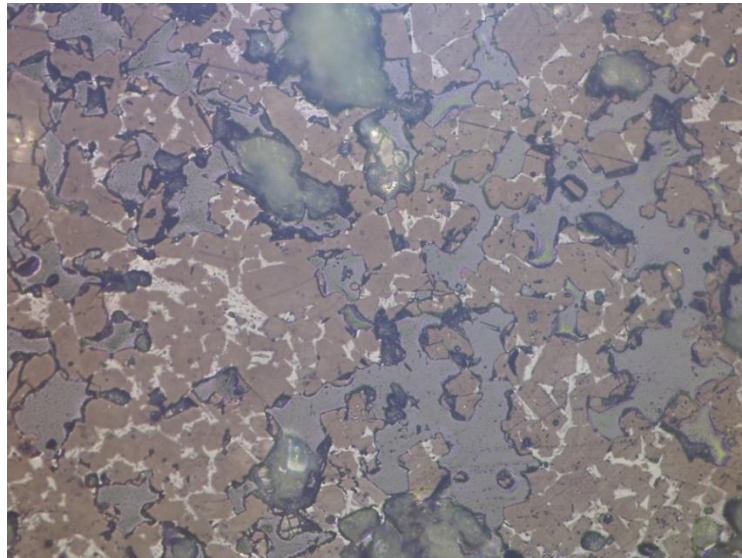
Şekil 4.1’ de yer verilen referans örneğin mikroskobik incelemelerinde; alit kristallerinin öz şekilli geliştiği yer yer prizmatik yapı sunduğu gözlenmektedir. Şekil 4.2’de yer alan referans klinker 20x büyütülerek belit fazının genel olarak alit kristalleri arasında hamur içerisinde, kümelenmeden yer aldığı görülmektedir. Kesitin farklı bölgelerinde alit fazları üzerinde gelişen ikincil belitler tespit edilmiştir. Yine hamur içinde çok da yaygın olmayan serbest kireç görüntülerine rastlanmaktadır (Şekil 4.3).

Bazı bölgelerde, belit fazlarının köşeli formda gelişmesi zaman zaman soğutma değerlerinde değişimler olduğunu göstermektedir. Sıvı faz içerisinde herhangi bir ayrışma gözlenmemiştir.



**Şekil 4.3** Referans klinker 20x (serbest kireç görüntüsü)

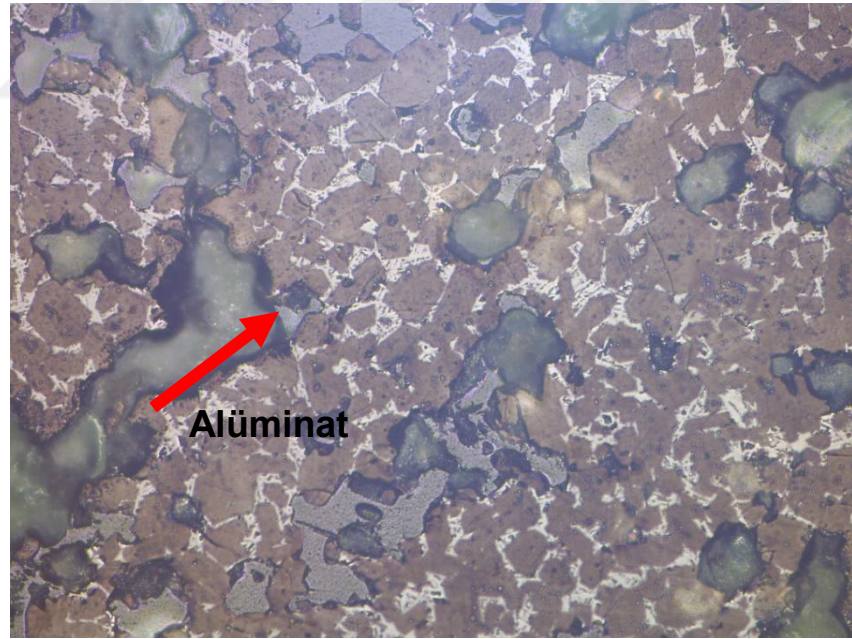
Ömrünü tamamlamış lastik kullanılarak üretilen klinkerlerin Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’ de yer alan mikroskopik görüntüleri değerlendirildiğinde, alit kristallerinin referans örnekte olduğu gibi genel olarak öz şekilli geliştiği ancak alit üstünde ikincil belit gelişmesinin daha fazla olduğu görülmektedir. Belit kristallerinin yer yer morfolojik yapılarında bozulmalar gözlenmiştir.



**Şekil 4.4** % 25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinker (20x)



Şekil 4.5 %25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinker (20x) alit üstü belit görüntüsü



Şekil 4.6 %25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinkere ait alüminat fazı (20x)

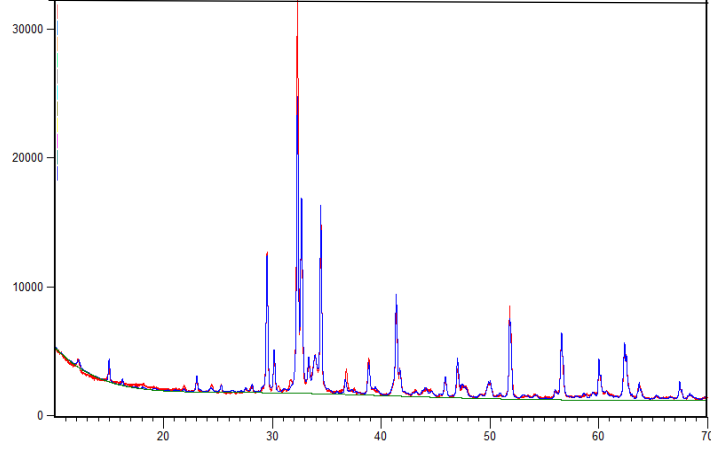


**Şekil 4.7** %25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinkere ait ayrılmamış faz dağılımı (20x)

Şekil 4.6 da sıvı fazda, alüminat fazına ait kristallenmelerin gözleendiği kesitlerde, serbest kireç içeriğinin minör miktarda olduğu görülmektedir. Atık lastik kullanılarak üretilen klinkere ait ayrılmamış faz dağılımları Şekil 4.7’ de gösterilmiştir. Ayrılmamış faz dayanımları düşük mekanik dayanım başta olmak üzere zayıf hidrasyon ve bağlanmaya da neden olur. Bu durum klinker dayanımı için istenmeyen bir olgudur.

#### **4.1.2. Atık Lastik Kullanılarak Üretilen Klinkerin XRD Analizi**

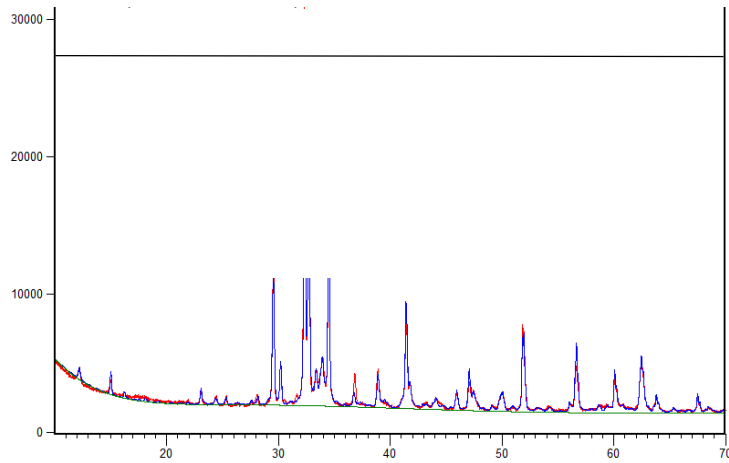
Atık lastik beslemesi sonucu üretilen klinkerin kristal yapısını ve faz bileşimini tespit etmek için XRD analizleri yapılmıştır. Faz bileşimleri XRF ile tespit edilebilir ancak XRD methodu ile fazların tamamı hakkında bilgi sahibi olunacağından klinker dayanımına ve çimentodaki yansımalarına etkisi doğrudan saptanmaktadır. Bu sebeple XRF analizleri XRD analizi ile desteklenmiştir. Referans örneğe ve atık lastik beslemesi sonucu elde edilen klinkere ait XRD spektrumları Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.8 Referans örneğe ait XRD spektrumu

Çizelge 4.1 Referans örneğe ait XRD spektrum sonuçları

Analizler	Sonuç
<b>C<sub>3</sub>S - Alit</b>	% 75.29
<b>C<sub>2</sub>S - Belit</b>	% 10.94
<b>C<sub>4</sub>AF - Ferrit</b>	% 9.84
<b>C<sub>3</sub>A - Alüminat kübik</b>	% 3.44
<b>C<sub>3</sub>A - Alüminat orto</b>	% 0.00
<b>Kalsiyum oksit - Kireç</b>	% 0.00
<b>Kalsiyum hidroksit - Portland</b>	% 0.00
<b>Magnezyum oksit-periklaz</b>	% 0.50
<b>Potasyum sülfat - Arkanit</b>	% 0.00
<b>Aftitalit</b>	% 0.00

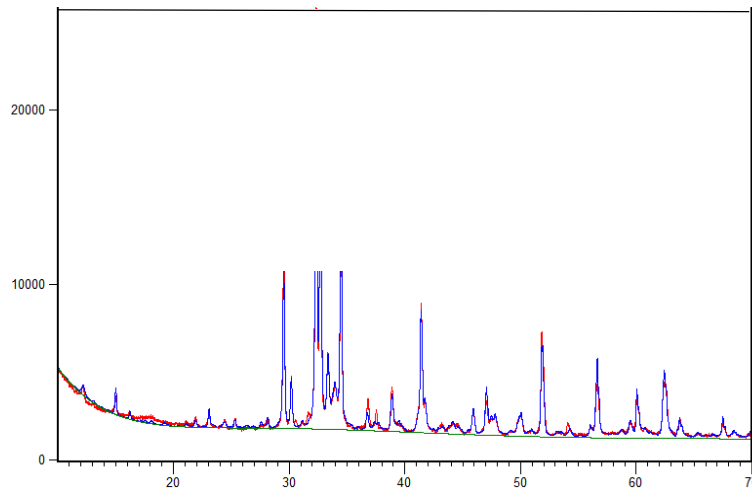


Şekil 4.9 %25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinkere ait XRD spektrum-1

Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te yapılan XRD analizlerine ait sonuçlar yer almaktadır. Şekil 4.9'da görülen ömrünü tamamlamış lastik kullanılan örneğe ait XRD analizine bakıldığında alit fazının % 76.73 ile Çizelge 4.2'de görülen en yüksek orana sahip olduğu görülmektedir. En yüksek belit fazı ise Çizelge 4.1'de görülen % 10.94 ile Şekil 4.8'de yer alan referans örneğine aittir. En yüksek ferrite fazı ise % 10.01 ile Çizelge 4.3'de verilmiştir. Şekil 4.10' da görülen bir başka deneme yapılan klinkere ait XRD spektrumu olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.2** %25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinkere ait XRD spektrum sonuçları-1

<b>Analizler</b>	<b>Sonuç</b>
<b>C<sub>3</sub>S - Alit</b>	% 76.73
<b>C<sub>2</sub>S - Belit</b>	% 8.15
<b>C<sub>4</sub>AF - Ferrit</b>	% 9.81
<b>C<sub>3</sub>A - Alüminat kübik</b>	% 2.23
<b>C<sub>3</sub>A - Alüminat orto</b>	% 1.88
<b>Kalsiyum oksit - Kireç</b>	% 0.00
<b>Kalsiyum hidroksit - Portland</b>	% 0.60
<b>Magnezyum oksit-periklaz</b>	% 0.59
<b>Potasyum sülfat - Arkanit</b>	% 0.00
<b>Aftitalit</b>	% 0.00



**Şekil 4.10.** %25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinkere ait XRD spektrum-2

**Çizelge 4.3** %25 oranında ömrünü tamamlamış lastik yakılarak üretilen klinkere ait XRD spektrum sonuçları-2

<b>Analizler</b>	<b>Sonuç</b>
<b>C<sub>3</sub>S - Alit</b>	% 71.03
<b>C<sub>2</sub>S - Belit</b>	% 9.98
<b>C<sub>4</sub>AF - Ferrit</b>	% 10.01
<b>C<sub>3</sub>A - Alüminat kübik</b>	% 7.33
<b>C<sub>3</sub>A - Alüminat orto</b>	% 0.00
<b>Kalsiyum oksit - Kireç</b>	% 0.62
<b>Kalsiyum hidroksit - Portland</b>	% 0.48
<b>Magnezyum oksit-periklaz</b>	% 0.55
<b>Potasyum sülfat - Arkanit</b>	% 0.00
<b>Aftitalit</b>	% 0.00

% 25' lik alternatif yakıt içeriğinde ise %50 oranında ömrünü tamamlamış lastik ve %50 oranında atık ambalaj olarak alınmıştır.

**Çizelge 4.4** Rietveld analiz sonuçları

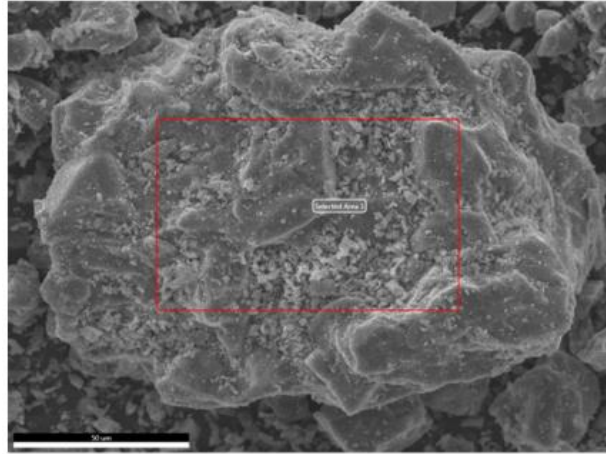
<b>Numune</b>	<b>C<sub>3</sub>S</b>	<b>C<sub>2</sub>S</b>	<b>C<sub>4</sub>AF</b>	<b>C<sub>3</sub>Ac</b>	<b>C<sub>3</sub>Ao</b>	<b>F.CaO</b>	<b>Portlandit</b>	<b>Periklaz</b>
Lastik içermeyen klinker	75.29	10.94	9.84	3.44	0	0	0	0.5
Lastik içeren klinker (birinci deneme)	76.73	8.15	9.81	2.23	1.88	0	0.60	0.59
Lastik içeren klinker (ikinci deneme)	71.03	9.98	10.01	7.33	0	0.62	0.48	0.55

Örnekler üzerinde yapılan XRD analiz sonuçları Rietveld metodu ile işlenmiş, Çizelge 4.4'de sunulmuştur. Buna göre, klinkerler içerisinde gelişen alit miktarının, lastik atığının ilk beslendiği dönemde alınan klinkerde belit ve alüminat miktarındaki azalmaya bağlı olarak minör oranda arttığı, ancak ikinci denemeyi temsil eden klinkerde oldukça azaldığı gözlenmektedir. İkinci denemede alüminat fazının kristallenmesi dikkat çekicidir.

Bu durum bize sıvı fazın ergiyiklik derecesi hakkında bilgi vermektedir. Bu durumda fırın içi koşulların takibi ve stabil olmayan durumların tespit edilmesi önemlidir. Klinkerlerin sıvı fazının bir bileşeni olan ferrit fazının miktarsal olarak değişmemesi, alüminat fazının kristallenebilmesi, düzensiz yakıt beslenmesi ve soğutma sorunlarına işaret etmektedir.

#### 4.1.3. Atık Lastik Kullanılarak Üretilen Klinkerin SEM-EDS Analizi

Referans ve lastik kullanılarak üretilen klinkere ait örnekler üzerinde SEM-EDS analizi yapılmıştır. Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’ de referans örneklere ait SEM-EDS görüntülerine yer verilmiştir. Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’deki referans örnek analiz sonuçlarında Zn elementine rastlanmazken, Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9’ de lastik kullanılarak üretilen klinkerde Zn elementine rastlanmıştır. Zn elementine lastik bünyesinde bulunan tellerin sebep olduğu bilinmektedir. Zn elementi alit, belit veya alüminat fazı içerisinde bulunabilmektedir. Yer aldığı faza bağlı olarak etkisi değişen bu element, priz süresinde değişim ya da dayanım dalgalanmalarına neden olabilmektedir.



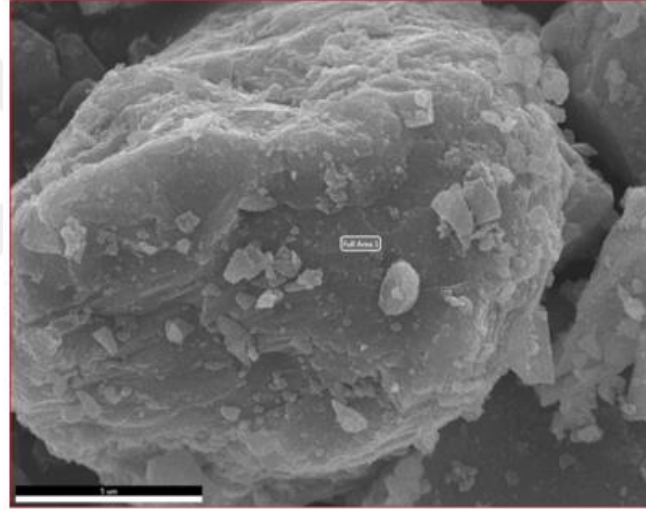
Şekil 4.11. Referans örneğe ait SEM -EDS analizi-1(20x)

Ağırlıkça sonuçlar, malzemenin yüzeyindeki elementlerin toplam ağırlık yüzdelerini gösterir. Bu veriler, her bir elementin malzemenin toplam kütleline olan katkısını ifade eder. Atomikçe sonuçlar, yüzeyde bulunan elementlerin toplam atom sayısına dayalı yüzdelerini gösterir. Bu veriler, her bir elementin toplam atom sayısındaki oranını ifade

eder. Böylece referans numuneler ile çalışılan alternatif içeriğe sahip numune karşılaştırılabilmektedir.

**Çizelge 4.5.** Referans örneğe ait SEM -EDS analizi-1

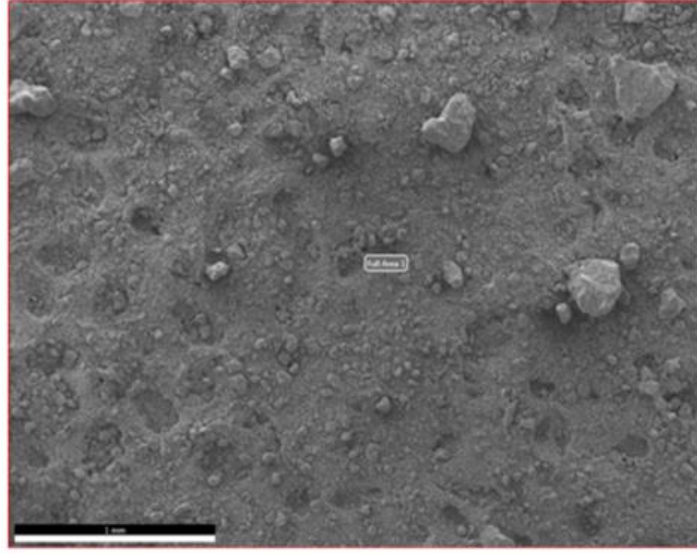
Numune	Element	Ağırlık-%	Atomik-%
Referans örneğe ait SEM-EDS analizi-1	O	26.75	50.33
	Na	0.24	0.32
	Mg	0.33	0.4
	Al	1.71	1.91
	Si	6.38	6.84
	S	1.61	1.51
	K	2.39	1.84
	Ca	44.71	33.57
	Fe	2.2	1.19
	Au	13.67	2.09



**Şekil 4.12.** Referans örneğe ait SEM -EDS analizi-2 (20x)

**Çizelge 4.6.** Referans örneğe ait SEM -EDS analizi-2

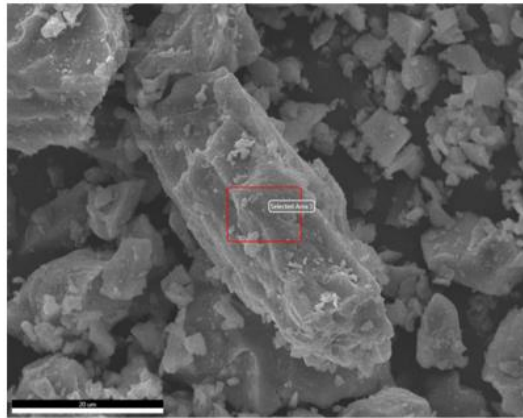
Numune	Element	Ağırlık-%	Atomik-%
Referans örneğe ait SEM-EDS analizi-2	C	2.05	4.69
	O	30.89	53.16
	Mg	0.17	0.2
	Al	1.29	1.31
	Si	8.17	8
	S	0.51	0.44
	K	0.49	0.35
	Ca	42.89	29.46
	Fe	1.39	0.69
	Au	12.15	1.7



**Şekil 4.13.** Referans örneğe ait SEM -EDS analizi-3 (20x)

**Çizelge 4.7.** Referans örneğe ait SEM -EDS analizi-3

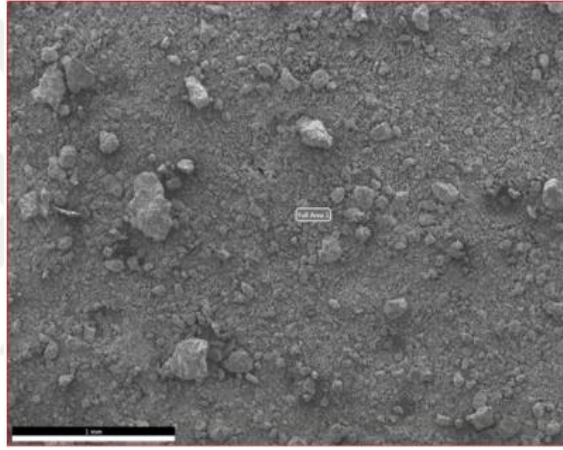
Numune	Element	Ağırlık-%	Atomik-%
Referans örneğe ait SEM-EDS analizi-3	C	4.08	9.17
	O	29.95	50.63
	Na	0.52	0.61
	Mg	0.46	0.51
	Al	1.46	1.46
	Si	6.06	5.82
	S	0.84	0.71
	K	1.22	0.84
	Ca	41.23	27.77
	Fe	1.81	0.87



**Şekil 4.14.** Atık lastik yakılarak üretilen örneğe ait SEM -EDS analizi-1 (20x)

**Çizelge 4.8.** Atık lastik yakılarak üretilen örneğe ait SEM -EDS analizi-1

Numune	Element	Ağırlık-%	Atomik-%
Atık lastik içeren örneğe ait SEM-EDS analizi-1	O	28.63	51.66
	Zn	1	0.44
	Mg	2.8	3.32
	Al	9.98	10.68
	Si	2.19	2.25
	K	0.24	0.18
	Ca	34.69	24.98
	Fe	9.26	4.79
	Co	0.16	0.08
	Au	11.05	1.62



**Şekil 4.15.** Atık lastik yakılarak üretilen örneğe ait SEM -EDS analizi-2 (20x)

**Çizelge 4.9.** Atık lastik yakılarak üretilen örneğe ait SEM -EDS analizi-2

Numune	Element	Ağırlık-%	Atomik-%
Atık lastik içeren örneğe ait SEM -EDS analizi-2	C	4.26	9.6
	O	29.33	49.67
	Fe	3	1.45
	Zn	0.54	0.22
	Mg	0.52	0.58
	Al	1.54	1.54
	Si	6.12	5.91
	S	0.57	0.48
	K	1.13	0.78
	Ca	41.72	28.2

Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12 incelendiğinde lastik atık kullanımıyla dayanımlarda düşüş olmuştur. Dayanımdaki bu düşüşü atık içerisinde bulunan tellerin tam erime sağlanamadan klinker bünyesine infiltrasyonu sebep olduğu düşünülmektedir.

**Çizelge 4.10.** Numunelere ait klinker parametreleri

Numune	LOI (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)
Referans klinker	0.20	20.60	5.50	3.13	65.00	2.14	1.49	0.20	0.98
Atık lastik yakılarak üretilen klinker-1	0.26	19.97	5.36	3.95	65.72	2.09	0.84	0.22	0.92
Atık lastik yakılarak üretilen klinker-2	0.31	20.18	5.30	3.85	66.32	2.12	0.86	0.22	0.93

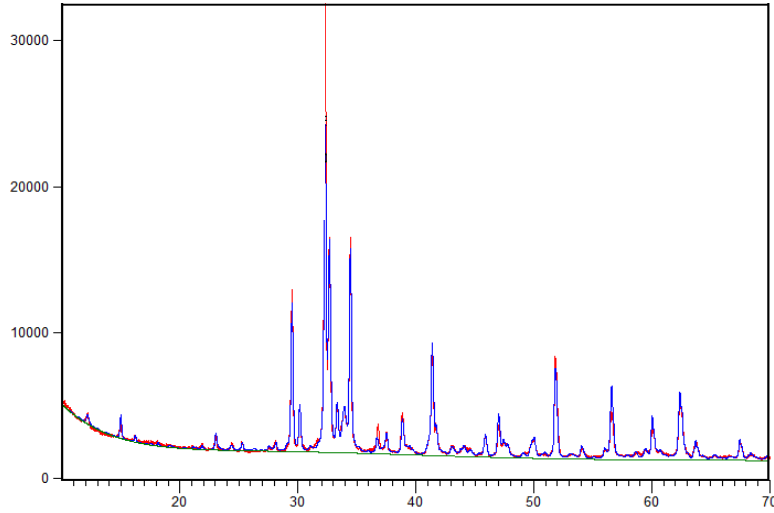
**Çizelge 4.11.** Numunelere ait klinker parametreleri ve klinker dayanımları

Numune	Serbest Kireç	LSF	S/R	A/F	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	2 günlük dayanım (MPa)	7 günlük dayanım (MPa)	28 günlük dayanım (MPa)
Referans klinker	1.55	98.18	2.39	1.76	60.25	13.63	9.29	9.52	27.1	40.0	48.6
Atık lastik yakılarak üretilen klinker-1	1.13	101.41	2.15	1.36	69.44	4.89	7.53	12.01	24.0	38.1	47.5
Atık lastik yakılarak üretilen klinker-2	1.02	101.62	2.21	1.38	71.28	4.11	7.54	1.70	25.6	41.0	47.6

Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11 referans klinker ve atık lastik yakılarak elde edilen klinkeri göstermektedir. Burada atık lastiğin kullanılmasıyla dayanımlarda düşüş görülmektedir. Serbest kireç yüzdesi için de alternatif yakıtla birlikte azaldığı görülmektedir.

#### 4.2 %75 Alternatif yakıt - %25 Fosil yakıt Beslemesi

Çalışmanın bu kısmında referans klinker ile %75 alternatif yakıt, % 25 fosil yakıt ile üretilen klinkerler kıyaslanmıştır. Alternatif yakıt içeriği ise %50 ömrünü tamamlamış lastik ve %50 atık ambalaj olarak alınmıştır.



Şekil 4.16. %75 Alternatif yakıt- %25 fosil yakıt beslemesi örneğe ait XRD spektrumu

Çizelge 4.12. %75 Alternatif yakıt- %25 fosil yakıt beslemesi sonucu elde edilen klinkerin XRD sonuçları

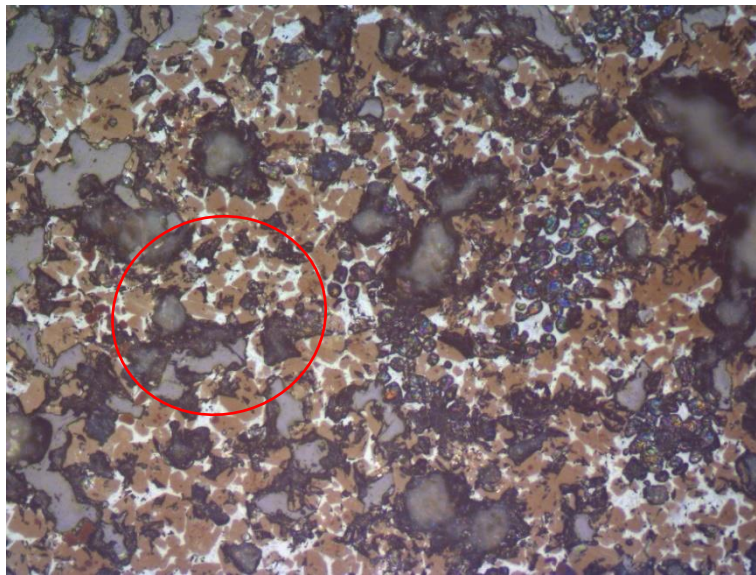
Analizler	Sonuç
<b>C<sub>3</sub>S - Alit</b>	75.37%
<b>C<sub>2</sub>S - Belit</b>	9.60%
<b>C<sub>4</sub>AF - Ferrit</b>	7.96%
<b>C<sub>3</sub>A - Alüminat kübik</b>	3.91%
<b>C<sub>3</sub>A - Alüminat orto</b>	0.63%
<b>Kalsiyum oksit - Kireç</b>	1.65%
<b>Kalsiyum hidroksit - Portland</b>	0.48%
<b>Magnezyum oksit-periklaz</b>	0.88%
<b>Potasyum sülfat - Arkanit</b>	0.00%
<b>Aftitalit</b>	0.00%

Şekil 4.16'da Rietveld analiz sonucu gösterilmiştir. Üretilen klinkerlerin mineralojik kompozisyonu şu şekildedir: %75.37 alit, %9.60 belit, %7.96 ferrit ve alüminat orto fazı %0.63 alüminat kübik fazı %3.91 olmak üzere %4.54 toplam alüminat fazı içeren

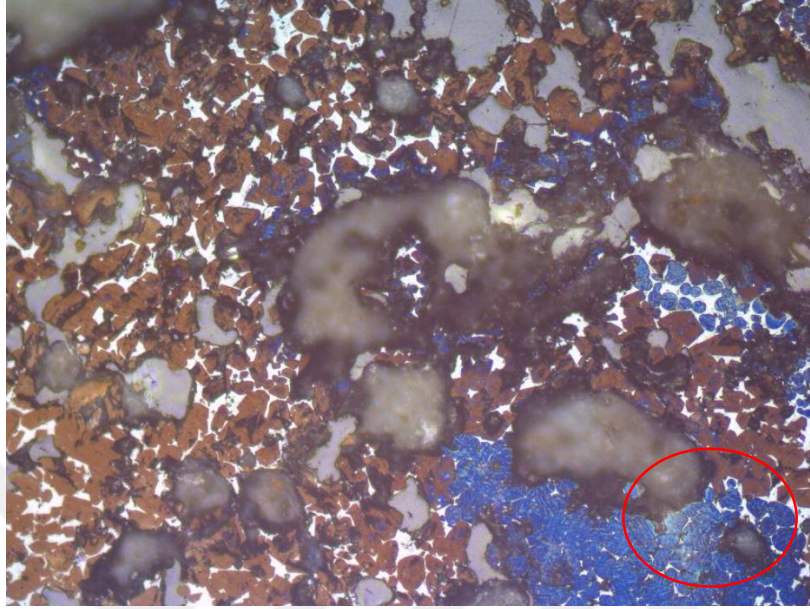
klinkerlerde serbest kireç miktarı %1.65 olarak tespit edilmiştir. Mikroskop görüntüleri incelendiğinde alit fazının sarı-kahvemsî ve altıgene benzer yapısıyla ortamdaki hâkim faz olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.17 'de kırmızı ile işaretlenen kısımda serbest kireç kümeleri gözlenmiştir. Bu durum pişme sıcaklığında düşme olduğu, değışken kireç doygunluk faktörü ve hammadde karışımında bir heterojenlik olması, kalsiyum miktarının fazlalığı ve/veya iri kalsit varlığı ile açıklanabilir. Şekil 4.18 'de belit şekillerinde bozulmalar olmaya başladığı gözlenmektedir.

Bunun sebebinin klinkerlerin döküldüğü esnadaki soğutma hızının yavaş olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda amberimsî belitlere klinker genelinde rastlanmış olup bu durum fırın rejimindeki dalgalanmalardan kaynaklanmış olabilir. Amberimsî belitlerin oluşumu, bu fazın kristal yapısındaki bozulmaya işaret eder ve çimentonun mekanik özelliklerinin olumsuz etkilenmesine yol açar. Özellikle erken basınç dayanımı düşük olur, çünkü normal şartlarda belit, hidrasyon sırasında geç dayanım kazandıran bir bileşendir. Amberimsî belit, çimento dayanımını daha da azaltır ve çimento daha zayıf performans gösterir. Sıvı fazda yer yer fazla  $C_3A$  (alüminat orto) gözlenmiştir, bu durum yine yavaş soğutma ile açıklanabilir. Yavaş soğutma, klinkerde faz oluşumunun daha uzun süre yüksek sıcaklıklarda kalmasına neden olur. Bu durumda sıvı fazda daha fazla  $C_3A$  kristalleşebilir, bu da fazlar arasında dengesizlik yaratır.



**Şekil 4.17.** %75 alternatif yakıt - %25 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinkerin mikroskop görüntüsü - 20x (Serbest kireç)



**Şekil 4.18.** %75 alternatif yakıt - %25 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinker mikroskop görüntüsü - 20x (Amber Belit-Saçaklanma)

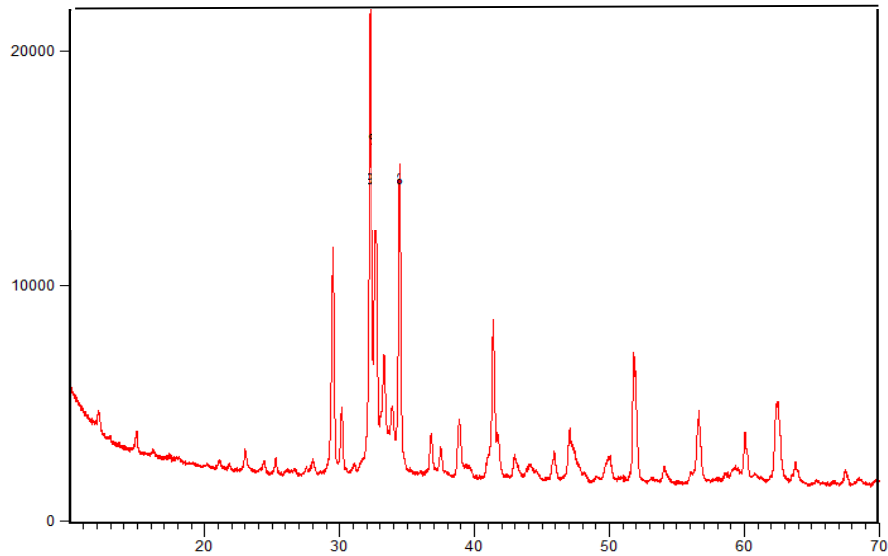
Literatüre göre alit kristallerinin en reaktif olduğu boyut aralığı 20-40  $\mu\text{m}$ 'dir (Gupta vd. 2021). 40  $\mu\text{m}$  üstü alitlerin reaktivitesi oldukça azalmakta ve nihai üründe dayanım kaybına sebep olmaktadır. Alit boyunun çok küçük olması durumunda da nihai ürünün su ihtiyacı oldukça artmaktadır. Bu nedenle alit boyutlarının ideal aralıkta olması hem nihai ürün verimliliği hem de ürün kalitesi açısından büyük önem arz etmektedir. İncelenen numunede farklı görüntüler üzerinden seçilen alitlerin boyutları tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan incelemede en reaktif boyuta sahip alitler tüm kesitin yaklaşık yüzde 72'sini oluşturmaktadır. 20  $\mu\text{m}$ 'den küçük alitler ise tüm kesitin yaklaşık yüzde 27'sini oluşturmaktadır.

Yapılan analizlerde dayanımlar 2 günde 25.9 MPa, 7 günde 39.8 MPa ve 28 günde 48.1 MPa olarak saptanmıştır. Bu sonuçlar da %25 alternatif Yakıt - %75 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinkere kıyasla iyileşme görülmüştür.

### 4.3 %50 Alternatif Yakıt (%50 ötl+%50 aty) -%50 Fosil Yakıt

Çalışmanın bu kısmında referans klinker ile %50 alternatif yakıt, %50 fosil yakıt ile üretilen klinkerler kıyaslanmıştır. Alternatif yakıt içeriği ise %50 ömrünü tamamlamış lastik ve %50 atık ambalaj olarak alınmıştır. Şekil 4.19'da analize ait XRD spektrumu verilmiştir. Yapılan Rietveld analizine göre klinkerlerin mineralojik kompozisyonu Çizelge 4.13'de verilmiştir. %67.82 alit, %10.43 belit, %9.57 ferrit ve %8.37 alüminat içeren klinkerlerde serbest kireç miktarı %0.48 olarak tespit edilmiştir. Bir önceki yapılan %75 alternatif yakıt- %25 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinkerde ise dayanım için en önemli faz olan alit fazı %75.37 ile daha yüksek gelmiştir. Belit fazı ise %50 alternatif yakıt- %50 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinkerde yüksek gelmiştir. Belit fazlarının alit fazına geçemediğini gösterdiğinden beklenen bir durumdur. Bu durum üretilen klinkerin dayanım açısından yetersiz olduğunu göstermektedir.



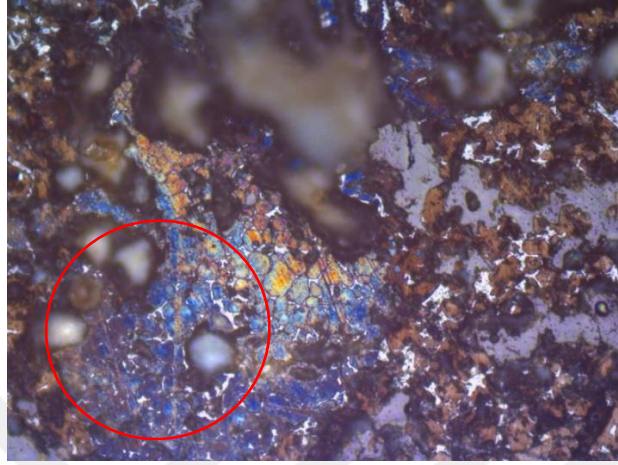
Şekil 4.19. %50 Alternatif yakıt- %50 fosil yakıt beslemesi sonucu elde edilen XRD spektrumu

**Çizelge 4.13.** %50 Alternatif yakıt- %50 fosil yakıt beslemesi sonucu elde edilen klinkerin XRD sonuçları

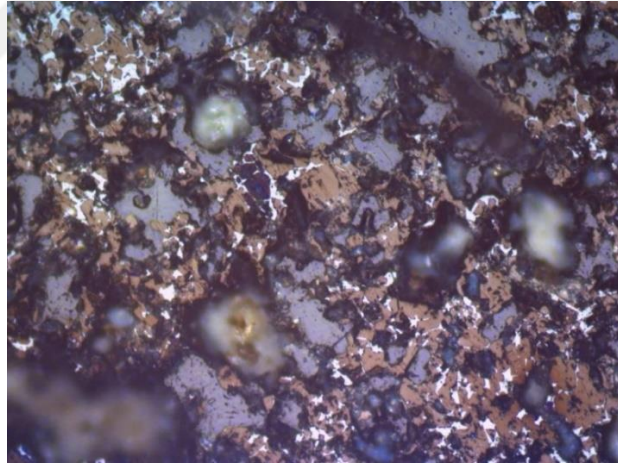
<b>Analizler</b>	<b>Sonuç</b>
<b>C<sub>3</sub>S - Alit</b>	% 67.82
<b>C<sub>2</sub>S - Belit</b>	% 10.43
<b>C<sub>4</sub>AF - Ferrit</b>	% 9.57
<b>C<sub>3</sub>A - Alüminat kübik</b>	% 6.17
<b>C<sub>3</sub>A - Alüminat orto</b>	% 2.20
<b>Kalsiyum oksit - Kireç</b>	% 0.48
<b>Kalsiyum hidroksit - Portland</b>	% 1.21
<b>Magnezyum oksit-periklaz</b>	% 1.17
<b>Potasyum sülfat - Arkanit</b>	% 0.96
<b>Aftitalit</b>	% 0.00

Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde alit fazının sarı-kahvemsî ve altıgene benzer yapısıyla ortamdaki hâkim faz olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.20’de yer yer amberimsî belit kümeleri gözlenmiştir. Bu durum fırın rejimindeki dalgalanmalar ile açıklanabilir. Şekil 4.21’de kirlilik gözlenmiştir. Bunun sebebinin yakıtın tam verimlilikle yanmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Klinkerlerin gözenekli yapısından kaynaklı, gözeneklere dolan epoksi de bu görüntüye sebebiyet vermiş olabilir ve prosesle ilişkilendirilebilecek bir problem teşkil etmemektedir. Şekil 4.21’de alit öz şekillerinin genel anlamda korunduğu, ancak alit boyutlarının heterojen dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Alit fazının öz şekillerinin korunmasına rağmen boyutlarının heterojen dağılım göstermesi, çimentonun mekanik ve kimyasal dayanımını etkiler. Heterojen alit boyutları, çimento partiküllerinin su ile etkileşim hızını etkiler. Büyük alit kristalleri daha yavaş çözünürken, küçük alit kristalleri daha hızlı reaksiyona girer. Bu durum, çimentonun erken dayanımında homojen olmayan bir gelişmeye neden olabilir. Küçük alit parçaları hızlı reaksiyona girerek erken dönemde hızlı dayanım kazandırabilir, ancak bu süreç

tamamlandığında büyük alit kristalleri hidrasyon sürecine daha geç katılır. Bu, çimentonun farklı bölgelerinde dayanımda dengesizlikler oluşturabilir.



**Şekil 4.20.** %50 Alternatif yakıt (%50 ötl+%50 aty) -%50 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinkerin mikroskop görüntüsü - 20x (Amber belit)



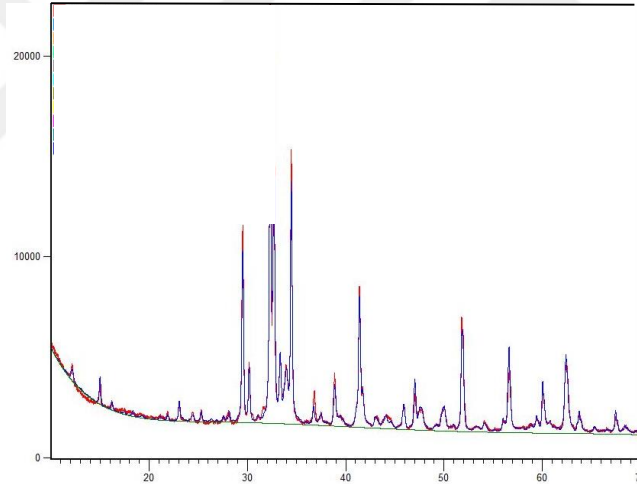
**Şekil 4.21.** %50 Alternatif yakıt (%50 ötl+%50 aty) -%50 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinkerin mikroskop görüntüsü - 20x (Kirlilik)

Literatüre göre alit kristallerinin en reaktif olduğu boyut aralığı 20-40  $\mu\text{m}$ 'dir. 40  $\mu\text{m}$  üstü alitlerin reaktivitesi oldukça azalmakta ve nihai üründe dayanım kaybına sebep olmaktadır. Alit boyunun çok küçük olması durumunda da nihai ürünün su ihtiyacı oldukça artmaktadır. Bu nedenle alit boyutlarının ideal aralıkta olması hem nihai ürün verimliliği hem de ürün kalitesi açısından büyük önem arz etmektedir. İncelenen numunede farklı görüntüler üzerinden seçilen alitlerin boyutları tespit edilmeye

çalışılmıştır. Yapılan incelemede en reaktif boyuta sahip alitler tüm kesitin yaklaşık yüzde 60'ını oluşturmaktadır. 20 µm'den küçük alitler ise tüm kesitin yaklaşık yüzde 40'ını oluşturmaktadır. Yapılan analizlerde dayanımlar 2 günlükte 26.4 MPa, 7 günlükte 40.5 MPa ve 28 günlükte ise 48.1 MPa olarak saptanmıştır.

#### 4.4 %50 Alternatif Yakıt (%100 ötl) -%50 Fosil yakıt

Yapılan çalışmada referans klinker ile % 50 alternatif yakıt, % 50 fosil yakıt ile üretilen klinkerler kıyaslanmıştır. Alternatif yakıt içeriği ise %100 ömrünü tamamlamış lastik olarak alınmıştır. Yapılan Rietveld analizine göre Şekil 4.22'de klinkerlerin mineralojik kompozisyonu gösterilmiştir. %75.32 alit, %7.87 belit, %8.91 ferrit ve %5.81 alüminat içeren klinkerlerde serbest kireç miktarı %0.52 olarak Çizelge 4.14' de yer verilmiştir.



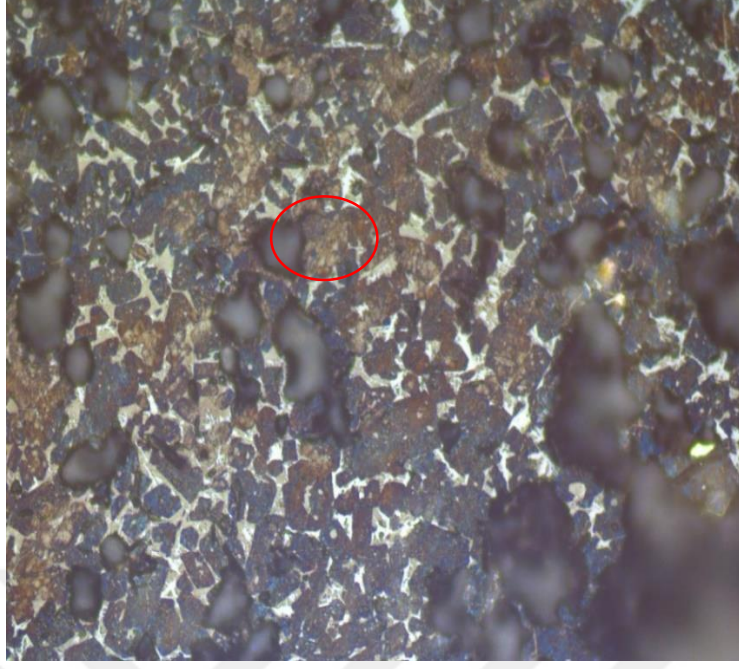
Şekil 4.22 %50 Alternatif yakıt- %50 fosil yakıt beslemesi sonucu üretilen klinkerin XRD spektrumu

Çizelge 4.14 %50 Alternatif yakıt- %50 fosil yakıt beslemesi sonucu elde edilen klinkerin XRD sonuçları

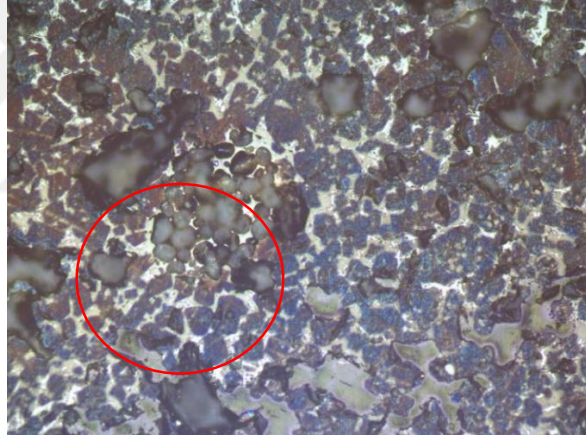
Analizler	Sonuç
C <sub>3</sub> S - Alit	% 75.32
C <sub>2</sub> S - Belit	% 7.87
C <sub>4</sub> AF - Ferrit	% 8.91
C <sub>3</sub> A - Alüminat kübik	% 4.91
C <sub>3</sub> A - Alüminat orto	% 0.90

<b>Kalsiyum oksit - Kireç</b>	% 0.52
<b>Kalsiyum hidroksit - Portland</b>	% 0.63
<b>Magnezyum oksit-periklaz</b>	% 0.93
<b>Potasyum sülfat - Arkanit</b>	% 0.00
<b>Aftitalit</b>	% 0.00

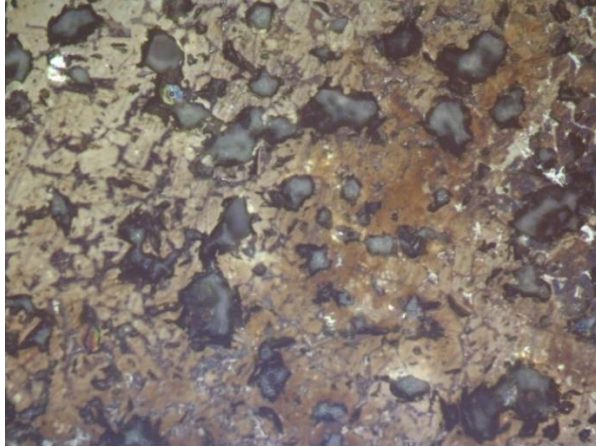
Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde alit fazının sarı-kahvems ve altıgene benzer yapısıyla ortamdaki hâkim faz olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.23’de klinker mikroskop görüntüsü içinde bazı safsızlıklar da görülmektedir. Çizelge 4.14’ de XRD analizine ait sonuçlar verilmiştir. Şekil 4.24’de de serbest kireç kümeleri gözlenmiştir. Şekil 4.25’ de sıvı fazda alit fazı gözlenmiştir. Yapılan diğer analizlerde gözlenmemesi bu durumun klinkerin hızlı soğutulması ile açıklanabilir. Bu durum pişme sıcaklığında düşme olduğu, değişken LSF ve hammadede kalsiyum miktarının fazlalığı ile açıklanabilir. Şekil 4.25’de alit ikizlenmeleri gözlenmiştir. Alit ikizlenmesi, kristal yapısında, birbiriyle belirli bir simetriye göre yer değiştiren iki veya daha fazla bölümün oluşmasıdır. Trikalsiyum silikat ( $C_3S$ ) olarak da bilinen alit, çimentonun temel bileşenlerinden biridir ve hidrasyon sürecinde çimentonun dayanım kazanmasını sağlayan başlıca bileşen olarak öne çıkar. Alitlerin birbirinden ayrıştırılamaması, ikizlenmesi gibi problemler overburning ile açıklanabilir. Overburning durumu, klinker fazlarının aşırı derecede oluşmasına ve bu fazların istenmeyen kristal yapılarına yol açmasıdır. Bu durum alitlerin tek bir parçacık şeklinde hareket etmesine sebep olacağı için alit boyutunun gereğinden fazla büyümesine, dolayısıyla nihai üründe dayanım kaybına neden olacaktır (Li vd. 2019). Overburning proses açısından değerlendirildiğinde ise enerji sarfiyatının artmasına dolayısıyla maliyetin artmasına sebep olur. Öte yandan da çimento üretimi için değirmende öğütme sürecinde zor öğünme gerçekleşir bu da öğütme enerjisinin artmasına sebep olur.



Şekil 4.23 Klinker mikroskop görüntüsü- 20x (Kirlilik)



Şekil 4.24 Klinker mikroskop görüntüsü - 20x (Serbest kireç kümeleri)

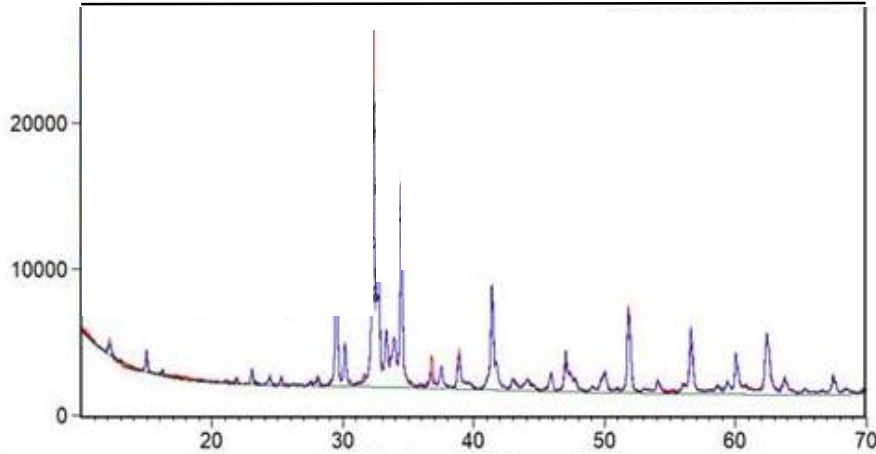


Şekil 4.25 Klinker mikroskop görüntüsü- 20x (Alit ikizlenmesi)

Literatüre göre alit kristallerinin en reaktif olduğu boyut aralığı 20-40 µm'dir. 40 µm üstü alitlerin reaktivitesi oldukça azalmakta ve nihai üründe dayanım kaybına sebep olmaktadır. Alit boyutunun çok küçük olması durumunda da nihai ürünün su ihtiyacı oldukça artmaktadır. Bu nedenle alit boyutlarının ideal aralıkta olması hem nihai ürün verimliliği hem de ürün kalitesi açısından büyük önem arz etmektedir. İncelenen numunede farklı görüntüler üzerinden seçilen alitlerin boyutları tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapılan incelemede en reaktif boyuta sahip alitler tüm kesitin yaklaşık yüzde 72'sini oluşturmaktadır. 20 µm'den küçük alitler ise tüm kesitin yaklaşık yüzde 25'sini oluşturmaktadır. 20-40 µm arasında boyuta sahip alitlerin istenilen seviyede olması alit reaktivitelerinin optimum düzeyde olduğunun göstergesidir. Yapılan analizlerde dayanımlar 2 günde 24.2 MPa, 7 günlük 36.5 MPa ve 28 günlük 46.4 MPa olarak saptanmıştır.

#### 4.5 % 50 Alternatif Yakıt (%100 aty)-% 50 Fosil Yakıt

Yapılan ilk incelemelerde referans klinker ile % 50 alternatif yakıt, % 50 fosil yakıt ile üretilen klinkerler kıyaslanmıştır. Alternatif yakıt içeriği ise %100 atık ambalaj olarak alınmıştır.



Şekil 4.26 %50 Alternatif yakıt- %50 fosil yakıt beslemesi örneğine ait XRD spektrumu

Çizelge 4.15 %50 Alternatif yakıt- %50 fosil yakıt beslemesi sonucu elde edilen klinkerin XRD sonuçları

<b>Analizler</b>	<b>Sonuç</b>
<b>C<sub>3</sub>S - Alit</b>	% 74.33
<b>C<sub>2</sub>S - Belit</b>	% 6.59
<b>C<sub>4</sub>AF - Ferrit</b>	% 10.34
<b>C<sub>3</sub>A - Alüminat kübik</b>	% 4.41
<b>C<sub>3</sub>A - Alüminat orto</b>	% 1.26
<b>Kalsiyum oksit - Kireç</b>	% 1.78
<b>Kalsiyum hidroksit - Portland</b>	% 0.63
<b>Magnezyum oksit-periklaz</b>	% 1.29
<b>Potasyum sülfat - Arkanit</b>	% 0.00
<b>Aftitalit</b>	% 0.00

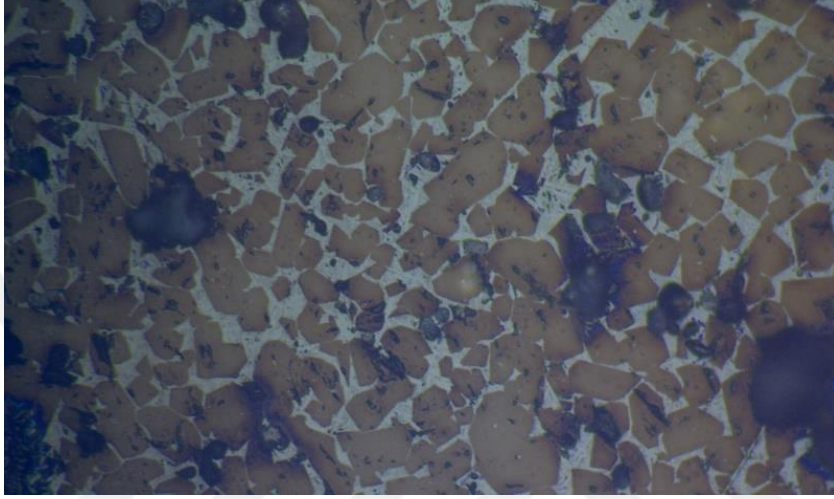
Şekil 4.26’ da % 50 alternatif yakıt- % 50 fosil yakıt kullanılarak elde edilen klinkerin XRD spektrumuna yer verilmiştir. Çizelge 4.15’ da ise spektruma ait veriler gösterilmektedir. Rietveld metodu ile incelenen klinkerde C<sub>3</sub>S oranının % 74 ve belit miktarının % 6 olması, üretimde istenilen miktarlardır. Ancak sıvı fazın bileşenlerinden olan C<sub>3</sub>A ortorombik fazı, klinker bünyesinde bulunması istenmeyen fazdır. Bunun sebebi, C<sub>3</sub>A’nın bu formunun alkali içermesidir. Farin bileşeninde özellikle Na miktarı yüksekse kristallenen bu faz, alkali oranı normalden oluşmuş ise üretim anında fırın içerisinde redükleyici koşullar meydana geldiğini ifade eder. Klinkerin optik mikroskop incelemesi sırasında şu bulgulara rastlanmıştır. Alit fazlarının genel olarak öz şekilli formda olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca alit fazı üzerinde noktasal kirlilikler tespit edilmiştir. Çizelge 4.16’da görüldüğü gibi serbest kireç değeri dikkat çekmektedir. Şekil 4.27’de sıvı fazda kristallenme olduğu görülmektedir. Bu durumun yavaş soğumaya işaret ettiği düşünülmektedir.

**Çizelge 4.16** % 50 Alternatif Yakıt (%100 aty)-% 50 fosil yakıt kullanılarak üretilen klinker sonuçları

<b>RDF Analiz</b>	<b>Sonuç</b>						
	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>C<sub>3</sub>A</b>
	20.19	5.15	3.48	64.8	2.44	0.93	7.91
Atık ambalaj yakılarak üretilen klinker	<b>LSF</b>	<b>SM</b>	<b>ALM</b>	<b>ASR</b>	<b>C<sub>2</sub>S</b>	<b>C<sub>4</sub>AF</b>	<b>Likit Faz</b>

99.89	2.34	1.48	0.78	11.02	10.59	27.86
<b>2</b> <b>günlük</b> <b>dayanım</b> <b>(MPa)</b>	<b>7</b> <b>günlük</b> <b>dayanım</b> <b>(MPa)</b>	<b>28</b> <b>günlük</b> <b>dayanım</b> <b>(MPa)</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>F.CaO</b>	<b>C<sub>3</sub>S</b>
26.4	40.6	48.5	0.81	0.4	2.1	62.16



**Şekil 4.27** %50 Alternatif yakıt (%100 ötl) -%50 fosil yakıt yakılarak üretilen klinker görüntüsü (20x)

Serbest kirecin fazla olması, çimentonun hidratasyonu sırasında tam olarak reaksiyona girmemiş kireç partiküllerinin kalmasına neden olur. Bu partiküller zamanla suyla reaksiyona girerek genişler ve beton içinde hacimsel genişleme ile çatlaklar oluşturabilir. Özellikle noktasal kirlilikler, bu genişleme etkisinin çimento matrisinde düzensiz bir şekilde dağılmasına neden olur ve mikro çatlaklar oluşarak çimentonun uzun vadeli dayanımını zayıflatır. Ayrıca, serbest kirecin fazla olduğu bölgelerde kimyasal dayanıklılık da azalır, bu da betonun çevresel etkilere karşı daha kırılabilir hale gelmesine yol açar. Şekil 4.27’ de alternatif yakıt olarak %100 ömrünü tamamlamış lastik kullanılarak üretilen klinkerin mikroskop görüntüsü yer almaktadır. Alit fazları üzerinde işaretlemeler yapılmış ve alit boyutları tayin edilmiştir. Buna göre klinker içerisinde yer alan alitlerin % 69’u literatürde reaktivitesi en uygun boyut olan, 20-40 mikron aralığında yer almaktadır. Alitlerin % 13’ü 20 mikrondan daha küçük boyuttadır. İnce alit kristallerinin daha reaktif olduğu bilinmektedir. Alit kristallerinin %13’ünün 20 mikrondan daha küçük boyutlarda olması, çimentonun hidratasyon sürecini ve dayanım

kazanma hızını önemli ölçüde etkiler. İnce alit kristalleri, daha büyük yüzey alanına sahip oldukları için su ile daha hızlı reaksiyona girerler ve bu da çimentonun erken dönem dayanımının artmasına katkıda bulunur. İnce kristallerin daha reaktif olması, çimentonun su ile temas ettiğinde hızlı bir şekilde sertleşmesine ve erken yaşta yüksek basınç dayanımı kazanmasına yol açar.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada çimento üretim tesislerinde alternatif yakıt olarak atık ambalaj ve ömrünü tamamlamış lastik kullanılmıştır. Farklı oranlarda fosil yakıt ve alternatif yakıtlar hazırlanarak analiz edilmiştir. Bu alternatif yakıtlar referans numuneler ile kıyaslanmıştır. Referans numunelerin üretim sürecinde alternatif yakıt kullanımı yoktur. Alternatif yakıtların üretilen klinkere olan etkisi optik mikroskop, XRD ve SEM-EDS analizleri kullanılarak araştırılmıştır. Araştırmalar, atık ambalajların daha yüksek oranlarda kullanıldığı klinker üretimlerinde daha homojen ve kaliteli bir ürün elde edildiğini göstermiştir. En uygun sonuçların, %50 alternatif yakıt (%100 aty)-% 50 fosil yakıt kullanılarak üretilen klinkerde olduğu görülmüştür.

Numunelere XRD analizleri yapılarak fazların içerikleri belirlenmiştir. XRD analizleri sonucunda klinker dayanımı için önemli olan alit fazları değerlendirilmiştir. Diğer alternatif yakıt ve fosil yakıt oranlarına kıyasla oluşan alit fazının daha yüksek olduğu görülmüştür. Alit fazı dayanım için önem teşkil etmektedir. Ayrıca serbest kireç oranının %1.78 ile kabul edilebilir olduğu görülmüştür. %50 alternatif yakıt (%100 aty)-%50 fosil yakıt oranı kullanılarak üretilen klinkerin dayanımlarına bakıldığında 2 günlük dayanım sonucu 26.4 MPa, 7 günlük dayanım sonucu 40.6 MPa ve 28 günlük dayanım sonucu 48.5 MPa olarak gözlemlenmiştir. Dayanım sonuçları çimentonun kalitesi TS EN 197-1 standardında belirtilen ve TS EN 196 serisi standartları ile uyumludur.

Buna karşın, atık lastiklerin, atık ambalajdan daha yüksek oranlarda karıştırılarak kullanıldığı yanma sürecinde oluşan değişken çıktılar ve lastik atığın içerisindeki teller klinker kalitesini olumsuz etkileyebilmekte ve üretim sürecinde tutarsızlıklara neden olabilmektedir. Bu amaçla klinkerlerin mikroskopik görüntüleri incelenmiştir.

Mikroskopik görüntüler incelendiğinde; alternatif yakıt oranı %100 ömrünü tamamlamış lastik olarak alınan çalışmada serbest kireç kümeleri, kirlilik ve alit ikizlenmelerine rastlanmıştır. Bu durum üretilen klinker açısından istenmeyen bir durumdur. Bu durumlar alitlerin tek bir parçacık şeklinde hareket etmesine sebep olacağı için alit boyutunun gereğinden fazla büyümesine, dolayısıyla nihai üründe dayanım kaybına neden olacaktır.

Bu konuda yapılan çalışmalardan Serrano-González ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, alit ( $C_3S$ ) ve trikalsiyum alüminat ( $C_3A$ ) fazlarının, özellikle erken hidrasyon ve mukavemetle ilişkili hafif değişiklikler göstermiştir. Kalori sonuçları, düşük  $SO_3$  içeriğine sahip klinkerlerde kimyasal katkı maddelerinin davranışında değişiklikler olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle kullanılacak alternatif yakıtın özellikleri iyi bilinmeli ve bu yakıt kullanılarak üretilecek klinkerin kullanım oranlarının iyi ayarlanması gerekir. Alternatif yakıt oranında ömrünü tamamlamış lastik kullanım oranı fazla olan yakıt tiplerinin daha düşük dayanımlara sahip olduğu görülmüştür. %50 alternatif yakıt (%100 ötl)-% 50 fosil yakıt kullanılarak yapılan çalışma, aynı oranda alternatif yakıt kullanılarak yapılan analizler ile kıyaslandığında dayanımlar 2 günlükte 24.2 MPa, 7 günlük 36.5 MPa ve 28 günlük 46.4 MPa bulunmuştur. Bu dayanımların alternatif yakıt içeriği %100 atık ambalaj olan numuneye kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir.

Bu bulgular ışığında, atık ambalajların atık lastiklere kıyasla daha iyi bir yakıt alternatifi sunduğu ve enerji üretiminde tercih edilmesi gereken bir kaynak olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmanın, gelecekte daha geniş çapta doğrulanması ve atık ambalajların enerji sektörü için daha etkin bir şekilde kullanılabilmesi için önemli olduğu düşünülmektedir.

## 6.KAYNAKLAR

- Arin S, 2011, Modifiye Edilmiş Klasik Eberhart Tipi Fırınlarda Kireç Üretimini İncelenmesi.Yılankalede Örnek Uygulama.
- Bahar S, Uysal F F, 2018, Endüstriyel Yakıt Türü Petrokok'un İnsan Sağlığı ve Çevreye Etkileri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26(3), 100-106.
- Bilgin Ö, Koç E, 2013, Çimento Üretim Teknolojisinde Kullanılan Ana Ekipmanlar. MT Bilimsel, (4), 31-40.
- Bullerjahn F, Schmitt D, Haha M B, 2014. Effect of Raw Mix Design and of Clinkering Process on the Formation and Mineralogical Composition of (Ternesite) Belite Calcium Sulphoaluminate Ferrite Clinker. Cement and Concrete Research, 59, 87-95.
- Cembureau (The European Cement Association). 2019. The Role of Cement in the 2050 Low Carbon Economy. CEMBUREAU Publications.
- Chatterjee A, Sui T, 2019. Alternative Fuels-effects on Clinker Process and Properties. Cement and Concrete Research, 123, 105777.
- Chatziaras N, Psomopoulos C S, Themelis N J, 2014. Use of Alternative Fuels in Cement Industry. In Proceedings of the 12th International Conference on Protection and Restoration of the Environment, 1, 521-529.
- Chinyama M P, 2011, Alternative Fuels in Cement Manufacturing. Alternative Fuel, 262-284.

- European Commission. 2003, Directorate General Environment Refuse Derived Fuel, Cement Practice and Perspectives – Final Report. B4-3040/2000/306517/MAR/E3.
- European IPPC Bureau, 2011, Document on the Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries. Seville, Spain.
- Gupta S, Mohapatra B N, Bansal M, 2021, Chemico-Mineralogical Evaluation of Clinker from Four Different Zones of India: A Comparative Study Toward Development of Portland
- Hökfors B Boström, D, Vigg E, Backman R, 2015, On The Phase Chemistry of Portland Cement Clinker. *Advances in Cement Research*, 27-1, 50-60.
- Jayaraman G, 2011, Case Study Manual on Alternative Fuels and Raw Materials Utilization in Indian Cement Industry. Confederation of Indian Industry, CII-Sohrabji Green Business Centre, Survey 64.
- Kääntee U, Zevenhoven R, Backman R, Hupa M, 2004, Cement Manufacturing Using Alternative Fuels and the Advantages of Process Modelling. *Fuel Processing Technology*, 85-4, 293-301.
- Korkmaz A V, 2021, Klinker Fazlarının Farklı Öğütme Sürelerinde Çimento Performans Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. *Mühendislik ve Yer Bilimleri Dergisi*, 6(1), 41-56.
- Li P, Ma Z, Zhang Z, Li X, Lu X, Hou P, Du P, 2019, Effect of Gypsum on Hydration and Hardening Properties of Alite Modified Calcium Sulfoaluminate cement. *Materials*, 12(19), 3131.
- Limestone Cement (PLC) in Indian Scenario. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 10(4), 448-457.
- Mokrzycki E, Uliasz-Bocheńczyk A, 2003, Alternative Fuels for the Cement Industry. *Applied Energy*, 74(1-2), 95-100
- Olivier J G J, Janssens-Maenhout G, Peters J A H W, 2021, Trends in Global CO<sub>2</sub> Emissions: 2021 Report. *Environmental Research Letters*.

- Ordu Ş , Öztürk E, 2017, Çimento Fabrikalarında Alternatif Hammadde ve Yakıt Kullanımı: Örnek Çalışma.
- Rahman A, Rasul M G, Khan M M K, Sharma S, 2013, Impact of Alternative Fuels on the Cement Manufacturing Plant Performance: An Overview. *Procedia Engineering*, 56, 393-400.
- Reddy K H, Kumar S S, 2023, Cement Production and Sustainability Issues. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123-135
- Rietveld H M, 1969, A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures. *Applied Crystallography*, 2(2), 65-71.
- Schneider M, Romer M, Tschudin M, Bolio H, 2011, Sustainable Cement Production-Present and Future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 642-650.
- Serrano-González K, Reyes-Valdez A, Chowaniec O, 2017, Impact of the Use of Alternative Fuels on Clinker Reactivity. *Materiales De Construcción*, 67(326), e120-e120.
- Strigáč J, 2015, Effect of Selected Alternative Fuels and Raw Materials on the Cement Clinker Quality. *Selected Scientific Papers-Journal of Civil Engineering*, 10(2), 81-92.
- Taylor H F, 1997, *Cement Chemistry* (Vol. 2, p. 459). London: Thomas Telford.
- TCMB (Kasım 2003), “Çimento Üretiminde Alternatif Yakıt Kullanımının Çevresel Yararları”
- Theulen J, 2015, Cement Kilns: A Ready Made Waste to Energy Solution, *Waste Management World*, 12.
- Tsakiridis P E, Oustadakis P, Agatzini-Leonardou S, 2014, Black Dross Leached Residue: An Alternative Raw Material for Portland Cement Clinker. *Waste And Biomass Valorization*, 5, 973-983.
- Tunçez F D, 2021, Sürdürülebilir Çimento Üretiminde Çevre Yönetimi Yasal Bileşenleri. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 4(1), 41-56.

- Türk Standartları Enstitüsü, 2012, TS EN 197-1: Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü.
- Türk Standartları Enstitüsü, 2016, TS EN 196: Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Çimento Harçlarının Dayanım Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü.
- Willitsch D F, Sturm G, Wurst F, Prey T, 2002, Alternative Fuels in the Cement-Industry. Report of PMT-Zyklontechnik GmbH, Krems, Austria.
- Wojtacha-Rychter K, Kucharski P, Smolinski A, 2021, Conventional and Alternative Sources of Thermal Energy in the Production of Cement—An Impact on CO<sub>2</sub> Emission. *Energies*, 14(6), 1539.