

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

---

**Fosil ve Alternatif Yakıtların Klinker Mikroyapısına Etkisi**

---

**Alper Fatih İSLİ**

*Maden Mühendisliği Anabilim Dalı*

Şubat, 2024

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZ ONAYI

**Fosil ve Alternatif Yakıtların Klinker Mikroyapısına Etkisi**

Alper Fatih İSLİ

*Maden Mühendisliği Anabilim Dalı*

Bu doktora Tezi .././.... Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Dr. Öğr. Üyesi Nil YAPICI (Danışman) .....  
: Prof. Dr. Suphi URAL .....  
: Prof. Dr. Faruk KARADAĞ .....  
: Prof. Dr. Atilla Gürhan ÇELİK .....  
: Doç. Dr. Zehra Funda AKBULUT .....

**Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.**

**Tez No:**

**Prof. Dr. Sadık DİNÇER**  
Enstitü Müdürü

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                          |      |
|--------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZ .....                                                                 | I    |
| ABSTRACT .....                                                           | II   |
| TEŞEKKÜR.....                                                            | III  |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                  | IV   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                     | V    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                             | VIII |
| 1. GİRİŞ .....                                                           | 1    |
| 1.1. Kalkerin Tanımı ve Genel Yapısı .....                               | 7    |
| 1.2. Kil Minerallerinin Tanımı ve Genel Yapısı .....                     | 11   |
| 1.3. Pirit Külünün Tanımı ve Genel Yapısı .....                          | 15   |
| 1.4. Yakıtlar .....                                                      | 16   |
| 1.4.1. Çimento Sektöründe Fosil Yakıt Tanımı .....                       | 17   |
| 1.4.2. Alternatif Yakıt Tanımı.....                                      | 18   |
| 1.5. Klinkerin Kavramsal Tanımı ve Genel Yapısı.....                     | 23   |
| 1.6. Farin Değirmeni Çalışma Prosesi .....                               | 27   |
| 1.7. Döner Fırın Çalışma Prosesi.....                                    | 29   |
| 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....                                                | 35   |
| 3. MATERYAL VE METOT .....                                               | 43   |
| 3.1. Çanakkale Bozalan Mevkii Kalkeri.....                               | 43   |
| 3.1.1. Çanakkale Taştepe Mevki Kili .....                                | 45   |
| 3.1.2. Bandırma Bor ve Asit Fabrikası Pirit Külü .....                   | 46   |
| 3.1.3. Fosil Yakıtlar .....                                              | 47   |
| 3.1.4. Alternatif Yakıtlar .....                                         | 49   |
| 3.2. Metot.....                                                          | 56   |
| 3.2.1. Yapılan Analizler ve Ekipmanlar .....                             | 56   |
| 3.2.2. 1. Laboratuvar Ekipmanları.....                                   | 56   |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                            | 79   |
| 4.1. Fosil Yakıt Kullanılan Klinker Analizi .....                        | 81   |
| 4.1.1. Fosil Yakıt Kullanılan Klinker Mikroyapı İncelemesi .....         | 83   |
| 4.2. Alternatif Yakıt Kullanımı İle Elde Edilen Klinker Analizleri ..... | 92   |
| 4.2.1. Mikroyapı İncelemesi .....                                        | 94   |
| 4.2.2. Faz Miktarı Sonuçları .....                                       | 100  |
| 4.2.3. Mikroskopik Boyut Analiz Sonuçları.....                           | 102  |
| 4.3. TGA-DTA Analiz Sonuçları .....                                      | 103  |
| 4.4. Fiziksel Testler .....                                              | 105  |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5.Alternatif Yakıt Kullanımından Dolayı Yapılan Karlılık-Maliyet Hesabı ..... | 108 |
| 4.6.Baca Gazı Emisyon Gösterge Durumu (Poliaromatik Hidrokarbonlar).....        | 112 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....                                                   | 111 |
| KAYNAKLAR .....                                                                 | 113 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                  | 121 |



## Fosil ve Alternatif Yakıtların Klinker Mikroyapısına Etkisi

Alper Fatih İSLİ

*Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nil YAPICI*

*Maden Mühendisliği Anabilim Dalı*

### ÖZ

Türkiye ve Avrupa’da gelişen sanayileşme ile oluşan atıklar sürdürülebilir çevre yaşamını tehdit etmeye başlamıştır. Çimento fabrikaları, gün geçtikçe atıkların sebep olduğu çevresel ve ekonomik problemleri çözmek için sadece bir çimento üretim tesisi değil, aynı zamanda bir atık bertaraf tesisi niteliği de kazanmaktadırlar. Bu anlamda, bu çalışmanın asıl amacı alternatif yakıt olan ÖTL (Ömrünü tamamlamış lastik), RDF (Endüstriyel plastik), arıtma çamuru, atık yağ gibi çevresel tehdit unsuru içeren yüksek ısı değer gösteren malzemelerin, çimento fabrikaları döner fırınlarında tüketilen fosil yakıtlara (Petrokok, Linyit) ikame olarak kullanılmasının araştırılmasıdır.

Bu çalışmada bir döner fırın prosesi klinker üretiminde %100 fosil yakıt kullanılıyor iken, alternatif yakıtlar ile bu tüketim oranı %75 Petrokok, %14 ÖTL, %11 endüstriyel plastik atığı (RDF) şeklinde gerçekleşmiştir. Alternatif yakıtlar ile üretilen klinkerin mikro yapısı incelenmiş olup, aynı zamanda döner fırın çalışma koşulları irdelenmiştir.

Sonuç olarak; alternatif yakıt kullanımının, döner fırın spesifik enerjisinde 1-1.5 kWh/ton artışa neden olduğu ve alternatif yakıtlı beslemelerde siklon tepesi sıcaklıklarında artış olduğu belirlenmiştir. Ortalama olarak döner fırın prosesinde siklon tepesi çalışma sıcaklığının 300-350°C aralığında olduğu, ancak alternatif yakıtlı üretimlerde bu sıcaklığın zaman zaman 400°C'nin üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Ayrıca, alternatif yakıt ile üretilen klinker örneklerinde yaklaşık 1 MPa dayanım kaybı olduğu tespit edilmiştir. Klinker mikroyapısı incelemesinde boşluklu yapıların fazlalığında lamelli belit kümelenmelerinin yoğunlukları görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Klinker, Alternatif Yakıtlar, Fosil Yakıtlar, ÖTL, RDF

CUKUROVA UNIVERSITY  
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

PhD THESIS

---

**Effect of Fossil and Alternative Fuels on Clinker Structure**

---

Alper Fatih İSLİ

*Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Nil YAPICI*

*Department of Mining Engineering*

**ABSTRACT**

The waste, which has been formed as result of the developed industrialization in Türkiye and Europe, has started to threaten the sustainable environmental life. The cement factories are not only a cement production facility, but they also bear the characteristic of a disposal plant to solve the environmental and economic problems, caused by the wastes. In this sense, the main purpose of this study is to use OTL (tires that completed their lifetime), industrial plastic waste, materials such as residual oil and treatment sludge which indicate high calorific content and contain a threat element to the environment in place of fossil fuels (petroleum coke, steam coal) that are consumed in rotating ovens of the cement factories. In this study, in a clinker production of a rotating kiln process, the fuel consumption ratio has been realized with alternative fuels in the form of 75 % petroleum coke, 14 % OTL and 11 % industrial plastic waste. The microstructure of the clinker, which was produced with alternative fuels, has been inspected and the rotating oven working conditions have been probed.

As a result of this research, which was carried out in order to examine the effect of alternative fuels on the quality of clinker; It was determined that the use of alternative fuels caused an increase of 1-1.5 kWh/tonne in the specific energy of the rotary kiln and an increase in the cyclone top temperatures in alternative fuel feeds. It has been determined that the cyclone top operating temperature is in the range of 300-350°C on average in the rotary kiln process, but this temperature occasionally rises above 400°C in alternative fuel productions. In addition, it has been determined that there is a strength loss of about 1 MPa in clinker samples produced with alternative fuel. In the clinker microstructure examination, the presence of lamellar belite clusters in the abundance of void structures was detected.

**Keywords:** Alternative Fuels, Fossil Fuels, OTL, Clinker

## TEŞEKKÜR

Doktora çalışmamın her aşamasında yardım ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen yapıcı, yönlendirici fikirleri ve mütevazılığı ile bana daima yol gösteren Danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Nil YAPICI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmamı en başından itibaren destekleyen, her konuda yanımda olan, güçlü fikirleri ile ışık tutan Sayın Prof. Dr. Ahmet Mahmut KILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında her zaman yanımda olan ve Lisans öğrenim hayatıma yeni başladığımda ilk tanıştığım hocam Sayın Prof. Dr. Suphi URAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Desteğini her zaman hissettiğim ve aynı zamanda tez jürimde bulunan sayın Prof. Dr. Faruk KARADAĞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Örneklerimin DTA/TGA analiz sonuçlarını irdeleyen Sayın Dr.Öğretim Üyesi Mine TAYKURT DADAY'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında yardımını hiçbir zaman esirgemeyen, sabırla desteğini sürdüren değerli sınıf arkadaşım Sayın Arş. Gör. Dr. Esma EKİCİ KAHRAMAN'a teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında teknik desteklerini ve bilgi paylaşımlarını esirgemeyen Akçansa Çimento Teknik Genel Müdür Yardımcısı Sayın Dr. Gergely BOROSI ve Sayın Fabrika Müdürü Ömer Sinan GENÇ'e teşekkürlerimi sunarım.

Klinker üretimi safhasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Akçansa Çimento Çanakkale Fabrikası Klinker Üretim Müdürü Sayın Ali Burak YAKAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında bilgisiyle, tecrübesiyle her daim ışık tutan, sektörün en duayen insanı olan Çimsa Americas Tesis Üretim Müdürü Sayın İrfan AKİKOL'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Toparlanan numunelerin analizlerinin yapılması safhasında bilgi paylaşımında bulunduğum, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli çalışma arkadaşlarım Akçansa Çimento Çanakkale Fabrikası Kalite Müdürü Sayın Pınar UYSAL TÜTEN, Kalite Yöneticisi Sayın Selma CESUR ve Hammadde Şefi Sayın Tayfun ATAKAN'a ve ekiplerine teşekkürlerimi sunarım.

Analiz verilerinin toparlanması, anlamlı hale getirilmesi ve paylaşılması hususunda desteğini her zaman gördüğüm ekip arkadaşım Akçansa Çanakkale Fabrikası Üretim Veri Toplama ve Raporlama Sorumlusu İsmail ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmam maddi olarak destekleyen Akçansa Çimento San. ve Tic. A.Ş yönetimine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında her daim yanımda olan, olumlu olumsuz her koşulda desteklerini esirgemeyen babam Sayın Muammer İSLİ'ye, Annem Zeynep İSLİ'ye ve Kardeşim Begüm Şule İSLİ'ye değerli eşim Av. Merve Dilber İSLİ ve biricik kızım Lina İSLİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 1.1. Türkiye’de Kullanılan Kalkerlerin Adlandırılması (Kökipek, 2010) .....                                                  | 7   |
| Çizelge 1.2. Kalkerin Fiziksel Özellikleri.....                                                                                      | 9   |
| Çizelge 1.3. Kalkerin Kimyasal Özellikleri .....                                                                                     | 10  |
| Çizelge 1.4. Kalkerin Kristal Boyutları (µm).....                                                                                    | 10  |
| Çizelge 1.5. Kalkerin 800 °C’deki Zamana Bağlı Ağırlık Kaybı Yüzdesi .....                                                           | 10  |
| Çizelge 1.6. Türkiye’de Kullanılan Kalkerlerin Adlandırılması .....                                                                  | 11  |
| Çizelge 3.1. Çimento imalatı için kullanılan materyaller ve bölgeler .....                                                           | 43  |
| Çizelge 3.2. Fosil Yakıt Analizleri.....                                                                                             | 48  |
| Çizelge 3.4. Lastiklerin kompozisyonları (Asamany ve ark., 2015). .....                                                              | 52  |
| Çizelge 3.5. Endüstriyel Plastik Atık (ATY) Hazırlama Tesislerinde Hazırlanacak Yakıtın Özellikleri (Yazıcı, 2019). .....            | 53  |
| Çizelge 3.6. Blaine Hesaplama Çizelgesi .....                                                                                        | 61  |
| Çizelge 4.1. Rutubet, Kül, Kükürt ve Uçucu Madde Analizleri .....                                                                    | 79  |
| Çizelge 4.2. Klor, Karbon ve Kalori Analizleri.....                                                                                  | 80  |
| Çizelge 4.3. Klinkerlerin Özelliklerine Göre Yapılan Kimyasal Analiz Sonuçları .....                                                 | 81  |
| Çizelge 4.4. Klinker Mineral Analiz Sonucu.....                                                                                      | 82  |
| Çizelge 4.5. Mikroskopik Faz Tayini (Boşluk miktarı ile birlikte yüzdesel gösterim) .....                                            | 89  |
| Çizelge 4.6. Mikroskopik Faz Tayini (Boşluk miktarı olmadan yüzdesel gösterim) .....                                                 | 89  |
| Çizelge 4.7. Mikroskopik Boyut Analiz Sonuçları.....                                                                                 | 91  |
| Çizelge 4.8. Klinkerlerin Özelliklerine Kimyasal Analiz Sonuçları.....                                                               | 93  |
| Çizelge 4.9. Klinkerlerin Minerallerine Göre Kimyasal Analiz Sonuçları .....                                                         | 93  |
| Çizelge 4.10. Mikroskopik Faz Tayini (Boşluk miktarı ile birlikte yüzdesel gösterim).....                                            | 100 |
| Çizelge 4.11. Mikroskopik Faz Tayini (Boşluk miktarı olmadan yüzdesel gösterim) .....                                                | 100 |
| Çizelge 4.12. Mikroskopik Analiz Sonuçları .....                                                                                     | 102 |
| Çizelge 4.13. 27/08/2023 ve 17/08/2023 gün çıkışlı örneklerin sıcaklık aralıklarında belirlenen kütle değişim değerleri (ağ.%) ..... | 104 |
| Çizelge 4.14. Dayanım, Kızdırma Kaybı, İncelik ve Öğünme Süresi Analizleri .....                                                     | 106 |
| Çizelge 4.15. Elek Analiz Sonuçları.....                                                                                             | 106 |
| Çizelge 4.16. Klinker Fazları, Modülleri ve Likit Faz Oranları.....                                                                  | 107 |
| Çizelge 4.17. Spesifik Enerji Tüketimleri .....                                                                                      | 107 |
| Çizelge 4.18. Klinker Üretiminde Fosil ve Alternatif Yakıt Tüketimleri .....                                                         | 108 |
| Çizelge 4.19. Klinker Üretiminde Fosil ve Alternatif Yakıttan Yapılan Karlılık Hesabı .....                                          | 109 |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Çimento Üretim Akış Şeması.....                                            | 1  |
| Şekil 1.2. Türkiye Çimento Fabrikaları Son 5 Yıl Atık Yakıt Kullanım Oranı (%).....   | 2  |
| Şekil 1.3. 2021 Yılı Türkiye Çimento Fabrikaları Atık Türüne Göre Tüketim Tonajı..... | 2  |
| Şekil 1.4. Avrupa CO <sub>2</sub> Vergi Ödeme Miktarı (€/mt CO <sub>2</sub> ) .....   | 3  |
| Şekil 1.5. Primer silikatların ayrışması sonucu kil minerallerinin oluşumu .....      | 13 |
| Şekil 1.6. Klinker üretiminde yakıt kullanımı.....                                    | 16 |
| Şekil 1.7. Farin değirmeni ve homojenizasyon .....                                    | 29 |
| Şekil 1.8. Ön ısıtıcı malzeme ve gaz sıcaklık profili .....                           | 30 |
| Şekil 1.9. Döner fırında klinker üretim diyagramı .....                               | 33 |
| Şekil 3.1. Çalışma alanı kalker örnekleri.....                                        | 44 |
| Şekil 3.2. Akçansa Çanakkale fabrikası kalker ocağı .....                             | 44 |
| Şekil 3.3. Kalker ocağı tabakalanma ve fay zonları.....                               | 45 |
| Şekil 3.4. Akçansa Çanakkale Taştepe kil ocağı.....                                   | 46 |
| Şekil 3.5. Akçansa Çanakkale Taştepe Kili .....                                       | 46 |
| Şekil 3.6. Pirit külü stok alanı .....                                                | 47 |
| Şekil 3.7. Petrokok döküm sahası.....                                                 | 48 |
| Şekil 3.8. Linyit döküm sahası .....                                                  | 49 |
| Şekil 3.9. Kırpılmış atık lastik besleme yeri .....                                   | 50 |
| Şekil 3.10. Atık yağ .....                                                            | 50 |
| Şekil 3.11. Kırpılmış atık lastik (ÖTL).....                                          | 51 |
| Şekil 3.12. Kırpılmış atık lastik besleme hattı yatırımı teknik görseli.....          | 51 |
| Şekil 3.13. İSTAÇ endüstriyel plastik atık tesisi.....                                | 52 |
| Şekil 3.14. Endüstriyel plastik atığı/(ATY) stok alanı.....                           | 53 |
| Şekil 3.15. Atıktan türetilmiş yakıt~3500 Kcal/kg.....                                | 54 |
| Şekil 3.16. Endüstriyel plastik atığı kırıcı ünitesi .....                            | 54 |
| Şekil 3.17. Endüstriyel plastik atığı besleme iş akım şeması .....                    | 54 |
| Şekil 3.18. Endüstriyel plastik atığı stoklama ve besleme (vecoplan, pfister) .....   | 55 |
| Şekil 3.19. Kurutulmuş arıtma çamuru .....                                            | 55 |
| Şekil 3.20. Kurutulmuş arıtma çamuru üretim prosesi .....                             | 55 |
| Şekil 3.21. Arıtma çamuru stoklama ve dozajlama ekipmanları (Akçansa) .....           | 56 |
| Şekil 3.22. Elek cihazı .....                                                         | 58 |
| Şekil 3.23. Etüv görünümü.....                                                        | 58 |

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.24. Kül fırını .....                                                                                                       | 59 |
| Şekil 3.25. Sarma aleti .....                                                                                                      | 59 |
| Şekil 3.26. Şatölye çubukları .....                                                                                                | 60 |
| Şekil 3.27. Vikat aleti .....                                                                                                      | 60 |
| Şekil 3.28. Blaine cihazı .....                                                                                                    | 62 |
| Şekil 3.29. Öğütücü değirmen .....                                                                                                 | 63 |
| Şekil 3.30. Dayanım cihazı (Akçansa Labratuvarı).....                                                                              | 64 |
| Şekil 3.31. XRAY cihazı (Akçansa Labratuvarı).....                                                                                 | 65 |
| Şekil 3.32. XRD cihazı (Akçansa Labratuvarı) .....                                                                                 | 66 |
| Şekil 3.33. Diferansiyel termal analiz cihazı (DTA) (Akçansa Labratuvarı) .....                                                    | 67 |
| Şekil 3.34. Termogravimetrik analiz cihazı (TGA) (Akçansa Labratuvarı).....                                                        | 68 |
| Şekil 3.35. Kalori tayini cihazı .....                                                                                             | 69 |
| Şekil 3.36. Yakma teli.....                                                                                                        | 70 |
| Şekil 4.1. XRD cihazından elde edilmiş olan kırınım deseni .....                                                                   | 83 |
| Şekil 4.2. Klinker 500x büyütme;Ham Karışım Kaynaklı Etkiler.....                                                                  | 84 |
| Şekil 4.3. Klinker 500x büyütme; C <sub>3</sub> A mineralleri.....                                                                 | 84 |
| Şekil 4.4. Klinker 100X büyütmede Belit (C <sub>2</sub> S) mineral görünümü .....                                                  | 85 |
| Şekil 4.5. Klinker 100x büyütme; serbest kireç görünümü .....                                                                      | 85 |
| Şekil 4.6. Klinker 500x büyütme; krem rengi (C <sub>4</sub> AF) zemin üzerindeki gri kristaller C <sub>3</sub> A mineralleri ..... | 86 |
| Şekil 4.7. Klinker 200x büyültme; Alit (C <sub>3</sub> S), belit (C <sub>2</sub> S) kristalleri.....                               | 87 |
| Şekil 4.8. Klinker 200x büyültme; Alit (C <sub>3</sub> S), belit (C <sub>2</sub> S) kristallerinin boyutsal görünümü.....          | 87 |
| Şekil 4.9. Klinker 200x büyültme, belit lamelleri .....                                                                            | 87 |
| Şekil 4.10. Klinker 500x büyültme, Alit kenarlarındaki küçük kahverengi yuvarlak yapılar - İkincil belit görünümü .....            | 88 |
| Şekil 4.11. Klinker 500x büyültme, Alit ve ikincil belit oluşumu .....                                                             | 88 |
| Şekil 4.12. Klinker 500x büyültme, Alit lamelleri .....                                                                            | 89 |
| Şekil 4.13. Klinker 200x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış alit görünümü) .....                                                 | 90 |
| Şekil 4.14 200x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış belit görünümü) .....                                                         | 90 |
| Şekil 4.15. 100x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış sıvı faz görünümü) .....                                                     | 90 |
| Şekil 4.16. 100x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış boşlukların görünümü) .....                                                  | 91 |
| Şekil 4.17. Alit kristali boyut dağılımı.....                                                                                      | 92 |
| Şekil 4.18. Belit kristali boyut dağılımı .....                                                                                    | 92 |
| Şekil 4.19. XRD cihazından elde edilmiş olan kırınım deseni .....                                                                  | 94 |

|                                                                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.20. 500x büyütme (kahverengi açık kahverengi kristaller alit, krem rengi zemin üzerindeki gri kristaller $C_3A$ mineralleridir. ....                         | 95  |
| Şekil 4.21. 200x büyütme(kahverengi kristaller alit, mavi kristaller belit mineralleridir kümeli belit görünümü .....                                                | 96  |
| Şekil 4.22. 200x büyütme, siyah yuvarlak kümeli yapılar serbest kireç mineralleridir. ....                                                                           | 96  |
| Şekil 4.23. 500x büyütme, Kahverengi kristaller alit, krem rengi ( $C_4AF$ ) zemin üzerindeki gri kristaller $C_3A$ mineralleridir. ....                             | 97  |
| Şekil 4.24. 200x büyütme (alit boyut seçimi için orijinal foto ve taranmış kopyası).....                                                                             | 97  |
| Şekil 4.25. 200x büyütme belit boyut seçimi için orijinal foto ve taranmış kopyası .....                                                                             | 98  |
| Şekil 4.26. 200x büyütme, mavi kristaller belit, krem rengi zemin üzerindeki gri kristaller $C_3A$ mineralleridir .....                                              | 98  |
| Şekil 4.27. Klinker belitli görünüm, 200x büyütme .....                                                                                                              | 99  |
| Şekil 4.28. 500x büyütme, alit kenarlarındaki küçük yuvarlak yapılar - ikincil belit görünümü ....                                                                   | 99  |
| Şekil 4.29. 500x büyütme, Kahverengi kristaller alit, krem rengi zemin üzerindeki gri kristaller $C_3A$ mineralleridir, Ayrık sıvıfaz ve ikincil belit görünüm ..... | 100 |
| Şekil 4.30. 100x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış alit görünümü) .....                                                                                           | 101 |
| Şekil 4.31. 200x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış belit görünümü) .....                                                                                          | 101 |
| Şekil 4.32. 200x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış sıvıfaz görünümü) .....                                                                                        | 101 |
| Şekil 4.33. 200x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış boşlukların görünümü).....                                                                                     | 102 |
| Şekil 4.34. Alit kristali boyut dağılımı.....                                                                                                                        | 103 |
| Şekil 4.35. Belit kristali boyut dağılımı .....                                                                                                                      | 103 |
| Şekil 4.36. 17.08.2023 kodlu örneğin TG-DTA eğrisi .....                                                                                                             | 103 |
| Şekil 4.37. 27.08.2023 kodlu örneğin TG-DTA eğrisi.....                                                                                                              | 104 |

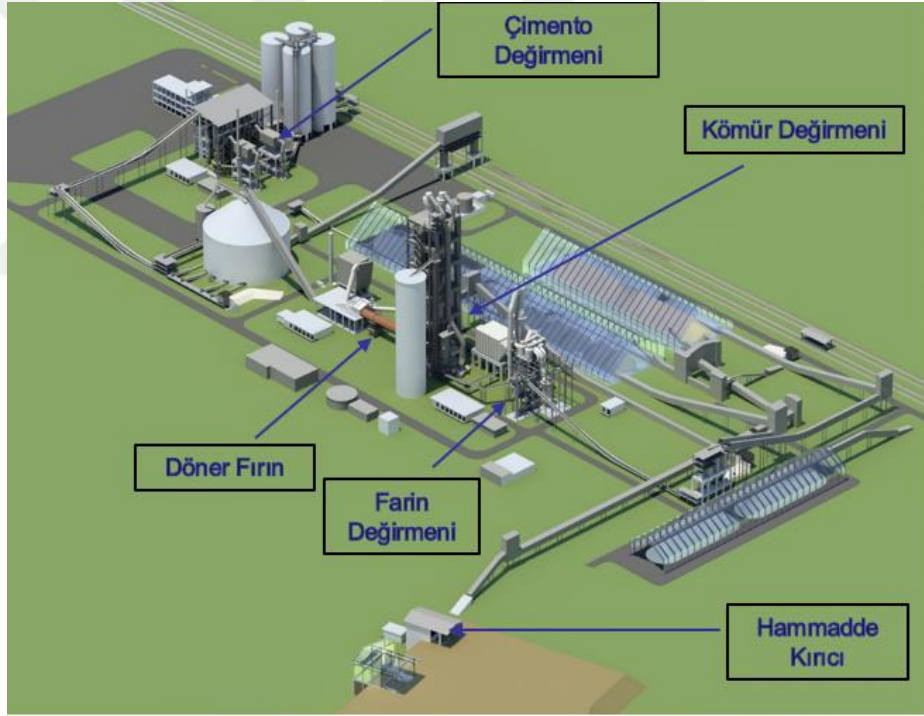
## SİMGELER VE KISALTMALAR

|                   |                                                                                                                                 |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A.M               | : Alüminyum Modülü                                                                                                              |
| A                 | : Kroze ve içinde kalan kül kalıntısı (gr) ağırlığı,                                                                            |
| ASTM C 666        | : Amerikan Society for Testing and Materials C (Hidrolik Çimento Kimyasal Analizi için Standard Test Yöntemi)                   |
| ASTM D3174-04     | : Amerikan Society for Testing and Materials (Kömür ve Kömürden Alınan Kok Analiz Numunesindeki Kül İçin Standart Test Yöntemi) |
| ASTM Type I-II LA | : Amerikan Society for Testing and Materials (Low Alkali Çimento Tipi)                                                          |
| ATY               | : Atıktan Türetilmiş Yakıt                                                                                                      |
| B                 | : Boş kroze ağırlığı (gr),                                                                                                      |
| C                 | : Başlangıç numune ağırlığı (gr).                                                                                               |
| C2S               | : Dikalsiyum Silikat (Belit)                                                                                                    |
| C3A               | : Trikalsiyum Alüminat                                                                                                          |
| C3S               | : Trikalsiyum Silikat (Alit)                                                                                                    |
| C4AF              | : Tetrakalsiyum Alüminaferrit (Ferrit)ÇED                                                                                       |
| CSH               | : Kalsiyum Silikat Hidrat                                                                                                       |
| DSS               | : Kurutulmuş Arıtma Çamuru                                                                                                      |
| DTA               | : Diferansiyel Termal Analiz                                                                                                    |
| DTG               | : Termogravimetrik diferansiyel eğri                                                                                            |
| H.M               | : Hidrolik Modül                                                                                                                |
| İSKİ              | : İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi                                                                                           |
| İSTAÇ             | : İstanbul Çevre Yönetimi Sanayi ve Ticareti Anonim Şirketi                                                                     |
| K                 | : Cihaz Sabiti                                                                                                                  |
| Kcal              | : Kilo Kalori                                                                                                                   |
| KDF               | : Kireç Doygunluk Faktörü                                                                                                       |
| KK                | : Kızdırma Kaybı                                                                                                                |
| Kwh               | : Kilowat Saat                                                                                                                  |
| M                 | : Boş Kroze                                                                                                                     |
| m1                | : Dolu (Yaş Tartım) Kroze                                                                                                       |
| m2                | : Dolu (Kuru Tartım) Kroze                                                                                                      |
| M1                | : Deney Numunesi Kütlesi: m1-m                                                                                                  |
| M2                | : Kızdırılmış Deney Numunesi Sabit Kütlesi = m2-m                                                                               |
| ÖKK               | : Öğütme Kolaylaştırıcı Katkı                                                                                                   |
| ÖTL               | : Ömrünü Tamamlamış Lastik                                                                                                      |
| PCB               | : Poliklorlu Bifenil                                                                                                            |
| S.M.              | : Silikat Modülü                                                                                                                |

|                    |                                                             |
|--------------------|-------------------------------------------------------------|
| S                  | : Kükürt (SO <sub>3</sub> )                                 |
| SEM                | : Taramalı Elektron Mikroskobu                              |
| T                  | : Deney Sıcaklığı °C                                        |
| T                  | : Deney Numune Kütlesi (gr)                                 |
| TGA                | : Termogravimetrik Analiz                                   |
| TS EN 1097-5       | : Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellik standard Testi    |
| TS EN 196-1        | : Dayanım Tayini Testi                                      |
| TS EN 196-2 (2014) | : Çimento Kimyasal Analiz Testi                             |
| TS EN 196-6        | : Çimento İncelik Analiz Testi                              |
| TS EN 197-1        | : Çimento Bileşenleri, Özellikleri ve Uygunluk Analiz Testi |
| XRD                | : X- Işını Difraksiyon Spektroskopisi                       |
| XRF                | : X- Işını Floresans Spektrometrisi                         |

## 1. GİRİŞ

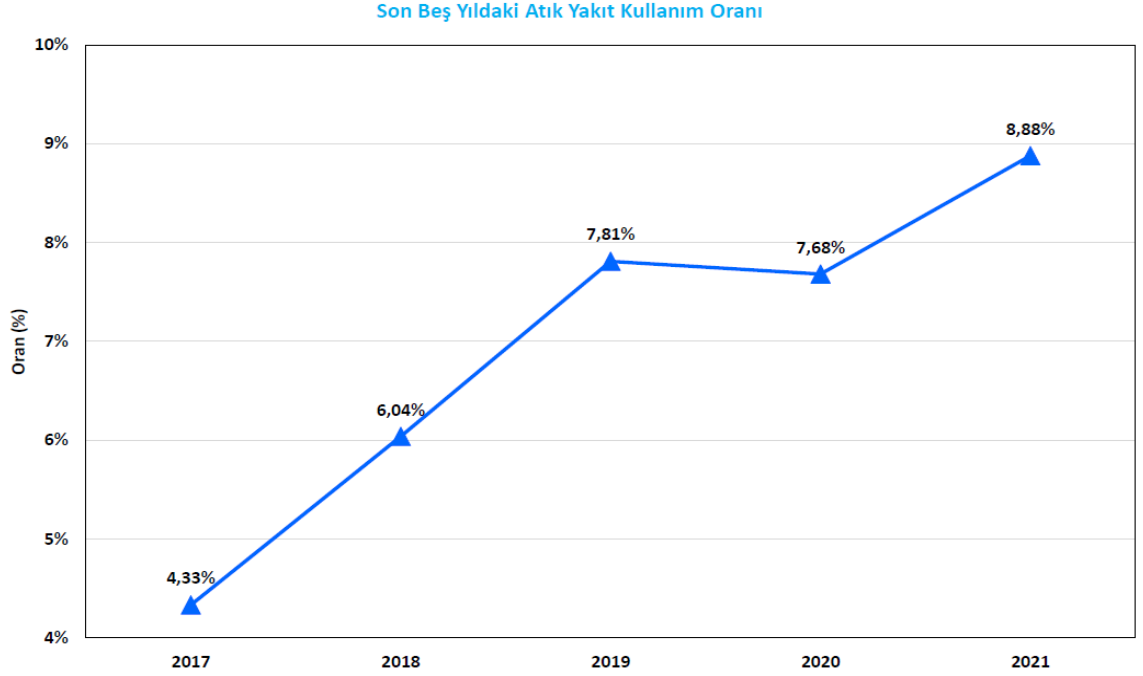
Türkiye dünyadaki çimento üreticileri arasında ilk 10 ülke arasında yer almaktadır. Türkiye 2022 rakamları esas alındığında 119 milyon ton çimento üretim kapasitesi ile dünyanın 5. büyük ve Avrupa'nın da lider üreticileri arasına girmiştir. Çimento üretiminde kalker, kil, demir, boksit, kaolen gibi diğer yardımcı hammaddeler kullanılır. Çimento üretiminde bu malzemelerin malzemelerin kırıcılarda kırılması ile başlamaktadır. Kırılan malzemeler daha sonra homojenizasyon sistemlerinden geçerek öğütülmek üzere farin değirmenlerine gider. Farin latince bir kavramdır ve "un" olarak tarif edilir. Farin değirmeninde öğütme işlemi tamamlanana malzemelerin daha sonra silolara beslemesi yapılır. Farin silolarında stoklanan malzeme fırına beslemek üzere yola çıkar ve ilk üretilen ara ürüne "klinker" denilir. Klinker çimentonun ana hammaddesidir. Klinker kalker, alçı, uçucu kül ve cüruf gibi katkıları ile de çimento değirmenlerinde öğütülür. Daha sonra piyasanın talepleri doğrultusunda istenilen içeriğe göre hazırlanan çimento üretilir (Şekil 1.1).



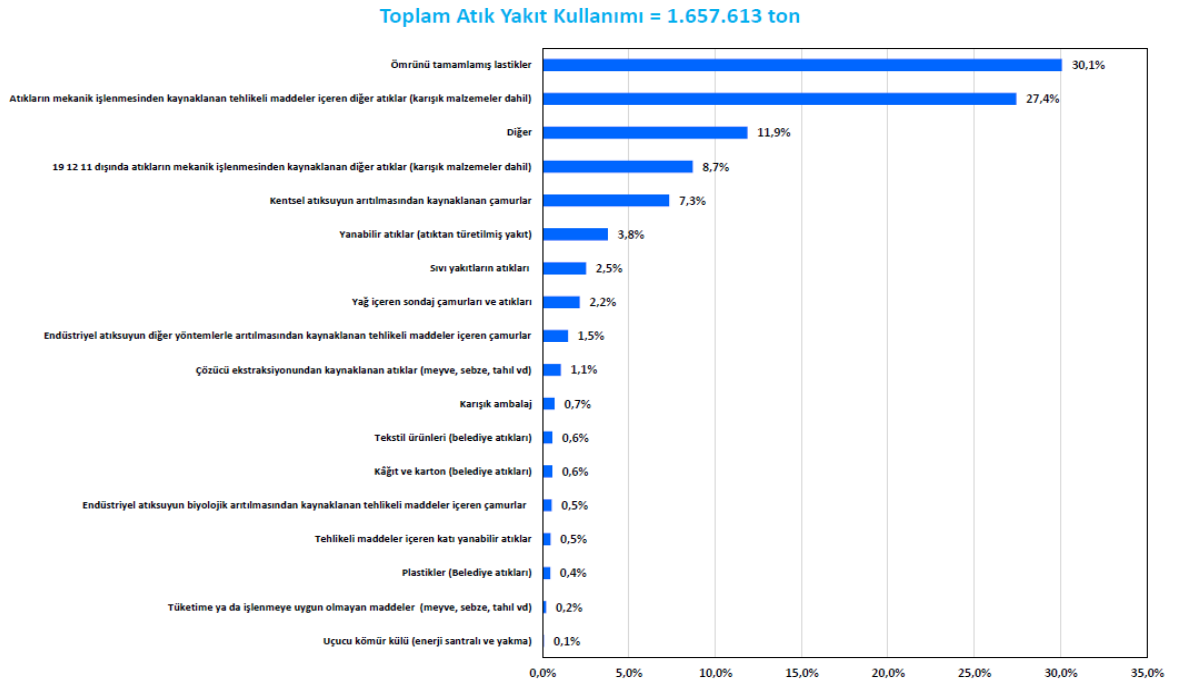
Şekil 1.1. Çimento Üretim Akış Şeması

Çimento fabrikaları yüksek enerji tüketmesinin yanı sıra enerji de üreten bir tesistir. Bu tesislerin döner fırın ön ısıtıcılarında yüksek ısırl güçler açığa çıkmakta ve bu ısırl güçler kullanılarak atık ısı tesisleri kurulmaktadır. Böylelikle, buhar türbinleri ile elektrik üretimi sağlanarak sıcak su da fabrika bünyesinde kullanabilmektedir. Ayrıca, çimento fabrikalarında atıkların yakılması ile fosil yakıt tüketiminin düşürülmesine katkı sağlanmaktadır. Böylece yakılan atıklardan ortaya çıkan CO<sub>2</sub> salınım miktarı düşürülerek daha çevreci fabrikalar haline gelmesi sağlanmış olacaktır.

Son 5 yılda çimento fabrikalarında arıtma çamuru, ömrünü tamamlamış lastik, endüstriyel atık, plastik ve atık yağ gibi atıkların yakılmasında artış olmuştur. Yeni gelişen teknolojiler ile bu oranlar daha da hızlı artış gösterecektir (Şekil 1.2,1.3).



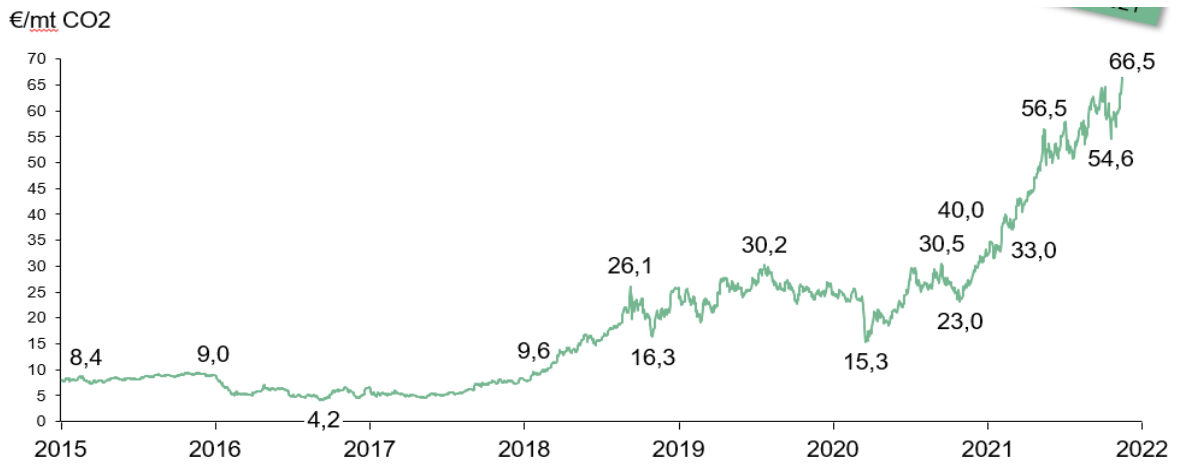
Şekil 1.2. Türkiye Çimento Fabrikaları Son 5 Yıl Atık Yakıt Kullanım Oranı (%)  
(Enerji verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı Çimento Sektörü Kıyaslama Raporu 2021).



Şekil 1.3. 2021 Yılı Türkiye Çimento Fabrikaları Atık Türüne Göre Tüketim Tonajı  
(Enerji verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı Çimento Sektörü Kıyaslama Raporu 2021).

Klinker üretiminde atıkların kullanımı hem enerji tüketimi hem de çevresel sürdürülebilirlik yaklaşımını doğrudan etkilemektedir.

AB Komisyonu tarafından 2021 yılında yayımlanan “55’e Uyum Paketi” çerçevesinde ise, Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmasının karbon yoğun beş sektör (çimento, elektrik, gübre, demir-çelik ve alüminyum) için 2023 yılından itibaren öncelikle bir emisyon raporlaması yükümlülüğü olarak başlatılması, ardından da 2026 yılından itibaren söz konusu raporlama sistematığına dayalı olarak vergi uygulamasına geçilmesi öngörülmektedir (BDDK, 2023). Avrupa’da yüksek oranda CO<sub>2</sub> vergileri 2015-2022 yılları arasında vergi uygulamaları Şekil 1.4’de verilmiştir.



Şekil 1.4. Avrupa CO<sub>2</sub> Vergi Ödeme Miktarı (€/mt CO<sub>2</sub>)  
(Heidelberg Çimento Global Alternatif Yakıt Raporu, 2021)

Çimento sektörünün karbon vergisinden muafiyet için eşik değer klinker üreten tesisler için; üretim başına emisyon 0,766 ton CO<sub>2</sub>’in altı, çimento üreten tesisler için çimento üretim başına emisyon 0,498 ton CO<sub>2</sub>’in altı şartı bulunmaktadır. Bu bağlamda karbon ayak izi Godier, 2010’a göre bir faaliyetin doğrudan veya dolaylı olarak neden olduğu veya bir ürünün, bireyin, bir organizasyonun, hatta bir kentin veya devletin ömrü boyunca unca birikmiş olan toplam karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) ve diğer sera gazı emisyon miktarının ölçüsüdür.

Çimento endüstrisi, küresel karbon salımının %8’inden sorumludur. Çimento üretiminde “Kapsam 1” olarak tanımlanan doğrudan karbon emisyonunun iki kaynağı bulunmaktadır. Açığa çıkan emisyonun en az %50’sinden sorumlu olan kireç taşının yüksek sıcaklıkta karbon salımına neden olduğu proses emisyonudur (Türkçimento, 2023). Diğeri ise fırın reaksiyonları için gerekli sıcaklığa ulaşmak için yakılan yakıtlardan kaynaklanan termal emisyonudur. Yarı ürün olan klinker üretimine ait olan bu emisyonlar yaklaşık 800-900 kg CO<sub>2</sub>/ton klinker düzeyindedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda karbon ayak izinin azalması klinker/çimento oranının azalmasına bağlı olduğu



ortaya çıkarılmış klinker miktarının %1 oranında azalması karbon emisyonunun da yaklaşık aynı oranda azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir (Türkçimento, 2023).

Bu çalışmada karbon ayak izinin tespitinden çok alternatif yakıtın klinker mikroyapısı üzerine etkisi araştırılmıştır. Ancak klinker oranı yanmanın zorlaşp CO' in yükselmesini önlemek O<sub>2</sub> miktarını yükseltmek amacı ile zaman zaman düşürülmüştür.

Klinker, çimento üretiminde temel ham madde olan kalsiyum silikat bileşiklerinin oluştuğu bir ara üründür. Çimentonun kalitesi; klinkerin bileşimi ve özelliklerine bağlı olduğu düşünülmektedir. Klinkerdeki kalker ve kil, çimento kalitesini etkileyen önemli faktörler arasında yer almaktadır. Dolayısıyla kalker ve kilin çimento kalitesine olan etkisinin araştırılmasının bu alan için oldukça önemli olduğu düşünülmektedir. Kaya (2023)'ya göre; çimento, suyla birleştiğinde hidrasyon reaksiyonlarıyla sertleşen ve uzun süre dayanıklılığını koruyan inorganik bir malzemedir. Çimentonun kimyasal bileşimi, inceliği ve partikül dağılımı, basınç dayanımını doğrudan etkileyen faktörlerdir. Klinker, kalker, alçı taşı, gibi yan katkı malzemeleriyle birlikte çimento değirmenlerinde homojen bir şekilde öğütülerek hazırlanmaktadır. Bu işlevi nedeniyle çimento, üretim sürecinin en kritik aşamalarından birini oluşturmaktadır (Gülşen, 2016).

Çimento üretim teknolojisinde, çimentonun fiziksel ve dayanıklılık özelliklerinin olumlu olabilmesi, kullanılan farinin kimyasal bileşimiyle doğru orantılıdır. Farin, çimento üretimi için fırına vermeye hazırlanan hammadde karışımını ifade eder. Genel olarak, çimento üretiminde, sedimenter kayaç olarak adlandırılan kalker (kireçtaşı), kil veya marn ana hammadde olarak kullanılır. Klinker elde etmek için kalker ve kil gibi iki kaynak malzeme önemlidir. Kalkerden CaO (Kalsiyum oksit), kilden SiO<sub>2</sub> (Silisyum dioksit), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Alüminyum oksit) ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Demir oksit) elde edilir. Eğer CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranları standartlara uygunsa, malzeme çimento üretiminde kullanılır. Ancak, genellikle standart oranlarda bir içerik dağılımı nadiren görülür. Bu nedenle, yüksek kireç içeriğine sahip kalker ve yüksek silis içeriğine sahip kil kullanımı tercih edilir. Ayrıca, çimento üretim sürecinde kalker, marn, puzolonik malzemeler ve öğütme aşamasında alçıtaşı da kullanılmaktadır (Akan, 2019; Koçak, 2008).

Çimento üretimi için gerekli hammadde doğada tek bir kaynaktan bulunmadığından, ekonomik ve sürdürülebilir bir tedarik için mümkün olduğunca az çeşit malzeme kullanılması önemlidir. Bu nedenle, çimento üretiminde genellikle kalker, marn ve kil karışımı gibi malzemeler tercih edilir, tabii ki bu malzemelerin oranları standartlara uygun olmalıdır. Analizler, döner fırından çıkan klinkerin uygun kimyasal ve mineral özelliklere sahip olmasını sağlamak için önemlidir. Hammadde karışımlarının doğru bir şekilde yapılabilmesi için kimyasal modüllere ihtiyaç vardır. Farin olarak fırına gönderilen ham karışım, çimentonun fiziksel özellikleri, dayanımı ve dayanıklılığı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu nedenle bileşenlerin yüzde oranlarının doğru bir şekilde ayarlanması büyük önem taşır.

Çağımızda, çimentolarda kullanılan katkı maddeleri, ekonomik ve teknik avantajlarının yanı sıra klinker üretimini minimize ederek CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltma potansiyeli nedeniyle tercih edilen

bir hale gelmiştir. Geçmişte, genellikle puzolanik özelliklere sahip malzemeler bu amaçla kullanılırken, kalker katkısı genellikle %5 oranında minör bir bileşen olarak sınırlı tutulmuştur. Ancak günümüzde, EN 197-1 standardı ile birlikte, ek bileşen olarak kalkerin kullanıldığı katkılı çimentoların üretimi yaygınlaşmıştır (Tosun, Felekoğlu, Baradan ve Altun, 2009).

Çimento üretimi, hammadde temini, kırma, eleme, öğütme, sınıflandırma, ısıtma işlem ve klinkerin alçı taşı veya tras gibi farklı maddelerle öğütülüp sınıflandırılması gibi bir dizi adımdan oluşur (Karahana, 2016). Hammadde karışımı (farin), istenen kimyasal bileşimi elde etmek için dengeli bir şekilde harmanlanır ve öğütülerek yaklaşık 1450 °C'ye kadar ısıtılan döner fırına gönderilir. Farin, fırında eriyerek sıvı hale geçer ve ardından çeşitli reaksiyonlara girerek fırını terk eder. Soğutma bölümünde, granül formdaki ara ürün olan klinker elde edilir. Klinker, alçı taşı ile birlikte öğütülerek nihai ürün olan çimento elde edilir.

Klinkerdeki kalker ve kilin çimento kalitesine etkisi, klinkerdeki bileşenlerin oranı, reaktiflikleri ve dağılımları gibi faktörlere bağlıdır. Kalker ve kil miktarları, çimento dayanımı, reaksiyon hızı, hidrasyon süreci ve çimento mikro yapısı gibi çeşitli özellikleri etkileyebilir. Kalker ve kilin doğru oranda kullanılması, istenen çimento kalitesinin elde edilmesini sağlarken, yanlış oranlarda veya dengesizliklerde çimento kalitesi düşebilir.

Klinkerdeki kalker ve kilin çimento kalitesine olan etkisi oldukça önemlidir. Çünkü çimento üretimi için temel ham madde olan klinker, kalker ve kil yüksek sıcaklıkta kalsinasyonu ile elde edilir. Bu nedenle, klinkerdeki kalker ve kil içeriği, çimento kalitesini ve performansını belirleyen önemli faktörlerdir. Klinkerdeki kalker ve kilin kimyasal bileşimi, çimento reaktivitesini etkiler. Kalker içeriği arttıkça çimento, daha hızlı bir şekilde sertleşebilir ve ilk dayanımı yüksek olabilir. Kil içeriği arttıkça ise çimentonun hidrasyon süreci yavaşlayabilir ve uzun dönemde dayanımın gelişimine katkıda bulunabilir. Klinkerdeki kalker ve kil içeriği, çimento partiküllerinin fiziksel özelliklerini etkiler. Kalker içeriği arttıkça çimento taneleri daha ince olabilir ve su gereksinimi artabilir. Kil içeriği arttıkça ise, çimentonun sertleşme süreci etkilenebilir ve çatlak oluşumuna yatkınlık artabilir. Doğru kalker ve kil içeriği seçimi, çimento dayanıklılığı ve performansı üzerinde doğrudan etkili olabilir. Çimento üretiminde uygun kalker ve kil içeriği seçimi, çimento dayanıklılığını artırabilir ve yapıların uzun ömürlülüğünü sağlayabilir. Klinkerdeki kalker ve kilin etkisi aynı zamanda çevresel açıdan da önemlidir. Düşük kalker içeriği, çimento üretim sürecinde daha az karbon salınımına neden olabilir ve bu da çimento endüstrisinin sürdürülebilirliğini artırabilir.

Klinkerdeki kalker ve kilin çimento kalitesine olan etkisi, yapı malzemelerinin geliştirilmesi ve inşaat endüstrisinin sürdürülebilirliği açısından büyük öneme sahiptir. Doğru klinker bileşimi seçimi ve uygun kalker ve kil içeriği, çimento üretiminin kalitesini ve performansını artırarak yapıların dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü sağlayabilir. Bu nedenle, bu etkilerin daha iyi anlaşılması ve doğru uygulanması, yapıların güvenliği ve inşaat sektörünün sürdürülebilirliği için hayati öneme sahip olduğu düşünülmektedir.

Klinkerdeki kalker ve kil, çimento üretim sürecindeki temel bileşenler arasında yer almaktadır ve çimento kalitesine doğrudan etkisi bulunmaktadır. Klinker, yüksek sıcaklıkta kireçtaşı (kalker) ve kil karışımının kalsinasyonu ile elde edilir. Bu nedenle, klinkerdeki kalker ve kilin çimento kalitesine olan etkisi, inşaat endüstrisi için büyük bir öneme sahiptir ve çimento reaktivitesini belirlemektedir. Kalker içeriği arttıkça, çimento daha hızlı bir şekilde sertleşebilir ve ilk dayanımı yüksek olabilir. Diğer yandan, kil içeriği arttıkça, çimentonun hidrasyon süreci yavaşlar ve çimento dayanımının uzun dönemde gelişmesine katkı sağlar. Bu nedenle, doğru kalker ve kil içeriği seçimi, çimento karışımının performansını belirleyen kritik bir faktördür.

Klinkerdeki kalker ve kil içeriği aynı zamanda çimentonun fiziksel özelliklerini etkiler. Kalker içeriği arttıkça, çimento taneleri daha ince olabilir ve su gereksinimi artabilir. Kil içeriği arttıkça ise, çimentonun sertleşme süreci etkilenebilir ve çatlak oluşumuna yatkınlık artabilir. Bu nedenle, klinkerdeki kalker ve kil içeriğinin doğru ayarlanması, çimentonun uygulanacağı projelerin gereksinimlerine uygun olmasını sağlar. Klinkerdeki kalker ve kilin çimento kalitesine olan etkisi, yapı malzemelerinin geliştirilmesi ve inşaat endüstrisinin verimliliği açısından önemlidir. Doğru klinker bileşimi seçimi ve uygun kalker ve kil içeriği, çimento üreticilerinin daha yüksek performanslı, dayanıklı ve çevre dostu ürünler sunmasına olanak sağlar. Aynı zamanda, çevresel açıdan daha sürdürülebilir çimento üretimine katkıda bulunabilir. Bu kapsamda mevcut araştırmada; klinkerdeki kalker ve kilin çimento kalitesine etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda çalışmanın birinci bölümünde kalkerin tanımı ve genel yapısı, kalkerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kalkerlerde en çok rastlanan mineraller ve elementler, kalker üretim yöntemi ve teknolojisi, kalker rezervleri, Türkiye kalker yatakları, dünya kalker yatakları, kalker tüketim alanları, kalker katkılı çimentolar, kalker katkılı çimentoların fiziksel ve mekanik özelliklerinin kavramsal tanımı yapılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde, kil ve klinker kavramsal tanımları, kil minerallerinin tanımı ve genel yapısı, üretim yöntemi ve teknolojisi, kil mineralinin klinker üretimi açısından önemli özellikleri, Türkiye kil rezervleri, klinkerin kullanım alanları, klinker (yarı mamul), klinkerin tanımı ve genel yapısı, farin değirmeni çalışma prosesi, hammadde hazırlamada etkili parametreler, silikat modülü (S.M), alüminyum modülü (A.M), kireç doygunluk faktörü, magnezyum oksit (MgO), alkali ( $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$ ), kükürt ve klorürler, serbest silis, sıvı faz, ön ısıtıcı, döner fırın, soğutma ünitesinde yer alan konulara yer verilmiştir. Araştırmanın üç ve dördüncü bölümünde materyal ve metot kısmına yer verilirken, beşinci bölüm bulgular kısmından oluşmaktadır. Mevcut çalışmanın son bölümü olan beşinci bölümde ise gerçekleştirilen bu tez çalışmasına ilişkin tartışma sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

Klinker üretimine ana etkisi olan kalker, kil hammaddeleri gibi alternatif yakıtların da klinker üretimi ve dayanımına etkisi oldukça önem kazanmıştır. Bu bağlamda farinin fosil yakıtlar ile döner fırınlarda yüksek sıcaklıklarda pişirilerek elde edilen ara ürün olan klinkere, alternatif yakıtların da dahil edilmesi doğrudan etkilidir. Çimento fabrikalarının aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik hedefleri açısından bu ürünlerin tüketmesi oldukça önemlidir.

### 1.1. Kalkerin Tanımı ve Genel Yapısı

Devlet Planlama Teşkilatı (1996)'na göre; doğada kalsiyum karbonat olarak bilinen ve bileşiminde kimyasal olarak en az %90 oranında  $\text{CaCO}_3$  (kalsiyum karbonat) bulunan ve mineral yapısında %90 oranında kalsit bulunan kayalara kalker ya da kireç taşı denir (Öztürk, 2021). Saf formu doğada bulunan kalsite ise kalsit denir. Kalker yapısı genellikle ince bir yapıya sahiptir ve ağırlıklı olarak kalsit içerir. Ham haliyle kalkerlerin rengi beyazdır, ancak saf hali doğada bulunmadığı için yapılarında bulunan farklı materyallere bağlı olarak açık sarıdan kahverengiye kadar değişen renk tonlarına sahip olabilirler. Kalkerlerin setlik derecesi genellikle 3'tür ve özgül ağırlıkları yaklaşık olarak 2,5-2,7  $\text{g/cm}^3$  aralığındadır. Kalkerler incelendiğinde, aragonit ve kalsit kristallerinden oluşan bir yapıya sahip oldukları görülür. Ayrıca, dolomit ( $\text{CaMgCO}_3$ ) olarak da bilinen bir yapıya da rastlanabilir (Akan, 2019; Koçak, 2008). Kalker, doğada oldukça yaygın olarak bulunan ve bileşiminde %90 oranında kalsiyum karbonat içeren doğal bir hammadde olarak bilinir (Öztürk, 2021). Kökipek (2010)'e göre, kalkerlerin doğal formda kalsiyum karbonat içerdikleri yanı sıra alümina silika, magnezyum karbonat, kuvars, demir oksit ve demir sülfürler gibi diğer bileşenler de bulunabilir (Çizelge 1.1.). Kalsitin taneli kristal yapısı nedeniyle mermer oluşumu gerçekleşir. Kalker, jeomorfolojik yapısı dolayısıyla öğütülmesi en zor maddelerden biridir. Bununla birlikte, fırında pişirildiğinde, ana bileşeni olan CaO (kalsiyum oksit) oluşarak klinkerin yapısal bir bileşenini oluşturur (Öztürk, 2016).

Çizelge 1.1. Türkiye’de Kullanılan Kalkerlerin Adlandırılması (Kökipek, 2010)

| Toplam<br>% $\text{CaCO}_3$ | Adlandırma    | $\text{MgCO}_3$ 5-30    | Miktarı (%)30’dan fazla |
|-----------------------------|---------------|-------------------------|-------------------------|
| 90-100                      | Kalker        | Dolomitik kalker        | Dolomit                 |
| 85-90                       | Marnlı kalker | Dolomitik marn          | Marnlı dolomit          |
| 70-85                       | Kalkerli marn | Dolomitik kalkerli marn | Dolomitik marn          |
| 50-70                       | Marn          | Dolomitli marn          | Dolomitli marn          |
| 30-50                       | Killi marn    | Dolomitik killi marn    | Dolomitik killi marn    |
| 10-30                       | Marnlı kil    | Dolomitik marn          | Dolomitik marnlı kil    |
| 0-10                        | Kil           | Kil                     | Kil                     |

Kalker, kalsiyum karbonattan ( $\text{CaCO}_3$ ) meydana gelmektedir. Kalkerlerin, içyapısında bulunan maden oksitlerin etkisi ile farklı renklerde görünmektedirler. Kalker ’in geçirmiş olduğu oluşum esnasında çatlak ve kırıklar meydana gelmektedir. İlgili çatlak ve kırıklara başka maden oksitlerin dolmasıyla ilginç desenler görülmektedir. Kalkerler, sertlik derecesi 3 olup kolay kesilip işlenme özelliklerine sahiptirler. Saf kalkerin özgül ağırlığı  $2700\text{kg/m}^3$  tür.

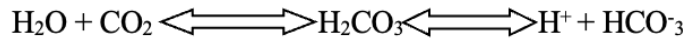
Özel (2011)’e göre çimento sektöründe en önemli kayaç grubunu oluşturan kalkerler tatlı su ve denizlerdeki organizmaların iskeletlerinden oluşmuşlardır. Organizmalar sudan  $\text{CaCO}_3$  (Kalsiyum karbonat) alarak kendi iç ve dış iskeletlerini oluştururlar ve organizmalar öldükten sonra da birbirlerine yapışarak  $\text{CaCO}_3$ ’ten oluşan kireçtaşlarını meydana getirirler. Yeraltı sularında

travertenler şeklinde, deniz ya da tatlı sularda ise kimyasal organik veya mekanik çökelme sonucu kalker yatakları oluşur. Oluşum süreçlerinden de anlaşılacağı üzere kalker üç ana grup altında toplanabilmektedir. Meydana gelen kireçtaşlarının çoğunluğu organik, kırıntılı ve kimyasal materyallerle dolu olmaktadır. Kireç taşlarının yoğunlukları ortalama olarak 2.7 gr/cm<sup>3</sup> olup, çoğunlukla yapılarında %3-5 seviyesinde oksit/sülfat gibi demir bileşikler, magnezyum benzeri mineraller, kum taneleri ve/veya killer barındırırlar. Bu bileşikler de çeşitli renk değişikliklerine ve yapısal farklılıklara sebep olmaktadır.

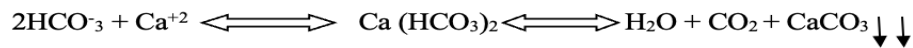
Kalker saf halde kalsit ve çok az miktarda aragonit kristallerinden oluşur. Kalsit ve aragonit kalsiyum karbonatın iki ayrı kristal şekli olup, teorik olarak %56 CaO ve %44 CO<sub>2</sub> içerir. Ancak doğada hiçbir zaman saf olarak bulunmaz. İkincil derecede değişik madde ve bileşiklerin içinde yer alması nedeniyle orijinal halde sarı, kahverengi ve siyah renklerde de görülebilmektedir. Kalkerin sertlik derecesi 3, özgül ağırlığı 2.5-2.7 gr/cm<sup>3</sup> arasındadır.

Kalker içerisinde yer alan kuvars mineralleri klinkerleşme sürecinde pişmeyi oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, kalker içeren hammadde ocaklarındaki SiO<sub>2</sub> oranı oldukça önemlidir.

Portland çimentosu klinkeri için gerekli olan kalsiyum oksit (CaO), kalsiyum karbonattan (CaCO<sub>3</sub>) elde edilmektedir. Çimento üretiminde kullanılan kireçtaşlarının rezervi doğada oldukça fazladır. Çimento endüstrisinde aktif olarak kullanılan kireçtaşları inorganik ya da organik olarak çökelmiş kireçtaşlarıdır. İnorganik çökelme olayı esasında kimyasal şekilde bir çökelme gerçekleşir. Havadaki karbon dioksitin suda çözünmesiyle ve bunun sonucu olarak sudaki karbon dioksit derişiminin (konsantrasyon) artmasıyla, okyanuslardaki, denizlerdeki ve göllerdeki su ve karbon dioksit tepkimeye girerek karbonik asidi (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) oluştururlar.



Tüm bu tür tepkimeler tersinir şekilde olup, karbonik asit, hidrojen ve bi karbonat iyonları biçiminde de bulunabilmektedir. Su da çözünmüş halde bulunan kalsiyum iyonları ile oluşan tepkimeler nihayetinde kalsiyum bikarbonatlar (Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) meydana gelirler. Kalsiyum bikarbonatlar ise koşullar oluştuğunda kolayca H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> ve CaCO<sub>3</sub> dönüşürler. Karbondioksit atmosfere karışır, ya da yine suda çözünebilir, kalsiyum karbonatlar ise çökelme durumunu gerçekleştirirler.



Kireçtaşlarından istenen özelliklerin başında, klinker fazlarını oluşturacak kirecin (CaO) kolayca çözünmesi gelir. Bu özellik, kireçtaşlarından karbon dioksitin (CO<sub>2</sub>) yüksek sıcaklıkta alınması sürecini etkileyen iki önemli faktördür. Bunlar, kireçtaşlarının mineralojik yapıları ve onların sağlığını bozan elementler ile kireçtaşlarının fiziksel yapılarıdır. Mineralojik yapılar,

kireçtaşları ile birleşmiş minerallerin varlığı ve mineral bileşimlerinin doğruluğunu ifade ederken, fiziksel yapılar ise kireçtaşlarının dokusu, yoğunluğu ve porozite gibi özelliklerini kapsar. Bu faktörlerin uygun olması, kireçtaşlarının CO<sub>2</sub> alım sürecinde etkin olmasını sağlamaktadır.

Kireçtaşlarının mineralojik yapılarıyla birlikte kaynaşmış mineraller ve bu mineralleri etkileyen elementler, kireçtaşlarının fiziksel yapılarına bağlı olarak ortaya çıkar. Gözeneklilik, kireçtaşlarında bulunan boşluklar, kanallar ve gözeneklerin toplam hacim olarak ifade edilen bir özelliktir ve mineralojik yapı ve dokulara bağlı olarak değişir. Gözeneklilik oranı, neredeyse hiç olmamasından başlayarak %30'lara kadar çıkabilir. Kireçtaşı ve marnların gözeneklilik oranları %40 ve %50'ye kadar olabilmektedir. Yoğun ve sıkı dokulu kireçtaşlarında gözeneklilik oranı genellikle %2-%5 arasında değişirken, mermer oluşumlarında bu oran bazen %0.1-%2 arasında kalabilir. Dolomit de ise gözeneklilik oranı genellikle daha düşüktür ve %1-%10 arasında değişir. Kireçtaşlarının su emme yeteneği de kuşkusuz gözeneklilik yapısına ve gözeneklilik düzeyine doğrudan bağlıdır. Çizelge 1.2'de kalkerlerin fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.2. Kalkerin Fiziksel Özellikleri

|                                          |                                                                                       |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tanım</b>                             | Kalsitik ve dolomitik kireçtaşları rhombohedral; aragonit ise ortorombik kristal yapı |
| <b>Renk</b>                              | Beyaz, gri ve tonları, kahverengi, yeşil, açık sarı, genleşince tümüyle beyaz         |
| <b>Molekül Ağırlığı</b>                  | 100.09                                                                                |
| <b>Porozite ve Su Emme</b>               | %0.1 %0.4                                                                             |
| <b>Özgül Ağırlık</b>                     | 2.86 g/cm <sup>3</sup>                                                                |
| <b>Görünür Yoğunluk</b>                  | 2-2.3 g/cm <sup>3</sup>                                                               |
| <b>Yığın Yoğunluğu</b>                   | 2-2.3 g/cm <sup>3</sup>                                                               |
| <b>Sertlik (Mohs)</b>                    | 2 ile 4 arasında değişmekte                                                           |
| <b>Dayanım (kg/cm<sup>2</sup>)</b>       | Basınç ve Kırılma (80-2000), Kesme (40-210), Çekme (24-62)                            |
| <b>Isı İletkenliği (130<sup>0</sup>)</b> | 0.0039                                                                                |
| <b>Özgül Isı</b>                         | 0.27 cal/g <sup>0</sup> C                                                             |
| <b>Erime Noktası</b>                     | 2800 <sup>0</sup> C                                                                   |

Klinker üretimi açısından, kireçtaşlarının en kritik kimyasal özelliği, yüksek sıcaklıklarda karbon dioksiti serbest bırakarak kireci (CaO) oluşturma yeteneğidir. Bu süreç, kalsinasyon olarak adlandırılır. Ayrıca, kimyasal stabilite de gözardı edilmemesi gereken önemli bir faktördür, yani kimyasal olarak dengede kalabilme yeteneğidir. Bunun dışındaki kimyasal özellikler genellikle klinker ve çimento üretimi açısından önemli değildir ve genellikle göz ardı edilir. Çizelge 1.3'de kalkerlerin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.3. Kalkerin Kimyasal Özellikleri

| Bileşim                        | Kireçtaşı I (%) | Kireçtaşı II (%) |
|--------------------------------|-----------------|------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 12.2            | 11.20            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.70            | 2.30             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.80            | 1.10             |
| CaO                            | 46.4            | 45.90            |
| MgO                            | 1.20            | 2                |
| Kızdırma Kaybı                 | 36.6            | 36.10            |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.16            | 0.42             |
| K <sub>2</sub> O               | 0.32            | 0.43             |
| SO <sub>3</sub>                | 0.30            | 0.10             |
| Cl                             | 0.01            | 0.001            |
| Toplam Karbonat                | 83.4            | 83.20            |
| Serbest SiO <sub>2</sub>       | 2.90            | 2.20             |

Kalsitin kristal yapısı hegzagonal/rhombohedral, aragonitin kristal yapısı ortorombik/prizmatik, tebeşirin kristal yapısının biçimsiz (amorf), dolomitin kristal yapısı hegzagonal/rhombohedral ve ankeritin kristal yapısı ise rombohedraldir. Bu bağlamda kireçtaşlarının klinker üretim sürecinde fırına beslenen hammadde karışımları içerisinde faz oluşturuca bir birleşik olarak elverişli olabilmesi, diğer bir anlatımla içindeki kalsiyum oksitin (CaO) ortaya çıkabilmesi, kuşkusuz kireçtaşlarının kristal yapılarına, kristallerin dağılabilme özelliklerine, içlerinde barındırdıkları yabancı maddelere birebir bağımlıdır. Çizelge 1.4'te kalkerin kristal boyutları (µm) ve Çizelge 1.5'te kalkerin 800°C'deki zamana bağlı ağırlık kaybı yüzdesi verilmektedir.

Çizelge 1.4. Kalkerin Kristal Boyutları (µm)

|           | Kireçtaşı I (µm) | Kireçtaşı II (µm) |
|-----------|------------------|-------------------|
| En Düşük  | 8                | 750               |
| En Yüksek | 20               | 2100              |
| Ortalama  | 12               | 1000              |

Çizelge 1.5. Kalkerin 800 °C'deki Zamana Bağlı Ağırlık Kaybı Yüzdesi

| Süre   | Kireçtaşı I (%) | Kireçtaşı II (%) |
|--------|-----------------|------------------|
| 30 dk  | 10.43           | 9.61             |
| 60 dk  | 28.05           | 17.9             |
| 90 dk  | 36.42           | 33.22            |
| 120 dk | 36.49           | 33.68            |

Fırın içerisinde yüksek sıcaklığa maruz kalan kalker (CaCO<sub>3</sub>), bünyesindeki CO<sub>2</sub>'yi kaybederek ağırlıkça daha hafif olan CaO'e dönüşmektedir.

Minerallerin yüksek sıcaklıkta parçalanması ve kalsiyum oksitin ortaya çıkması en kolay ankerit ve dolomit oluşumlarının pişme sürecinde gerçekleşmektedir. Kısacası kalsinasyon süreci kolaydan zora doğru şu şekilde bir sıra izlemektedir;



Yapılan deneyler neticesinde; kalsiyum karbonatın kristal boyutu veya tane boyutu ne denli küçük olursa ve kireçtaşının bünyesinde barındırdığı yabancı bileşikler ve mineraller ne denli yüksek ölçekte ise, çözülme için gerekli etkin enerji, çözülmeyi ilk başlatacak enerji o denli düşük olacaktır. Söz konusu enerji 30-60 kcal/mol gibi çok geniş bir değerler aralığında değişebilmektedir. Yüksek dereceli kalsitik ve dolomitik oluşumlar kimyasal olarak oldukça dengeli oluşumlardır.

İçermiş oldukları maddelerine göre meydana gelen kalkerlerin nitelikleri esas alınıp birçok sınıflandırmalar gerçekleştirilerek bazı isimlendirmelerle ayrılmıştır. Kalkerlerin en çok içerdikleri ve teknolojik özelliklerini Çimento Sanayiinde yansıtan kil, kalsiyum ve magnezyum karbonat % düzeylerine göre gerçekleşen ayırım ve sınıflama olarak pek çok ülkede ve ülkemizde de kullanılan bir isimlendirme olarak aşağıda verilmiştir (Çizelge 1.6).

Çizelge 1.6. Türkiye’de Kullanılan Kalkerlerin Adlandırılması

| Toplam %<br>CaCO <sub>3</sub> | Adlandırma    | MgCO <sub>3</sub> %5-30 | Miktarı (%)30’dan fazla |
|-------------------------------|---------------|-------------------------|-------------------------|
| 90-100                        | Kalker        | Dolomitik kalker        | Dolomit                 |
| 85-90                         | Marnlı kalker | Dolomitik marn          | Marnlı dolomit          |
| 70-85                         | Kalkerli marn | Dolomitik kalkerli marn | Dolomitik marn          |
| 50-70                         | Marn          | Dolomitli marn          | Dolomitli marn          |
| 30-50                         | Killi marn    | Dolomitik killi marn    | Dolomitik killi marn    |
| 10-30                         | Marnlı kil    | Dolomitik marn          | Dolomitik marnlı kil    |
| 0-10                          | Kil           | Kil                     | Kil                     |

## 1.2. Kil Minerallerinin Tanımı ve Genel Yapısı

Kil, çimento üretiminde önemli bir rol oynayan doğal bir hammaddedir (Akçıl ve Tuncuk, 2006). Çimento üretimi sürecinde kil, çimento karışımının ana bileşenlerinden biridir ve çimento üretiminde farklı fonksiyonlara sahiptir. Kil, çimentonun hidrasyon sürecini etkileyen önemli bir mineraldir (Öztürk, 2021). Kil, çimento karışımına su eklendiğinde reaksiyona girerek hidrasyon sürecine katkıda bulunur. Bu, çimentonun sertleşme ve priz alma özelliklerini belirleyen bir aşamadır. Kilin hidrasyon sürecindeki etkisi, çimento üretiminde istenen fiziksel ve mekanik özelliklerin elde edilmesinde önemli bir faktördür. Kil ayrıca çimento karışımının plastisitesini artıran bir etkiye sahiptir. Plastisite, çimentonun şekillendirilebilme özelliğini ifade eder. Kil, çimento karışımına eklenerek çimentonun daha kolay şekillendirilebilmesini sağlar. Bu, çimento



retiminde malzemenin istenilen form ve yapıya dönüşmesini kolaylaştırır. Ayrıca, kil imento karışımının kalıcı dayanıklılığını artırır. Kilin içeriğinde bulunan mineraller, çimentonun uzun vadeli dayanıklılığını ve mukavemetini etkileyen faktörlerdir (ztrk, 2021). Kil, imento karışımına eklenerek çimentonun neme ve diğer dış etkilere karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlar.

Çimento retiminde kilin kullanımı, imento kalitesi ve performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kilin doğru oranlarda kullanılması, istenilen imento özelliklerinin elde edilmesini sağlar. Bu nedenle, imento üretiminde kilin uygun şekilde seçilmesi ve kullanılması büyük önem taşır. Sonuç olarak, kil imento üretiminde önemli bir hammaddedir. Hidratasyon sürecine katkıda bulunur, plastisiteyi artırır ve çimentonun kalıcı dayanıklılığını iyileştirir. Kilin doğru şekilde kullanılması, imento kalitesini ve performansını artırırken, istenilen fiziksel ve mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlar.

Öztürk (2021)'e göre; Kil, imento üretim sürecinde temel bir bileşen olarak kullanılan doğal bir hammaddedir ve imento kalitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Hidratasyon sürecinde aktif olarak yer alarak çimentonun sertleşme ve priz alma özelliklerini etkilerken, plastisiteyi artırarak imento karışımının şekillendirilebilme özelliğini iyileştirir. Aynı zamanda, kil içeriğindeki mineraller çimentonun dayanıklılığını ve performansını artırır, neme ve dış etkilere karşı koruma sağlar. Çimento retim sisteminde ikinci en önemli hammadde olan kil, %90 oranında kil minerallerini içeren bir kayadır ve birçok endüstriyel alanda kullanılır. Kilin temel bileşenleri sulu alüminyum silikatlardır ve yapısında kaolinit, illit gibi kil mineralleri, demir oksit, demir sülfür, kum, kalsit ve az miktarda organik madde bulunur. Kil saf haliyle beyazdır, ancak içerdiği demir miktarına bağlı olarak renk değişiklikleri gösterebilir. Kilin imento üretiminde kullanılacak olanları, belirli analizlerden geçirilerek uygunlukları değerlendirilir. Bu analizlerde  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  ve kızıdırma kaybı yüzdeleri belirlenir ve mineralojik analizlerle kil dışı yabancı materyallerin yüzdelik oranları tespit edilir.

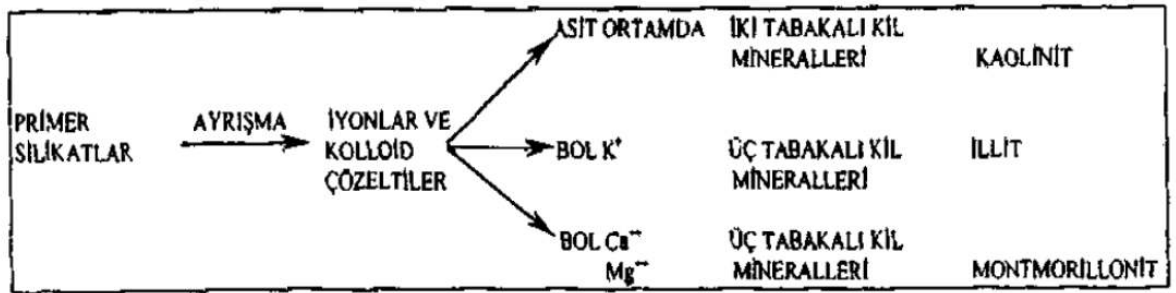
Kil mineralleri, doğada bulunan ve genellikle kayaların bileşiminde yer alan önemli minerallerdir. Kimyasal olarak sulu alüminyum silikatlardan oluşurlar. Kil mineralleri, su moleküllerinin yapılarında yer almasıyla karakterize edilen kristal yapılarına sahiptir. Bu yapı, su moleküllerinin mineral içinde yer aldığı tabakalar şeklinde düzenlenmiştir. Kil mineralleri, genellikle üç ana gruba ayrılır: kaolinit, illit ve montmorillonit. Her bir grup, farklı kristal yapıları ve kimyasal bileşimleriyle kendine özgü özelliklere sahiptir. Kaolinit, kil minerallerinin en yaygın olanıdır. Bu mineral, alüminyum oksit ve silis birleşmesiyle oluşur. Kristal yapıları düzgündür ve ince tabakalar halinde düzenlenir. Kaolinit, beyaz renkte olup, genellikle seramik sanayiinde kullanılır. Illit, kaolinit ile benzer bir kristal yapıya sahip olmakla birlikte, daha fazla potasyum içerir. Illit mineralleri genellikle yeşilimsi renkte olup, mikroskopik plakalar halinde düzenlenir. Killi toprakların oluşumunda ve kil şiştlerinde yaygın olarak bulunurlar.

Montmorillonit, kil minerallerinin en sülfatlı olanıdır. Bu mineral, magnezyum ve demir gibi çeşitli iyonları yapısında barındırabilir. Montmorillonit mineralleri, çok ince tabakalı yapılara

sahiptir ve su molekülleri ile kolaylıkla etkileşime girebilir. Genellikle bentonit olarak bilinen kil minerali, montmorillonit içeren bir türdür ve su emme kapasitesiyle bilinir. Kil mineralleri, dayanıklılık, plastisite, su emme ve iyon değişimi gibi özellikleriyle çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılır. Seramik üretimi, çimento üretimi, petrokimya, kâğıt yapımı ve zemin stabilizasyonu gibi alanlarda önemli bir rol oynarlar. Aynı zamanda toprak oluşumu ve jeolojik süreçlerde de etkili bir rol oynarlar.

Kil mineralleri, doğada bulunan ve çeşitli endüstrilerde kullanılan önemli minerallerdir. Kristal yapılarındaki su molekülleriyle karakterize edilen tabakalı yapıları, farklı özelliklere sahip olmalarını sağlar. Bu mineral grupları, farklı bileşimleriyle ve yapılarıyla çeşitli uygulamalarda değerlendirilir. Killer, doğada bol miktarda bulunan ince taneli, su tutma ve iyon değiştirme güçleri yüksek alümina-silika-hidratlar olarak tanımlanabilir.

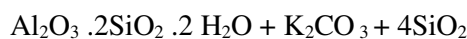
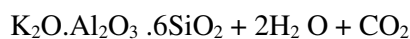
Genel olarak, kil mineralleri  $x\text{SiO}_2.y\text{Al}_2\text{O}_3.z\text{H}_2\text{O}$  şeklinde formülize edilir. Bunun yanı sıra, kilin sınıfına bağlı olarak  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  gibi bileşenleri içerebilirler. Kil minerallerinin oluşum sürecinde, ayrışma ve ortam şartları önemli bir rol oynar. Kil mineralleri, primer silikatların ayrışması sonucunda ortaya çıkar ve oluşum süreci ortamın şartları ve içerdiği iyon çeşitlerine bağlıdır. Şekil 1.5'te gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Primer silikatların ayrışması sonucu kil minerallerinin oluşumu (Demiral, 2013)

Behçet (2022)'e göre; Çimentoların esas yapısını kil oluşturmaktadır. Bir kil ne ölçüde az bir su ile şekillendirilir ve su katkı miktarı ile akışma özelliği çabuk değişme göstermezse o kil o derece iyi plastik özelliğe sahip kil olarak isimlendirilmektedir. Kil mineralleri esasen, tabaka yapılı ve bünyesinde suyun var olduğu aluminasilikatlardır. Plastik özellikleri tabakalarının plaka (pseudo hexagonal plakacıklar) biçiminde olması ve bu tabakalarının birbiri devamında da su varlığı ile kayma özelliğine dayanmaktadır (Sazcı, 2001).

Granit ve diğer feldspat içerikli kayaçların bozulmasıyla kaolen yatakları meydana gelmektedir. Karbondioksit ve suyun etkisiyle, feldspat içeren kayaçlar, çözünür alkali karbonat ve çözünür  $\text{SiO}_2$  bozulmasıyla kil minerallerine dönüşür.



Mevcut olan bu bozuşum, taşıyıcı akan sudan korunarak yerinde (primer) meydana gelirse, kil minerali ve parçalanmamış kayaç kalıntıları (Feldspat, Kuars vb) kaolen mineralini meydana getirmektedir. Kayaçların bozulmasıyla meydana gelen kil mineralleri doğal şekillerle yüzeysel sular tarafından başka yerlere transfer edilirse çökeltme ile sekonder yataklar oluşmaktadır ve bu yataklarda en genel tanımıyla Kil olarak tanımlanmaktadırlar. Killeri çoğunlukla 1/256 mm altındaki ince tanecikler karakterize eder (Sazcı, 2001).

Killerden daha temiz olan ham kaolenler, doğal olarak oluşur ve genellikle bulundukları yerde oluşma eğilimindedirler. Bu nedenle, taşınma işlemlerine tabi tutulmadan elde edilebilirler. Öte yandan, killer daha kirli olma eğilimindedir ve taşınma sürecinde çevredeki maddelerle kirlenme ihtimali vardır. Killer, çok ince tanecikli yapılarından dolayı bozunma sürecinde iri taneli kalan feldspat minerallerini genellikle içermezler. Bu durum, killerin içerdikleri mineraller ve yapılarından kaynaklanır. Buna karşılık, ham kaolenler genellikle daha saf ve temiz bir yapıya sahiptirler. Bu nedenle, endüstriyel uygulamalarda ham kaolenlerin tercih edilmesinin bir nedeni, daha saf ve homojen bir bileşime sahip olmalarıdır. Sonuç olarak, ham kaolenler killerden daha temiz olabilir çünkü doğal olarak oluşma eğilimindedirler ve taşınma sürecine tabi tutulmadan elde edilebilirler. Bu nedenle, ham kaolenler genellikle daha saf ve homojen bir yapıya sahipken, killer daha fazla kirli olabilir ve içerdikleri mineraller ve yapılarından kaynaklanan karmaşık bir bileşime sahip olabilirler.

Killer,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  taşıyıcısı ve bazen işin kolayına kaçarak bunlara ek olarak  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  taşıyıcısı olarak da bilinmektedir.

Killer genellikle sulu alüminyum silikat mineralleridir ve genellikle partikül boyutları 1/256 mm veya 4 mikron olarak sınıflandırılır. Ancak, son yıllarda yapılan araştırmalar, kil boyutunun daha da küçüldüğünü öne sürmektedir ve bazı killerin 2 mikrona kadar inebildiği belirtilmektedir. Bu durum, daha hassas partikül boyutu analiz yöntemlerinin kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır.

Kil mineralleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir ve genellikle aşağıdaki kategorilere ayrılırlar:

#### ***Fiziksel Sınıflandırma;***

Partikül Boyutu: Killer, partikül boyutuna göre farklı gruplara ayrılabilir. En yaygın olarak kullanılan sınıflandırma, kil partiküllerinin çapına göre yapılan ayırmadır: kil partikülleri 2 mikrometreden daha küçükse, kil olarak sınıflandırılır.

Şekil ve Morfoloji: Kil mineralleri, farklı şekil ve morfolojilere sahip olabilir. Örnek olarak, kaolinit yaprak benzeri plakalar halinde düzenlenirken, montmorillonit ince tabakalar halinde katmanlı bir yapıya sahip olabilir.

### ***Kimyasal Sınıflandırma;***

Kimyasal Bileşim: Killer, kimyasal bileşimlerine göre de sınıflandırılabilir. Örneğin, kaolinit, illit, montmorillonit gibi farklı mineraller, farklı kimyasal bileşimlere sahiptir. Bu minerallerin farklı oranlarda bulunması, kilin özelliklerini ve davranışını etkiler.

### ***Mineralojik Sınıflandırma;***

Minerallerin Oluşum Yerine Göre Sınıflandırma: Killer, oluşum yerlerine göre sınıflandırılabilir. Örneğin, hidrotermal faaliyetler sonucu oluşan kil mineralleri, volkanik aktivite veya hidrotermal kaynakların etkisiyle oluşurken, sedimantasyon yoluyla çökelmiş kil mineralleri, suyun etkisiyle tortulaşma sürecinde oluşur.

Bu sınıflandırmalar, kil minerallerinin farklı özelliklerini ve oluşum şekillerini tanımlamak için kullanılır. Kil mineralleri kompleks bir mineral dizisi olduğu için, bu sınıflandırmalar, minerallerin genel özelliklerini anlamak ve araştırmaları kolaylaştırmak için kullanılan araçlardır.

Doğa içerisinde kil minerallerine tam manasıyla teorik yapılarında rastlamak zordur, keza;

İzomorf yer değişimi: Kil mineral yapısında belli iyonlar, birbirinin yerine geçebilir. Bu, elektrik yüklerinin dengelenmesi için ek bir iyonun kullanılmasını gerektirebilir. Örneğin, tetraeder tabakasında  $Si^{4+}$  iyonu,  $Al^{3+}$  ve  $K^+$  iyonlarıyla yer değiştirebilir. Oktaeder tabakasında ise  $Al^{3+}$  iyonu,  $Mg^{2+}$  ve  $K^+$  iyonlarıyla yer değiştirebilir.

Tabaka sıralanması: Kil mineralleri, tabaka sıralanmasında iki tabakalı veya üç tabakalı yapılar oluşturabilir. Bu yapılar düzenli veya düzensiz olarak değişebilir. Bu durumda, karışım tabakalı minerallerden (Mixed Layer) bahsedilir. Ukrayna killeri gibi bazı kil mineralleri karışım tabakalı yapıya sahip olabilir (Sazcı, 2001).

Karışım tabakalı yapılarda (Mixed Layer): Sazcı (2001)'ya göre; İllit, Montmorillonit ve Klorit gibi farklı yapı elemanları farklı varyasyonlarda bulunabilir ve birbirleriyle yer değiştirebilirler. Bu yapılar düzenli veya düzensiz tabakalar halinde bulunabilir. Karışım tabakalı kil mineralleri seramik yapılarında kararlılığı ve dayanıklılığı artırmaya yardımcı olabilir.

Bu özellikler, kil minerallerinin doğada çeşitli yapısal varyasyonlara sahip olduğunu ve hammaddelerin uygun kompozisyonunun sağlanması için bu değişkenliklerin göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir.

### **1.3. Pirit Külünün Tanımı ve Genel Yapısı**

Pirit külü, pirit adı verilen bir mineralin yanması veya oksitlenmesi sonucu oluşan bir yan üründür. Pirit ( $FeS_2$ ) genellikle kükürt içeriği yüksek olan cevherlerde bulunur. Pirit, oksijenin varlığında yanar ve sülfür dioksit ( $SO_2$ ) gazı üretir. Bu yanma işlemi sırasında piritin artıkları pirit külü olarak adlandırılır. Pirit külü, genellikle enerji üretimi, madencilik, metalurji ve kimya endüstrilerinde ortaya çıkar. Özellikle kömür yakma santrallerinde pirit içeren kömürlerin yanması sonucu oluşan pirit külü yaygın olarak görülür. Pirit külü, genellikle kükürt dioksit ( $SO_2$ )

emisyollarını azaltmak için kullanılan atık gaz arıtma sistemlerinden biridir. Bu malzeme ayrıca çeşitli inşaat malzemelerinde, imento üretiminde ve karayol yapımında kullanılabilir. Genellikle ince toz halinde bulunur ve potansiyel olarak çevresel etkilere sahip olabilir. Pirit külü içerisindeki sülfür bileşikleri, su ile temas ettiğinde sülfürik asit oluşturabilir ve asidik karaktere sahip sularda çevresel sorunlara neden olabilir. Bu nedenle, pirit külünün uygun şekilde yönetilmesi ve bertaraf edilmesi önemlidir.

#### 1.4. Yakıtlar

Klinker retimi için kullanılan yakıtlar fosil (petrokok, linyit vb.) ve alternatif yakıt (Endüstriyel plastikler, arıtma çamurları, atık yağlar, ömrünü tamamlamış lastikler vb.) grubu olarak ikiye ayrılmaktadır. Yakıt kullanımı alev borusu vasıtası ile olmaktadır(şekil 1.6).



şekil 1.6. Klinker retiminde yakıt kullanımı (Alev borusu)

Söğüt (2009)'e göre; imento sanayiinde Türkiye ve Avrupa'da fosil yakıtlar arasında linyit kömürü, ithal kömür ve petrokok gibi yakıtlar tercih edilmektedir. Ayrıca, yağ, lastik, boya gibi endüstriyel atıklar da alternatif yakıt olarak kullanılmaktadır.

Katı yakıtlar organik ve mineral bileşenlerden oluşur. Organik bileşenler arasında karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O) ve azot (N) bulunurken, mineral bileşenler arasında kükürt (S) ve kl yer alır. Kömür külü, genellikle %15 ila %21 oranında  $Al_2O_3$ , %25 ile %40 oranında  $SiO_2$ , %20 ile %45 oranında  $Fe_2O_3$ , %1 ile %5 oranında  $CaO$ , %0.5 ila %1 oranında  $MgO$  ve %2 ila %8 oranında  $SO_3$  gibi bileşenleri içerir (Onat, 1997). Yanabilen maddeler arasında karbon, hidrojen ve kükürt bulunur ve bu maddeler havadaki oksijenle birleşerek ısı oluşturur. Bir yakıtın değerlendirilmesinde, yanıcı özellikleri belirleyici olan karbon ve hidrojen miktarı dikkate alınmaktadır. Ancak kükürtün yanma sürecinde  $SO_2$  olarak ortaya çıkması ve su ile birleşerek  $H_2SO_4$  oluşturması nedeniyle

istenmeyen bir madde olduğu söylenebilir. Kükürt, yakıtın metalik kısımlarında korozyona neden olabilir ve atmosfere baca gazı olarak salınarak çevreye zararlı etkileri olabilir. Ayrıca, kömür külündeki kükürt klinkerle karışarak klinkerin kalitesini düşürebilir. Ancak bazı durumlarda yakıtta belirli miktarda kükürdün bulunması istenebilir çünkü kükürt, potansiyel alkali oksitlerin sülfata dönüştürülmesine yardımcı olabilir. Oluşan alkali sülfat, bozulmaz ve fırın sisteminde alkali devri daimini azaltarak fırından klinkerle birlikte atılmasını sağlar. Yakıtın istenmeyen bileşenleri kül ve nemdir. Yakma işlemi sırasında külün büyük bir kısmı klinker içinde hapsolur, bu nedenle kömür külünün kimyasal bileşimi, klinkerin kimyasal bileşiminin hesaplanmasında önemlidir (Onat, 1997).

Kömürün kurutulması sırasında tamamen kuru olmasına dikkat edilmelidir, çünkü tamamen kuru kömürün yanması zor olabilir. Karbon, doğrudan hava oksijeniyle reaksiyona giremez, ancak karbonun OH radikaliyle etkileşime girmesiyle zincirleme reaksiyonları başlar. Yakıtın yanabilmesi için az miktarda su buharının bulunması gereklidir. Kömür sınıflandırmasında önemli olan faktör, uçucu madde miktarıdır. Kömürün havasız ortamda karbona dönüşmesi sırasında kaybettiği ağırlık, uçucu madde miktarını gösterir. Kömürün uçucu madde miktarının optimum değeri, kömür tozu yakmaları için genellikle %18 ile %22 arasında değişir. Bu sayede, öğütme yoluyla döner fırında kömürün düşük gaz miktarıyla verimli bir şekilde değerlendirilmesi mümkün hale gelmiştir. Yakıtın en önemli özelliği özgül ısı değeridir, bu değer 1 kg yakıtın (gaz yakıtlarında 1 Nm<sup>3</sup>) yanmasıyla oluşan ısı miktarıdır. Isı değeri sadece kalorimetrik yöntemlerle belirlenebilirken, element analiziyle hesaplanması sadece bir rehberlik sağlar.

#### **1.4.1. Çimento Sektöründe Fosil Yakıt Tanımı**

Öztürk (2021)'e göre; çimento sektörü, klinker üretimi süreciyle birlikte karbondioksit gibi emisyonlara sebep olan bir sektördür. Bu sektör ayrıca, azotoksit, kükürtoksit, toz, toplam organik karbon, hidrojen florür, hidrojen klorür, ağır metaller, poliaromatik hidrokarbonlar, poliklorlu dibenzodioksinler ve dibenzofuranların atmosfere salınımına da katkıda bulunmaktadır. Yoğun enerji tüketimiyle bilinen çimento sektörü, çevresel etkileri nedeniyle çevre dostu olmayan bir imaj taşımaktadır (Çankaya, 2018).

Çimento sektöründe, sürdürülebilirlik, enerji yoğunluğu, hava kirliliği, tükenen doğal kaynakların kullanımı ve fosil yakıt kullanımı gibi konular, çevresel etkileri azaltmak için etkin bir şekilde izlenmekte ve uygulanmaktadır (Çankaya, 2018). İklim değişikliği ve küresel ısınma gibi konular, çimento sektörünün çevresel etkilerinin önemini daha da artırmaktadır. Çimento fabrikaları, üretim faaliyetlerinde hava kirliliği ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için mevzuatlara uyum sağlama zorunluluğundadır. Bu amaçla, klinker/çimento oranının azaltılması, katkılı çimento üretiminin artırılması, teknolojik iyileştirmeler, filtre sistemlerinin geliştirilmesi ve atıkların alternatif yakıt olarak kullanılması gibi değişiklikler yapılmaktadır (Sagastume ve ark., 2017).

Çimento sektörü, enerji maliyetlerinin büyük bir bölümünü oluşturan yaklaşık %30-40 oranında enerji maliyetine sahiptir. Bu maliyetler, petrokok, kömür (linyit, taşkömürü, vb.), doğalgaz

ve fuel oil gibi birincil yakıtlardan kaynaklanmaktadır (Singhi ve Bhargava, 2010). Kömür, çimento üretiminde en yaygın kullanılan yakıttır ve bir ton çimento üretimi için yaklaşık 120 kg kömür tüketilmektedir. 2018 yılında dünya çimento üretimi, yaklaşık 4,2 milyar ton olup, Çin'de 2,4 milyar ton üretim gerçekleşmiştir. Bu da yıllık yaklaşık yarım milyar ton kömür eşdeğeri fosil yakıt tüketimi anlamına gelmektedir. Çimento sektöründe fosil yakıtların payı yaklaşık %90'dır. Bu nedenle, çimento sektörü, enerji maliyetlerini yönetmek ve karbondioksit gibi salımları azaltmak için atıkları alternatif yakıt olarak kullanmayı hedeflemektedir (Moses, 2010).

#### **1.4.2. Alternatif Yakıt Tanımı**

Arıtma Çamuru, endüstriyel plastik atık/ATY (Atıktan Türetilmiş Yakıt /Endüstriyel Katı Atık), atık yağ, ömrünü tamamlamış lastik (ÖTL), kontamine atık bu çalışmada alternatif yakıt kapsamında ele alınmıştır. Çimento fabrikalarında, atıkların alternatif yakıt olarak kullanılması işlemine birlikte işleme adı verilir. Bu fabrikaların temel amacı çimento üretmek olsa da proses özelliklerine bağlı olarak farklı özelliklere sahip atıkları konvansiyonel yakıtların yerine fırında enerji elde etmek amacıyla kullanabilirler (Öztürk, 2016). Döner fırınlar, atık kullanımında sayısız avantaja sahip olan yüksek sıcaklıklar, alkali ortam, ideal gaz karışımı oranları ve geniş yüzey alanı ile ısı transferini sağlar (Huang ve ark., 2017). Çimentoda sıklıkla kullanılan birçok alternatif yakıt, yüksek sıcaklıklar (1.450°C), tam yanma ve uzun bekleme süreleri (8 sn) sayesinde organik içeriklerini tamamen bozunurken inorganik bileşikler farinle reaksiyona girer ve klinkerin yapısına bağlanır. Atıkların önlenememesi, azaltılamaması, tekrar kullanılamaması veya geri dönüştürülememesi durumunda, çimento üretim prosesi düzenli depolama veya atık yakma proseslerine göre enerji ve malzeme geri kazanımı sağlayarak sürdürülebilir bir çözüm sunar. Bu nedenle, çimento fabrikalarında birlikte işleme prosesi, atık hiyerarşisinde geri dönüşüm ile atıktan enerji kazanımı arasında bir konuma sahiptir.

#### ***Atık Lastik***

Atık lastikler, çevresel bir sorun oluşturan atık malzemeler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, atık lastiklerin çimento üretimi gibi alternatif kullanım yollarının araştırılması ve uygulanması önemli bir çevresel çözüm olabilir. Çimento üretim sürecinde atık lastiklerin kullanılması hem atık lastiklerin bertarafını sağlarken hem de çimento üretiminde enerji ve hammadde tasarrufu sağlamaktadır. Atık lastiklerin çimento üretiminde kullanılabilmesi için öncelikle uygun şekilde işlenmeleri gerekmektedir. Genellikle atık lastikler, uygun boyutlara öğütülerek çimento üretiminde kullanılabilir hale getirilir. Bu işlem genellikle öğütme veya granülasyon gibi yöntemlerle gerçekleştirilir. Öğütülen atık lastikler, çimento üretimi sırasında yanma işlemiyle birlikte kullanılmaktadır (Şekil 3.11).

Döner fırınlarda atık lastik kullanımı, alternatif yakıt olarak yaygın bir uygulamadır. Atık lastikler, enerji içeriği yüksek olmaları ve çimento üretim sürecinde yüksek sıcaklıklarda tamamen

yanabilmeleri nedeniyle tercih edilen bir yakıt kaynağıdır. Bu uygulama, çimento fabrikalarında enerji verimliliğini artırırken, atık lastiklerin çevreye olan etkisini azaltmaya yardımcı olur.

Atık lastiklerin döner fırınlarda kullanımı çeşitli avantajlar sağlar. İlk olarak, bunların yakılmasıyla elde edilen enerji, çimento üretimi sürecindeki termal enerji ihtiyacını karşılamada kullanılmaktadır. Bu da geleneksel yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak ve enerji maliyetlerini düşürmektedir. Aynı zamanda, atık lastiklerin kullanılması çimento fabrikalarının sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunur, çünkü bu uygulama geri dönüşüm ve atık yönetimi açısından önemli bir çözümdür. Atık lastiklerin döner fırınlarda kullanımıyla ilgili bazı dikkate alınması gereken hususlar bulunmaktadır. Öncelikle, atık lastiklerin yanma işlemi sırasında oluşan emisyonlar ve yanma kalıntıları dikkatlice kontrol edilmelidir. Uygun filtreleme sistemleri ve teknolojiler kullanılarak çevresel etkilerin minimize edilmesi sağlanır. Ayrıca, atık lastiklerin kabul edilebilir kalite ve özelliklere sahip olması önemlidir. Yanma sırasında oluşabilecek toksik maddelerin kontrol edilmesi ve emisyon standartlarına uygunluk sağlanması gerekmektedir.

Atık lastiklerin döner fırınlarda kullanımı, enerji geri kazanımı ve atık yönetimi açısından önemli bir stratejidir. Ancak bu uygulama, çimento fabrikalarının uygun teknik önlemler ve çevresel standartlara uyum sağlamasıyla birlikte gerçekleştirilmelidir.

Vulkanizasyon işlemi nedeniyle lastiklerde çinko oksitler ve kükürt bulunabilir. Karbon siyahı da en yaygın kullanılan dolgu malzemesidir.

Döner fırınlarda kullanılan lastikler, kömür veya diğer yakıtların yerine ikame edilen bir alternatif olarak sıklıkla kullanılır. Ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) bileşimi genellikle istikrarlıdır ve çoğunlukla değişmez. ÖTL'nin yaklaşık %88'i karbon ve oksijen içerir. Bu özellikler, yüksek kalorifik değerlere ve hızlı yanmaya sahip olmalarını sağlar. Her ton ÖTL kullanımıyla yaklaşık 1,25 ton kömür tasarruf edilebilir. Ancak, ÖTL kullanımı %30'a kadar çıktığında klinkerde çinko bileşiklerinin varlığına rastlanabilir. Çimento üretiminde çinko miktarının 4.000 ppb'yi aşması, çimentonun donma süresini uzatabilir, bu da istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, yüksek oranlarda ÖTL kullanımında dikkatli olunması önerilir (Pipilikaki ve ark., 2005).

ÖTL, tehlikesiz atıklar kategorisine girer ve yaklaşık 7500 kcal/kg kalorifik değeri ve uygun kimyasal bileşimi ile çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak kullanılmaya uygundur. ÖTL'nin ağırlıkça yaklaşık %70-72'si uçucu madde ve %7 ila %10'u kül içeriğine sahiptir. Ayrıca, ÖTL'nin kükürt ve azot içeriği, geleneksel yakıtlara kıyasla daha düşüktür (Giugliano ve ark., 1999).

Çimento üretiminde genellikle demir cevheri kullanılır. Lastikler, içerdikleri teller nedeniyle demir cevheri kullanımını azaltmaya yardımcı olur. Ancak, ÖTL yaklaşık %1,4 oranında çinko içerir. Bu nedenle, çimentonun hidratasyon ve donma sürecini olumsuz etkileyebilir. Bununla birlikte, ÖTL'nin kükürt içeriği geleneksel yakıtlara göre daha düşüktür. ÖTL içindeki kükürt oranı yaklaşık %1,24 ila %1,30 arasında değişirken, çimento üretiminde kullanılan kömürün kükürt içeriği yaklaşık %1,5'tir. Çimento üretiminde yüksek miktarda bulunan kalsiyum karbonat, etkili bir kükürt giderici



olarak işlev görür ve bu, kükürt emisyonlarının kontrol altına alınmasına yardımcı olur. ÖTL içindeki tüm ağır metaller ve yanma sonucu oluşan kül, klinker yapısına bağlanır (Pipilikaki ve ark., 2005).

Çimento fırınlarında kullanılan ÖTL'ler genellikle bütün veya parçalanmış olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Bütün lastikler, bir klape yardımıyla fırına beslenebilir. Parçalanmış lastikler ise alev borusundan veya kalsinatörden beslenebilir (Landreth ve Rebers, 2020). ÖTL'nin tam yanmasının sağlanması için uzun bir bekleme süresi gereklidir. Bazı çimento fabrikalarında ÖTL'ler bütün olarak fırına beslenirken, diğerlerinde büyük veya küçük parçalara ayrılıp kalsinatöre beslenir. Kalsinatördeki kısa bekleme süresi nedeniyle ince parçalanmış ÖTL'ler tam olarak yanmayabilir ve tersiyer gaz kanalına veya fırın girişine düşebilir. Fırın girişinde, ince parçalı lastiklerin yanması için yeterli oksijen bulunmayabilir. Bu durumda, ömrünü tamamlamış lastik parçaları karbon partikülleri halinde çimentoya karışır. Sonuç olarak, yeterli enerjiden yararlanılamaz ve çimento karakteristik rengini kaybeder.

İnce parçalanmış lastikler, kalsinatörde 1.050-1.150°C sıcaklıkta 22 m/s gaz hızında 30 saniye içinde uçuculuğunu kaybeder ve yanar. İnce parçalanmış lastikler fırına beslendiğinde hızla alev alır. Tutuşma süresi tamamen sıcaklığa bağlı olup, 900°C sıcaklıkta yaklaşık 3 saniye sürebilir. Yoğun alev, ince parçalanmış lastiklerin uçuculuğunu kaybettiklerini ve yanmaya başladıklarını gösterir.

Japonya, Avrupa ve Amerika'da ömrünü tamamlamış lastiklerin çimento fabrikalarında kullanımı 1970'lerden beri yaygınlaşmıştır. 2003 yılında ABD'de 290 milyon lastik atığı sınıflandırılmış ve bu miktarın yaklaşık %45'i yakıt olarak kullanılmıştır. Bu miktarın %58'i ise çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak tüketilmiştir. Avrupa'da her yıl yaklaşık 2,5 milyon ton lastik oluşmakta ve bu lastiklerin %40'ı herhangi bir işleme tabi tutulmadan atılmaktadır (Pipilikaki ve ark., 2005).

#### ***Endüstriyel Plastik Atık - ATY (Atıktan Türetilmiş Yakıt-Endüstriyel Katı Atık)***

Yazıcı (2019)'ya göre; Atıktan Türetilmiş Yakıt olarak bilinen çöpten türetilmiş yakıt, çimento üretimi gibi endüstriyel süreçlerde enerji kaynağı olarak kullanılan bir yakıt türüdür. Çimento üretimi için geleneksel yakıtların yanı sıra alternatif yakıtların kullanımı giderek daha yaygın hale gelmektedir ve endüstriyel plastik atıklar bu alternatif yakıtlardan biridir. Endüstriyel plastik atık, evsel atıklar ve endüstriyel atıklar gibi çeşitli kaynaklardan elde edilen katı atıklardan üretilen bir yakıttır. Bu atıklar, geri dönüşüm, kompostlama veya diğer atık yönetimi süreçleriyle önceden işlenir ve daha sonra özel tesislerde işlenerek endüstriyel plastik atık haline getirilir. Endüstriyel plastik atık üretimi sırasında atıklar öğütülür, ayrıştırılır ve bazen kurutulur. Sonuç olarak, bu atıkla, birçok farklı malzemeyi içeren bir karışım haline gelir.

Çimento üretiminde endüstriyel plastik atık kullanımı çeşitli avantajlar sunar. İlk olarak, çimento fabrikalarında endüstriyel plastik atıkların kullanılması, geleneksel fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltabilir ve enerji maliyetlerini düşürebilir. Ayrıca, endüstriyel plastik atıkların

kullanımı, atıkların değerlendirilmesi ve atık bertarafının azaltılması gibi çevresel faydalar sağlar. Bu sayede çimento üretimi sırasında çevresel etkiler azaltılabilir ve sürdürülebilirlik hedefleri desteklenebilir. Endüstriyel plastik atıkların çimento üretiminde kullanılmasıyla ilgili bazı teknik zorluklar da vardır. Bu atıkların kalorifik değeri ve bileşimi atık kaynağına bağlı olarak değişebilir, bu nedenle yakıtın doğru kalite ve enerji içeriğine sahip olması önemlidir. Ayrıca, endüstriyel plastik atıkların yanması sırasında çıkan gazların kontrol edilmesi ve çevresel standartlara uygun olması gerekmektedir.

Endüstriyel plastik atıklar, çöpten elde edilen yakıt anlamına gelir ve döner fırınlarda alternatif bir yakıt olarak kullanılabilir. Endüstriyel plastik atıklar, çeşitli atıkların işlenerek ayrıştırılması ve geri dönüşümüyle elde edilen bir yakıt türüdür.

Endüstriyel plastik atıkların döner fırınlara beslenmesi sırasında birtakım adımlar yer almaktadır. Bunlar şu şekilde sıralabilir;

*Atık Kaynağının Belirlenmesi:* Endüstriyel plastik atıkların üretimi için uygun atık kaynakları seçilmelidir. Bu genellikle evsel atıklar, endüstriyel atıklar, tıbbi atıklar ve benzeri atık türlerini içerebilir.

*Atık Ayrıştırma ve İşleme:* Atıklar, geri dönüşüme uygun malzemelerin ayrıştırılması ve işlenmesi için özel tesislerde işlenir. Bu süreçte metal, cam, plastik gibi geri dönüştürülebilir malzemeler ayrıştırılır ve geri kazanılır. Kalan atıklar daha sonra endüstriyel plastik atıkların üretimi için kullanılacak şekilde işlenir.

*Öğütme ve Karıştırma:* İşlenen atıklar öğütülerek küçük parçalara ayrılır. Bu parçalar daha sonra belirli bir bileşim elde etmek için önceden belirlenmiş oranlarda karıştırılır. Bu adım, RDF'nin kalitesini ve enerji içeriğini kontrol etmek için önemlidir.

*Endüstriyel Plastik Atıkların Besleme Sistemi:* Öğütülmüş ve karıştırılmış endüstriyel plastik atıklar, döner fırına özel bir sistem kullanılarak taşınır. Bu sistem genellikle konveyör bantlar, pneumatik transfer sistemleri veya siloları içerebilir. Bu atıklar, döner fırının yanma odasına düzenli bir şekilde beslenir.

*Yakma ve Enerji Üretimi:* Endüstriyel plastik atıklar, döner fırının yanma odasında yüksek sıcaklıklarda yakılır. Bu yanma süreci sırasında ortaya çıkan ısı, çimento üretiminde kullanılan termal enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılır. Böylece çimento üretiminde geleneksel yakıtlara olan bağımlılık azaltılarak enerji verimliliği artırılır.

Genç (2013)'e göre; ATY (Atıktan Türetilmiş Yakıt), sanayi tesislerinde ek yakıt olarak daha yaygın olarak kullanılsa da doğrudan yakılabilir. Çimento fabrikaları, birlikte yakma uygulamalarının en sık görüldüğü yerlerdir. Evsel atıkların ATY'ye dönüştürülerek yakılması, belediyeler ve sanayi tesisleri arasında karşılıklı kazanç sağlayan bir yaklaşımı temsil eder (Yazıcı, 2019). Örneğin, belediyeler çöp sahalarında depolanan katı atık miktarını azaltırken, sanayi tesisleri yakıt tasarrufu elde eder.

Yazıcı (2019)'a göre; ATY'nin birlikte yakılması genellikle kömür, biyokütle, talaş tozu, çimento fırınlarında kullanılan klinkerler gibi yakıtlarla karıştırılarak gerçekleştirilir. Evsel atıklardan elde edilen ATY'nin yanma karakteristiklerinin standart hale getirilmesi ve düşük emisyon değerlerine sahip olması, yakma süreçlerinin tasarımında temel hedeflerdir. Ayrıca, evsel atıkların belediyeler tarafından düzenli depolama alanlarına götürülerek bertaraf edilmesi düşünüldüğünde, ATY'nin ek yakıt olarak kullanılması çevresel açıdan önemli bir yaklaşımdır. Yakma uygulamaları verimli olsa da yüksek miktarda baca gazı emisyonları, dioksinler ve furanlar gibi zararlı maddeler içerdiği için çevre sorunlarına neden olabilir. Bu sorunlar, kompleks ve maliyetli baca gazı arıtma sistemlerini gerektirir. Ancak, çimento fabrikalarında zaten mevcut olan prosesler ve baca gazı arıtma mekanizmaları, evsel atıkların ATY'ye dönüştürülerek bertaraf edilmesi açısından önemli bir fırsat sunar. Bu sayede dioksin ve furanların zararlı etkilerinin giderilmesi için gerekli proseslerin uygulanması mümkün olur (Yazıcı, 2019).

#### **1.4.3. Arıtma Çamuru**

Kurutulmuş arıtma çamuru, arıtma tesislerinde evsel atık suyun arıtılması sırasında oluşan çamurun kurutulması sonucunda elde edilen katı bir atık üründür. Evsel atık su arıtma tesislerindeki biyolojik ve fizikokimyasal işlemler sonucunda ortaya çıkan çamur, genellikle su içeriğinin azaltılması ve stabilizasyonu için kurutulur. Kurutulmuş arıtma çamuru, çeşitli uygulamalarda kullanılabilecek birçok özelliğe sahiptir. Öncelikle, kurutulmuş arıtma çamuru, organik madde, azot, fosfor ve diğer besin maddeleri gibi tarımsal gübre bileşenlerini içerir. Bu nedenle, tarımsal alanlarda gübre olarak kullanılabilir ve toprak verimliliğini artırabilir. Kurutulmuş arıtma çamuru, yanma özelliklerine sahip olduğundan enerji üretimi için de kullanılabilir. Özellikle yüksek kalorifik değeri olan çamurlar, termal enerji santrallerinde veya endüstriyel tesislerde yakıt olarak kullanılabilir. Bu şekilde, atık çamurun bertarafıyla birlikte enerji üretimi sağlanabilir. Ayrıca, kurutulmuş arıtma çamuru inşaat malzemesi olarak da kullanılabilir.

Özellikle yapı malzemeleri üretiminde, çamurun kil içeriği, bağlayıcılık özelliği ve izolasyon yetenekleri dikkate alınarak kullanılabilir. Böylece, çamurun geri dönüştürülmesiyle çevresel etkiler azaltılabilir ve sürdürülebilir bir yaklaşım benimsenebilir. Ancak, kurutulmuş arıtma çamurunun kullanımıyla ilgili bazı önemli faktörler ve düzenlemeler vardır. Bunlar arasında çamurun kalitesi, içerdiği kirleticilerin kontrolü, toksisite ve patojenlerin inaktivasyonu gibi hususlar bulunmaktadır. Ayrıca, çamurun kullanıldığı uygulama alanlarına yönelik yerel düzenlemeler ve standartlar da dikkate alınmalıdır. Sonuç olarak, kurutulmuş arıtma çamuru, atık yönetimi ve kaynak geri dönüşümü açısından potansiyel sağlayan bir atık üründür. Tarımsal gübre, enerji üretimi ve inşaat malzemesi gibi farklı alanlarda kullanılarak sürdürülebilirlik ve kaynak verimliliği hedeflerine katkı sağlayabilir.

### 1.5. Klinkerin Kavramsal Tanımı ve Genel Yapısı

Klinker, çimento üretim sürecinde temel ham madde olan çimento hamurunun yüksek sıcaklıkta pişirilmesiyle oluşan bir bileşendir. Klinker, çimento üretimindeki ana bileşen olup sonrasında çeşitli katkı maddeleri eklenerek çimento üretimine devam edilir. Klinker, genellikle gri veya kahverengi renkte olup, sert, pürüzsüz ve yoğun bir yapıya sahiptir (Korkmaz, 2021).

Klinkerin temel yapısı, hidratlaşmış minerallerden oluşan kristal yapılar içermektedir. Kalsiyum silikat, klinkerde en yaygın olarak bulunan mineraldir ve çimento hamurundaki kalsiyum oksit (CaO) ve silika (SiO<sub>2</sub>) içeren bileşenlerin pişirme sırasında kimyasal reaksiyonları sonucu oluşur. Bu mineral, klinkerin ana dayanım verici bileşenlerinden biridir. Klinker, kalsiyum silikatın yanı sıra kalsiyum alüminat, kalsiyum aluminosilikat ve diğer mineralleri içeren karmaşık bir mineral bileşimine sahiptir. Kalsiyum alüminat hidrat (C-A-H) ve kalsiyum sülfat (CaSO<sub>4</sub>) gibi diğer önemli mineraller ise çimento üretiminde klinkerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemektedir. Klinkerin üretimi, çimento hammaddelerinin öğütülerek ince toz haline getirilmesiyle başlar. Daha sonra, su ile karıştırılan çimento hamuru oluşur. Bu hamur, klinker fırınına yerleştirilerek yaklaşık 1400-1500 °C sıcaklıkta yüksek sıcaklıkta pişirilir. Pişirme süreci, çimento hammaddelerinin kimyasal dönüşümünü ve mineral oluşumunu sağlar. Klinker üretimi sırasında klinker fırınında farklı bölgeler oluşur, bunlar ön ısıtma bölgesi, pişirme bölgesi ve soğutma bölgesidir. Her bölgenin farklı sıcaklık ve koşulları, çimento hamurunun klinkere dönüşüm sürecini etkiler. Klinker, çimento üretimi için temel ham madde olduğu gibi çimento özelliklerini belirleyen önemli bir bileşendir. Klinkerin kimyasal ve mineral bileşimi, çimento dayanımı, hidratasyon süreci, reaksiyon hızı ve diğer özellikler üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Şanlı ve Ünlü, 2020; Tan, 2010).

Kaplan (2018)'na göre; çimento üretiminde kireç taşı ve kil gibi hammaddeler kullanılarak klinker üretilir. Buna ek olarak, bazı durumlarda boksit, demir cevheri veya silis kumu gibi hammadde maddeleri de kullanılır. Bu hammadde maddeleri öğütülerek klinker üretimi için hazırlanır. Klinker üretimi için hazırlanan bu hammaddeler, yüksek sıcaklıklarda fırına verilir. Kutbay (2008)'a göre; sıcaklık yükseldikçe, önceden kalsine edilmiş malzemelerde fiziksel ve kimyasal değişiklikler meydana gelir. Hammaddeler önce erir ve daha sonra tekrar bir araya gelerek topaklar oluştururlar.

**Silikat Modülü (S.M.):** Silikat Modülü (S.M.), klinkerin ana bileşeni olan silikatların oranını belirlemek için kullanılan bir parametredir. S.M. değeri, klinkerde bulunan SiO<sub>2</sub> (silisyum dioksit) ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alüminyum oksit) bileşenlerinin oranını ifade eder.

S.M. değeri, aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$S.M. (\%) = (SiO_2)/(Al_2O_3)$$

S.M. çalışma aralığı genellikle klinkerde %2.35-%2.45 aralığında gerçekleşmektedir.

Burada,  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  miktarları, klinkerdeki bileşenlerin yüzde olarak ifade edilmiş miktarlarıdır. S.M. değeri, klinkerin mineralojik ve kimyasal bileşimini belirlemekte önemli bir parametre olarak kullanılır. Bu değer, çimento üreticilerine klinker bileşimini kontrol etme ve istenen çimento özelliklerini elde etme konusunda bir rehberlik sağlar. S.M. değeri, çimento hidratasyon sürecini etkileyen ve çimento dayanıklılığını belirleyen faktörlerden biridir. Yüksek S.M. değerine sahip klinkerler, daha fazla silikat bileşiği içerdiğinden çimento hidratasyonunda daha hızlı ve yoğun reaksiyonlar gerçekleşir. Bu da genellikle daha yüksek erken dayanım ve hızlı sertleşme sağlar. Düşük S.M. değerine sahip klinkerler ise daha fazla alüminat bileşiği içerir. Bu durum, hidratasyon sürecinde daha yavaş ve kontrollü reaksiyonlar gerçekleşmesine yol açar. Daha düşük S.M. değerine sahip klinkerler genellikle daha yüksek mukavemet gelişimi ve daha iyi kimyasal dayanıklılık sağlar. S.M. değeri, çimento üretiminde kullanılan hammaddelerin bileşimine bağlı olarak farklılık gösterebilir. Optimum S.M. değeri, çimento üreticisinin istediği çimento özelliklerine ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak belirlenir.

**Alüminyum Modülü (A.M.):** Alümin Modülü (A.M.), klinkerin kimyasal bileşimini belirlemek için kullanılan bir parametredir. A.M., klinkerdeki alüminyum ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) miktarının demir ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) miktarına oranını ifade eder. Bu parametre, çimento üretimi sürecinde klinkerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkiler. A.M. değeri, genellikle 1 ile 4 arasında değişir. Bu değer, çimento üreticilerinin hedefledikleri çimento özelliklerine ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak değişebilir. A.M. değerinin belirlenmesi, klinkerin sinterleşme özelliklerini, hidratasyon sürecini ve son çimento özelliklerini etkiler. A.M. değeri yüksek olan klinkerler, daha düşük sinterleşme aktivitesine sahip olabilir. Bu durum, çimento üretim sürecini etkileyerek daha yüksek sıcaklıklarda pişirme gereksinimini artırabilir. Ayrıca, çimento priz süresini uzatabilir ve dayanım kazanma sürecini geciktirebilir.

Öte yandan, A.M. değeri düşük olan klinkerler, daha iyi sinterleşme özelliklerine sahip olabilir. Bu durum, çimento üretim sürecini hızlandırabilir ve çimentonun erken priz almasını ve dayanım kazanmasını sağlayabilir. A.M. değeri, klinkerin mineralojik ve kimyasal bileşimini anlamak ve çimento üretiminde kontrol etmek için önemli bir parametredir.

**Kızdırma Kaybı (K.K.):** Kızdırma Kaybı, bir malzemenin ısınma veya pişirme işlemi sırasında kaybettiği kütlenin yüzdesini ifade eder. Genellikle organik maddelerin yanması veya suyun buharlaşması gibi termal ayrışma süreçlerine bağlı olarak oluşur. Kızdırma kaybı, belirli bir sıcaklık aralığında malzemenin ağırlığının ölçülmesiyle hesaplanır. Malzeme, belirli bir sıcaklıkta bir fırında ısıtılarak veya pişirilerek analiz edilir. Bu sıcaklık genellikle malzemenin içerdiği organik maddelerin yanma veya suyun buharlaşma sıcaklığıdır.

$$KK = 0.44 * \text{CaCO}_3 + 0.524 * \text{MgCO}_3 + \text{Bağlı su} + \text{Bağlı Bileşen}$$

Olarak formülize edilmektedir.

**Kireç Doygunluk Faktörü (KDF):** Çimento üretiminde kullanılan hammaddelerin bileşimini ifade etmek için kullanılan bir parametredir. KDF, çimento hammaddeleri olan kireçtaşı ( $\text{CaCO}_3$ ), kil ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{SiO}_2$ ), demir cevheri ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve alüminyum cevheri ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) gibi bileşenlerin oranlarını dikkate alır. KDF değeri, serbest kireç ( $\text{CaO}$ ) içeriğinin kireçtaşı ve kilin kombine kireç ( $\text{CaO}$ ) içeriğiyle oranını ifade eder.

$$\text{KDF} = 100 \cdot \text{CaO} / (2.85 \cdot \text{SiO}_2 + 1.18 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Çalışma aralığı %95-98 arasında genellikle gerçekleştirilir.

Eğer  $\text{P}_2\text{O}_5$  değeri klinker içerisinde fazla ise;  $\text{P}_2\text{O}_5 > \%0.65$  ise;

$$\text{KDF} = 100 \cdot (\text{CaO} - (1.183 \cdot \text{P}_2\text{O}_5)) / (2.85 \cdot \text{SiO}_2 + 1.18 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Formülize edilir ve hesaplanır

**Serbest Kireç (S.CaO):** Çimento hammaddelerindeki kireçtaşı ve kilin kalsinasyon sürecinde kaybettiği karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) ile elde edilen bileşendir.

$$\% \text{S.CaO} = 0.31 (\text{KDF} - 100) + 2.18 \cdot (\text{S.M.} - 1.8) + 0.73 \cdot \text{Q} + 0.33 \cdot \text{C} + 0.34 \cdot \text{A}$$

Q: 45 mikron üzeri kuvars miktarı

C: Asitte çözünen 125 mikron elek bakiyesi

A: 45 mikron üzeri kuvars dışında asitte çözünmeyen maddeler

**Sıvı Faz (Likit Faz):** Klinker sıvı fazı, fırına beslenen malzemenin bir fraksiyonudur ve üst geçiş bölgesi ile sinter bölgesi arasında yer alır. Bu sıvı faz, klinker tanelerinin oluşumu ve mineral fazlarının oluşumu ve özellikleri açısından kritik bir rol oynar. Endüstriyel ölçekte üretilen klinkerlerde, genellikle sinter bölgesindeki sıvı faz miktarı %23 ila %29 arasında değişir. Portland çimentosu klinkeri için temel karışım  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 'ten oluşur ve sıvı fazın oluşmaya başladığı en düşük sıcaklık  $1338^\circ\text{C}$ 'dir. Bu eutektik sıcaklıkta, sıvı fazın kompozisyonu %55  $\text{CaO}$ , %6  $\text{SiO}_2$ , %23  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve %16  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  şeklindedir (Mosci, 2012). Endüstriyel farinler, hammaddelere bağlı olarak  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{SO}_3$  gibi safsızlıklar içerir. Bu oksitler, fırın içerisinde ergitici olarak davranır ve kalsinasyon bölgesine kadar sıvı faz oluştururlar. Bu safsızlıklar, ötektik sıcaklığını düşürerek klinker oluşumunu hızlandırır. Bu bilgiler, klinker sıvı fazının önemini ve endüstriyel farinlerin bileşimindeki safsızlıkların klinker oluşumu üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. Sıvı fazın uygun oluşumu, klinker mineralojisinin ve özelliklerinin kontrol edilmesinde önemli bir faktördür.

$$\% \text{ Likit Faz} = 1.13x\text{C}_3\text{A} + 1.35\text{C}_4\text{AF} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{N}_2\text{O}$$

Likit fazda en önemli parametre ise MgO oranıdır. MgO oranı %2 altında olması durumunda Likit faz için ideal olan çalışma aralığı %22-28 aralığındadır. Likit faz yüksek olur ise fırın içerisinde anıztaşıma fazla olur ve kemerleşmeler meydana gelir. Bu da pişme zorluklarını meydana getirir.

Klinkerin fazları şu şekilde sıralanabilir;

Geleneksel Portland çimento klinkerinin ağırlıkça %95'ten fazlası CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi bileşenlerden oluşur. Bu dört oksit, klinkerdeki ana fazları oluşturur: alit, belit, celit ve ferrit'tir (Moir, 1983).

**Alit (C<sub>3</sub>S)**, klinkerde %40-70 arasında birikim oluşturan kristallerdir ve genellikle kristal şekilleri öhedral (açıkça tanımlanmış kristal yüzleri), kısmen kristallenmiş (zayıf tanımlanmış kristal yüzleri) ve anhedral (kristal olmayan yüzler) arasında değişir. Yoğunluğu 3.13-3.22 mg/m<sup>3</sup> arasındadır. Alit kristal yapısında Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> ve Fe<sup>3+</sup> gibi iyonları içerir. Bazı çalışmalarda saf trikalsiyum silikatın 7 polimorfinin sıcaklığa bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir (İdris ve ark., 2008).



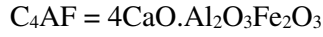
**Belit (C<sub>2</sub>S)**, çimento endüstrisinde genellikle C<sub>2</sub>S olarak adlandırılır. Saf olmayan dikalsiyum silikat, trigonal, ortorombik ve monoklinik tiplerde bulunur ve portland çimento klinkerinin yaklaşık %10-30'unu oluşturur. Belit taneleri genellikle idyomorf, camsı ve normal şartlarda yuvarlak olup, çok yönlü yapraküstü yapıya bağlı olarak yuvarlaklaşabilirler. Mohs sertlik skalasına göre sertliği 4 ile 5 arasındadır.



**Trikalsiyum Alüminat (C<sub>3</sub>A)**, çimento endüstrisinde 1542 °C'lik bir erime noktasına sahip olup, izometrik, ortorombik, tetragonal ve monoklinik biçimlere sahiptir ve genellikle C<sub>3</sub>A olarak adlandırılır. Trikalsiyum alüminat, genellikle düşük alkali veya alkali içermeyen klinkerde uniform, küçük, dikdörtgen kristaller içerir. C<sub>3</sub>A geleneksel klinkerde %18'e kadar bulunabilir. Mohs sertlik skalasına göre sertliği 6'dır.



**Ferrit (C<sub>4</sub>AF)**, klinker yapısında bulunan bir bileşendir ve C<sub>4</sub>AF olarak da adlandırılmaktadır. Ferrit, klinkerin renklenmesinde önemli bir rol oynar ve gri veya kahverengi renge sahip olmasını sağlar. Ferritin klinkerdeki miktarı genellikle %4 ila %15 arasında değişmektedir. Beyaz çimento üretiminde istenen klinkerde ferrit miktarı düşüktür veya sıfıra yakındır. Çünkü ferrit, beyaz çimentonun istenilen beyaz renk ve estetik görünümünü engelleyebilecek renk pigmentleri içermektedir.



Demir oksitler, klinker oluşum mekanizması üzerinde etkili olup ferrit, belit ve alit gibi katı çözelti formlarının miktarına ve değerlerine bağlıdır.  $Fe_2O_3$  miktarının artması,  $C_2S$ 'in (belit) alit ve polimorfik dönüşümünü istikrarsızlaştırabilir ve klinker mineralinin mekanik mukavemet ve hidrasyon etkinliğinde azalmaya neden olabilir. Ayrıca, mikro kirlilik olarak kabul edilen bileşiklerin (örneğin,  $Cr_2O_3$  ve  $MnO_2$ ) klinker minerallerinin stabilizasyonu ve öğütülebilirliğinin artırılmasında kullanıldığı bildirilmiştir.  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$  ve diğer mikro kirliliklerin optimum miktarlarda bulunması, klinker mineral kristal yüzeylerindeki mikro çatlakların stabilitesini ve sabitlenmesini önemli ölçüde etkileyebilir.

### 1.6. Farin Değirmeni Çalışma Prosesi

Öztürk (2016)'e göre; farin değirmeni, çimento üretim sürecindeki önemli bir adımdır. Çimento hamuru haline getirilmiş çimento hammaddelerini (kireçtaşı, kil, demir cevheri vb.) ince bir toza öğütmek için kullanılan bir tesis veya ekipmandır. Farin değirmeni, çimento üretiminin başlangıç noktası olan çimento hamurunun oluşturulduğu aşamadır.

Farin değirmeni çalışma prosesi genellikle şu adımlardan oluşur:

**Besleme:** Çimento hammaddeleri, doğru oranlarda ve granülometriye sahip olarak farin değirmenine beslenir. Bu hammaddeler, önceden depolanmış malzemeler veya doğrudan ham madde bunkerlerinden alınabilir.

**Öğütme:** Beslenen hammaddeler, farin değirmeninin içindeki öğütücü elemanlar aracılığıyla öğütülür. Farin değirmeni genellikle bir döner silindir veya tambur şeklindedir ve içinde çelik bilyeler, merdaneler veya diğer öğütme elemanları bulunur. Bu elemanlar, hammaddeleri sürekli olarak ezerek ve öğüterek ince bir toz haline getirir.

**Sınıflandırma:** Öğütme işlemi sonucunda oluşan toz, bir sınıflandırıcı veya elek sistemi aracılığıyla istenilen granülometriye göre ayrılır. Bu aşamada, tozun belirli bir boyut aralığına sahip olması sağlanır. İstenilen ince tane boyutları, tozun çimento özelliklerini ve son ürünün kalitesini belirler.

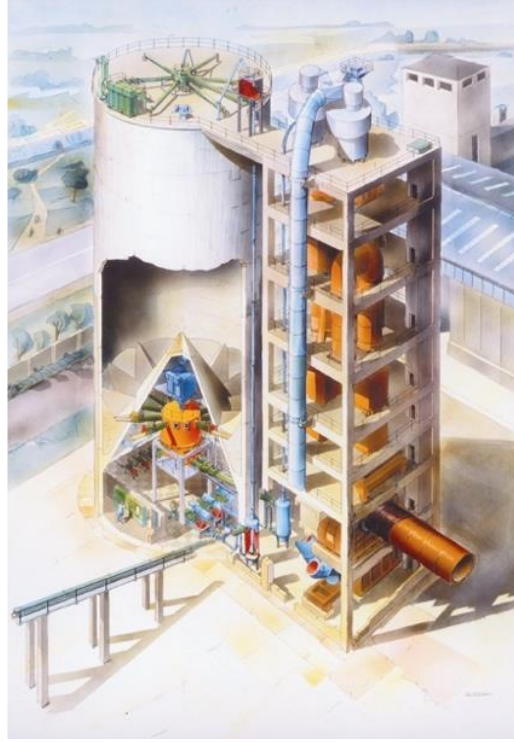
**Ulaşım:** Öğütülmüş ve sınıflandırılmış toz, farin değirmeni sisteminden, genellikle hava veya konveyör sistemleriyle bir sonraki aşamaya taşınır. Bu aşamada, tozun diğer süreçlere geçişi sağlanır, örneğin çimento depolama silolarına veya fırın besleme sistemine aktarılır.

Farin değirmeni prosesi, çimento üretim sürecinin önemli bir aşamasıdır çünkü hammaddelerin ince toz haline getirilmesini sağlar. Bu, çimento hamurunun oluşması için önemli bir adımdır. Öğütme işlemi, çimento hammaddelerinin yüzey alanını artırarak hidrasyon sürecini hızlandırır ve çimentonun dayanımını etkileyen minerallerin serbestleşmesini sağlar. Bu proses, enerji yoğun bir aşama olabilir ve elektrik enerjisi ve yakıt maliyetlerini etkileyebilir. Çimento üretimi için kullanılan farinin kimyasal bileşimi, üretilen çimentonun fiziksel ve dayanıklılık



özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Öztürk (2016)'e göre; farin, çimento üretimi için fırına verilmeye hazırlanan hammadde karışımını ifade eder. Genellikle dört ana bileşeni içerir: CaO (kalsiyum oksit), SiO<sub>2</sub> (silisyum dioksit), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alüminyum oksit) ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (demir oksit). Kalker ve kilin uygun oranlarda karıştırılması ve bazı düzenleyici malzemelerin eklenmesiyle çimento üretimi için gerekli hammadde elde edilir. Çimento üretim sürecinde, mümkün olduğunca az çeşit malzeme kullanmak ekonomik ve sürdürülebilir bir tedarik sağlamak için önemlidir. Bu nedenle, çoğunlukla kalker, marn ve kil gibi malzemeler tercih edilir. Bu malzemelerin oranları, standartlara uygun olduğu sürece çimento üretiminde kullanılır. Analizler, farin karışımlarının doğru bir şekilde yapılmasını ve klinkerin uygun kimyasal ve mineral özelliklere sahip olmasını sağlar.

Farin karışımı, çimento üretiminde kullanılan döner fırına gönderilir ve çimento hamurunun pişirilmesiyle klinker oluşur. Farinin bileşenlerinin yüzde oranları, çimento dayanımını ve dayanıklılığını doğrudan etkiler. Kireç doygunluk faktörü (KDF), silikat modülü (S.M.), hidrolik modül (H.M.) ve alümin modülü (A.M.) gibi parametrelerle klinkerin ana bileşenlerinin oranları belirlenir (Öztürk, 2016). Farin karışımının doğru bileşen oranlarına sahip olması, üretilecek çimentonun istenen özelliklere sahip olmasını sağlar. Örneğin, belirli bir dayanım seviyesine sahip çimento üretmek isteniyorsa, farin bileşenlerinin uygun oranlarda olması önemlidir. Aynı şekilde, çimentonun dayanıklılık, hidrasyon süreci ve reaksiyon hızı gibi özellikleri de farin bileşimine bağlıdır. Sonuç olarak, çimento üretiminde farin karışımının doğru kimyasal bileşimi, çimentonun fiziksel ve dayanıklılık değerlerini belirleyen önemli bir faktördür. Bileşenlerin doğru oranlarda ayarlanması, kaliteli çimento üretimi için önemlidir ve çimento üretim teknolojisi içinde kritik bir aşamayı temsil eder (Şekil 1.7).

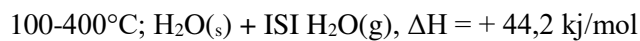


Şekil 1.7. Farin değirmeni ve homojenizasyon şematik görünümü

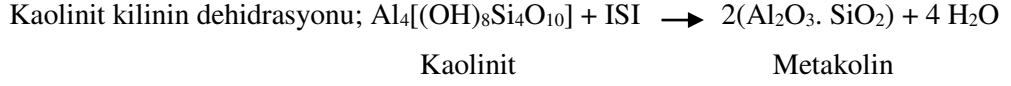
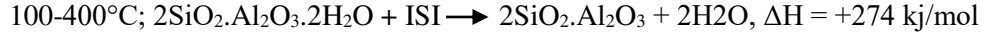
### 1.7. Döner Fırın Çalışma Prosesi

Döner fırın klinker üretim prosesi, beş aşamada gerçekleşmektedir. Bu aşamalar şunlardır Şahin (2017)'e göre; buharlaşma bölgesi, kil dehidrasyon bölgesi, kalsinasyon bölgesi, klinkerleşme bölgesi ve soğutma bölgesi şeklinde sıralanmaktadır.

Farin adı verilen öğütülmüş hammadde, fırın sisteminin ilk besleme noktasından başlayarak soğutma ünitesinden çıkış noktasına kadar her adımda önemli reaksiyonlara tabi tutulmaktadır. Bu reaksiyonların gerçekleştiği bölgelerin düzenli ısı profillerine sahip olması son derece önemlidir. Fazla ısı verilmesi malzemenin özelliklerini bozabileceği gibi yakıt masraflarını da artırırken, yetersiz ısı verilmesi reaksiyonların tam olarak gerçekleşmemesine ve klinker oluşumunun eksik kalmasına yol açabilmektedir (Kuleli, 2009). Şahin (2017)'e göre; buharlaşma bölgesi, döner fırınlara bağlı ön ısıtıcı kulede ortaya çıkar. Bu kulelerde, malzemenin ve fırından gelen sıcak gazın ayrılmasını sağlayan ekipmanlar olan siklonlar bulunmaktadır. Bu bölüm, yoğun bir enerji transferinin gerçekleştiği alandır. Buharlaşma bölgesinde, 40-70 °C aralığındaki farin, farin silolarında depolandıktan sonra elevatörler yardımıyla ön ısıtma kulesine aktarılmaktadır (Şekil 1.8). Farin besleme noktası, ön ısıtmanın ikinci siklon gaz çıkış noktası olup sıcaklığı yaklaşık 400 °C'nin üzerindedir. Bu aşamada, farinin yaklaşık %1 civarındaki nem miktarı uzaklaştırarak kaba nem ortadan kaldırılmaktadır.



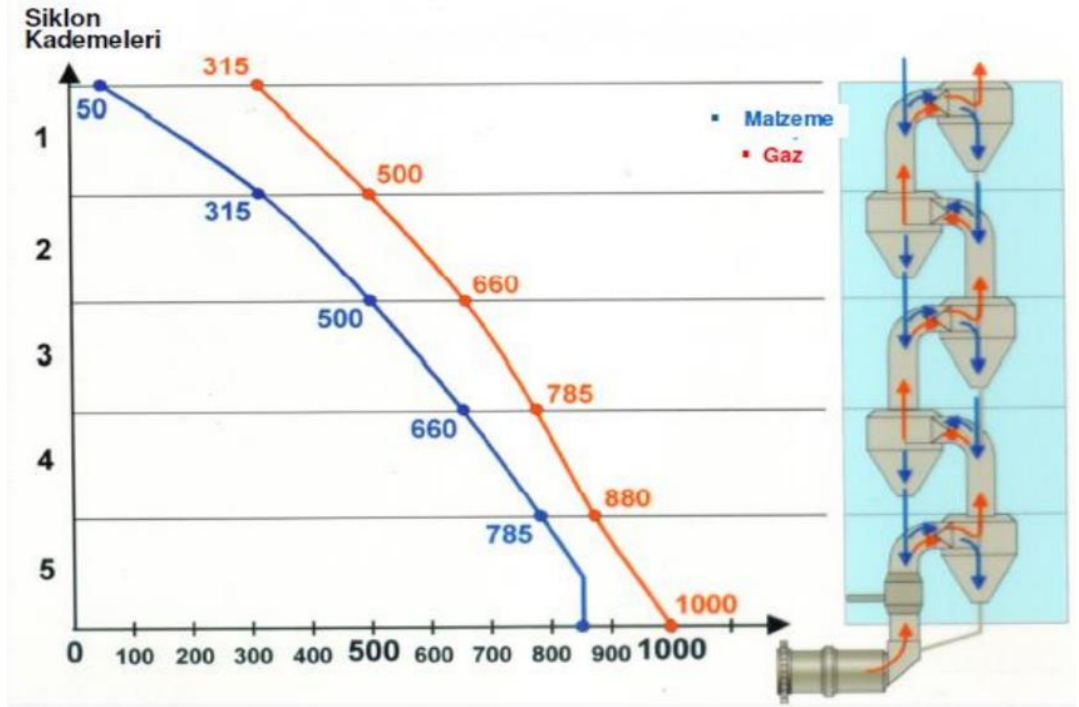
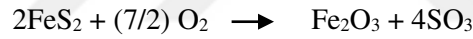
Kil dehidrasyon bölgesi; Kil dehidrasyon bölgesi, farinin ana ham maddelerinden biri olan kilin kristal suyunu atmaya başladığı ve farin içinde bulunan  $MgCO_3$ 'ün parçalanmaya başladığı bir aşamadır (Kuleli, 2009). Bu bölgede, kilin içindeki suyun buharlaşması gerçekleşir ve  $MgCO_3$  molekülleri ayrışır.



Meta Kaolin, yüksek sıcaklıklarda bozunarak  $SiO_2$  ve  $Al_2O_3$  gibi klinker yapısında bulunan oksitlere dönüşür. Ayrıca, magnezyum karbonat da bu süreçte bozulmaya başlar. Bu dönüşüm ve bozunma reaksiyonları, klinker üretim sürecinde önemli rol oynar ve çimento kalitesini etkileyebilir.



Organik bileşikler ve sülfidler yüksek sıcaklıklarda buharlaşır ve oksitlenir. Örneğin, demir sülfür ( $FeS_2$ ) bileşiği oksijenle reaksiyona girerek demir oksit ( $Fe_2O_3$ ) ve sülfür trioksit ( $SO_3$ ) oluşturur.



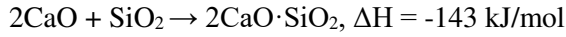
Şekil 1.8. Ön ısıtıcı malzeme ve gaz sıcaklık profili

Kalsinasyon bölgesinde ise; Kalsinasyon bölgesi, çimentonun ham maddelerinin önemli bir bileşeni olan kalsiyum karbonatın ( $\text{CaCO}_3$ ) bozunmasıyla karakterizedir. Bu bölgede,  $\text{CaCO}_3$ 'ün %90-98'i yüksek sıcaklıkta bozunarak kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) ve karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) şeklinde ayrışır. Bu kimyasal reaksiyonun yanı sıra kalsinasyon bölgesinde başka kimyasal dönüşümler de gerçekleşir. Kalsinasyon bölgesi, döner fırınların kapasitesini belirleyen önemli bir faktördür. Kalsinasyon oranı düştükçe, fırın kapasitesi de buna paralel olarak azalır. Kalsinasyon reaksiyonu genellikle  $900^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde tam olarak gerçekleşir. Bu sıcaklık, kalsiyum karbonatın termal ayrışmasını hızlandırmak ve istenen dönüşümlerin elde edilmesini sağlamak için kritik bir değerdir.

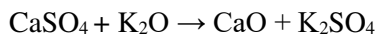
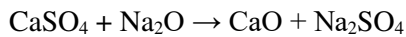
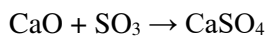
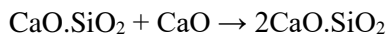
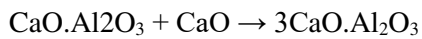
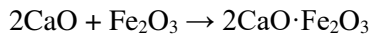
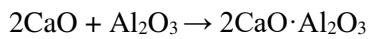
Kalsinasyon bölgesi, çimento üretim sürecinde önemli bir aşamadır çünkü kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) sonraki aşamalarda hidratasyon reaksiyonlarına girecek ve çimentonun sertleşmesini sağlayacak olan kalsiyum silikat hidrat (CSH) bileşiğinin oluşumuna katkıda bulunur. Bu nedenle, kalsinasyon bölgesinin etkinliği ve verimliliği, çimentonun kalitesi ve üretim verimliliği açısından büyük öneme sahiptir.



Bu reaksiyon, kalsiyum karbonatın termal ayrışmasıdır. Kalsiyum karbonat, yüksek sıcaklık altında kalsiyum oksit ve karbondioksit gazına ayrışır. Reaksiyonun ısısı ( $\Delta H$ )  $+474 \text{ kJ/mol}$ 'dür, yani reaksiyon endotermiktir, yani ısı alır. Bu reaksiyon kalsinasyon sürecinin bir parçasıdır ve çimento üretiminde önemli bir aşamadır. Kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ), sonraki aşamalarda hidratasyon reaksiyonlarına girerek çimentonun sertleşmesini sağlayacak olan kalsiyum silikat hidrat (CSH) bileşiklerinin oluşumuna katkıda bulunur.



Bu reaksiyon, kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) ve silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) arasında gerçekleşir. Yüksek sıcaklıkta, kalsiyum oksit ve silisyum dioksit birleşerek kalsiyum silikat ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) bileşiğini oluşturur. Bu reaksiyon sıcaklık aralığındaki sıcaklık koşullarında gerçekleşir ve  $\Delta H$  değeri  $-143 \text{ kJ/mol}$ 'dür, yani reaksiyon eksotermiktir ve enerji açığa çıkar. Kalsiyum silikat, çimento klinkerinin ana bileşenlerinden biridir ve çimento kalitesini etkileyen önemli bir bileşendir.

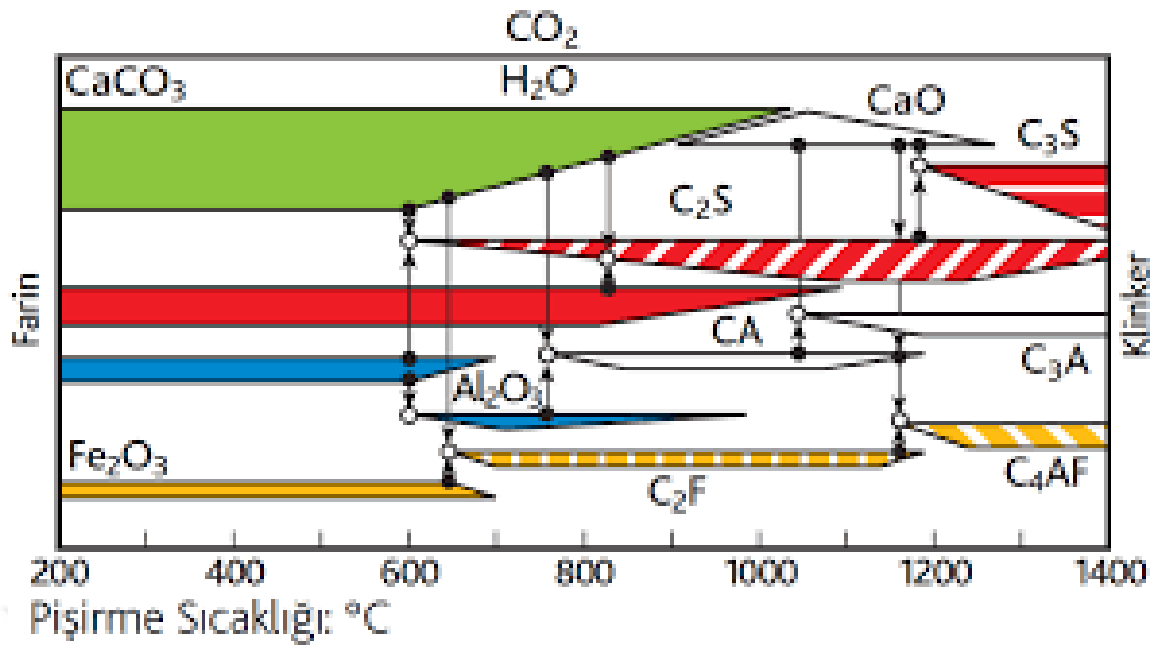


Kalsinasyon bölgesinin tamamlanmasıyla birlikte, farinin 1200°C'de fırın içerisinde belit ( $C_2S$ ), alimünat ( $C_3A$ ) ve ferrit ( $C_4AF$ ) olarak adlandırılan bileşenlerden oluşan klinker oluşur. Bu bileşenlerin yanı sıra  $C_3S$  (trikalsiyum silikat) da klinker yapısal olarak bulunur.  $C_2S$  (belit), klinker fazının oluşumunda önemli bir role sahiptir ve saf olarak klinkerde bulunmaz, her zaman diğer oksitlerle birlikte bulunur. Klinkerin sinterleşme sıcaklığı olan 1450°C'de serbest olarak bulunan CaO ile birlikte, klinkerdeki gerçek basınç dayanımını sağlayan  $C_3S$  oluşumuna katkıda bulunur.  $C_3S$ , klinkerin ana hidrolik bileşenidir ve çimentonun sertleşme ve dayanım özelliklerini etkiler.

Klinkerin ilk aylardaki basınç dayanımına etkisi sınırlıdır, ancak zamanla dayanıma olan katkısı artar. Belit ( $C_2S$ ), klinkerde genellikle %5-30 aralığında bulunur. Miktarının artması, çimento öğütme sürecinde zorluklara ve enerji maliyetlerinin yükselmesine neden olabilir. Yüksek belit içeriği, çimento öğütme işlemini zorlaştırabilir.

Güner (2023)'e göre; kalsine edilmiş farin fırına yaklaşık 1000°C sıcaklıklarda girer. Yakıt (kömür, petrokok, gaz, petrol ve alternatif yakıtlar gibi), hammaddelerin 1450°C'ye kadar malzeme sıcaklıklarına ulaşmasını sağlamak için 2000°C'ye kadar doğrudan döner fırına ateşlenir. Fırın (3-5 metre genişliğinde ve 30-60 metre uzunluğunda tuğla kaplı bir metal boru) dakikada yaklaşık 3-5 kez döner ve hammadde, fırının giderek daha sıcak olan bölgelerinden aleve doğru akar. Yoğun ısı, farini klinker haline getiren kimyasal ve fiziksel reaksiyonlara neden olur.

Savaş (2023)'a göre; fırın içerisinde direkt yanma olmakta olup, yanma işlemi ürün çıkış bölgesinde gerçekleşmektedir. Yakıt, sisteme döner fırın girişi ve çıkışından beslenmektedir. Ürün girişi tarafında yakıtın yanması için sisteme taze hava transfer edilmesine gerek bulunmamaktadır. Bunun nedeni, fırında yanma işlemi sonucunda bulunan baca gazı içerisinde oksijen bulunması ve baca gazı sıcaklığının yüksek olmasına bağlı olarak direkt yanmanın gerçekleşmesidir. Ürün çıkışı bölümünde yanma işlemi gerçekleşmektedir (Gül, 2019). Ürün çıkış bölümünde taze hava ve yakıt sisteme giriş yapmakta, bunun sonucunda sistemde yanma işlemi gerçekleşmektedir. Fırın içerisinde yanma işlemi sonucu oluşan ateş ile ürün birebir temas etmektedir (Güner, 2023). Homojen ve akışkan bir yapıya sahip mamul ürün çıkış bölgesinden soğutma bölümüne dökülmektedir. Yanma işlemi sonucunda ortaya çıkan mineral ve uçucu küller yarı mamul ile birleşmektedir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Döner fırında klinker üretim diyagramı

(<https://ecka.com.tr/ekler/cimento-gecmisten-gelecege-inovatif-yapi-malzemesi>)



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, 2004 ile 2023 yılları arasında yapılmış ilgili çalışmalara yer verilmiştir.

**Bhatty (2004)** tarafından yapılan bir araştırmada hammadde karakteristiklerinin çimento klinker kalitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı mineralojik bileşimlere sahip kalker ve kil örnekleri kullanılarak çimento klinkeri üretilmiştir. Sonuçlar; hammaddelerin mineralojik bileşimi ve reaktivitesinin çimento klinker kalitesi üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Özellikle, yüksek reaktif kalker ve kil örneklerinin çimento klinkeri oluşumunu hızlandırdığı ve daha iyi hidrasyon özelliklerine sahip çimento üretimini sağladığı bulunmuştur. Bunun da çimento dayanım ve performansını artırıcı etkisi olduğunu belirtmiştir.

**Prasad (2006)** tarafından yapılan araştırmada ise; çimento klinkerinin öğütülebilirliğini etkileyen faktörler araştırılmıştır. Araştırmacı, kalker ve kilin mineralojik bileşimlerini ve çimento klinkerinin öğütme özelliklerini incelemiştir. Sonuçlar, kalker ve kilin mineralojik bileşimlerindeki değişikliklerin çimento klinkerinin öğütülebilirliği üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Özellikle, uygun kalker ve kil bileşimi seçimi ile çimento klinkerinin daha kolay ve verimli bir şekilde öğütülebileceği belirlenmiştir.

Bu çalışmalar, kalker ve kil gibi hammaddelerin çimento klinkeri oluşumu ve özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve doğru bileşim seçiminin çimento kalitesini artırabileceğini göstermektedir.

**Akkaş (2009)** çimento hammaddelerinin yüzey özelliklerinin klinkerleşmeye etkisini araştırmıştır. Araştırmada, çimento hammaddelerinin Thin Layer Wicking (TLW) yöntemiyle temas açıları ölçülmüştür. Temas açısı verileri kullanılarak hammaddelerin yüzey enerjileri hesaplanmıştır. Farklı kil ve traslardan oluşan sabit Kireç Doygunluk Faktörü değerine sahip farin kompozisyonları hazırlanarak sabit fırın rejiminde (1450°C) klinker haline getirilmiştir. Üretilen klinkerlerin mineralojik yapı analizleri ve mikro yapı analizleri yapılmıştır. Klinkerleşme reaksiyonunun gerçekleşmesi, serbest CaO değerleri ile belirlenmiştir. Araştırma sonuçları, yüzey özellikleri karakterize edilen hammaddelerin klinkerleşme sürecinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Yapılan regresyon analizleri, yüzey özelliklerinin klinkerleşmedeki etkisini ortaya koymuştur.

**Kaya (2010)** tarafından yapılan araştırmada, farklı konsantrasyonlarda uçucu kül kullanımının çimento özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırma kapsamında, tras ve kalker karışımına farklı oranlarda uçucu kül eklenerek çimentolar hazırlanmıştır. Bu çimentoların dayanım özelliklerinin araştırılması ve kimyasal katkı ile dayanımlarının artırılması amaçlanmıştır. Klinker miktarının azaltılması ve uçucu kül miktarının artırılmasıyla hazırlanan çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla farklı incelik oranlarında harçlar hazırlanmış ve 2, 7, 28 günlük basınç dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, %1 incelikte %8 uçucu kül kullanımında 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında artış



gözlenmiştir. Ancak %8'den sonra uçucu kül miktarındaki artışla birlikte dayanımlarda düşüş gözlenmiştir. Bu düşüşün sebebi, uçucu küldeki CaO miktarının düşük olması olarak açıklanmıştır. Yüksek oranda uçucu kül içeren çimentoların dayanımını artırmak için tras, kalker ve yüksek miktarda uçucu kül içeren karışıma kalsiyum hidroksit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ve kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) tuzları ilave edilmiş ve bu çimentoların dayanımları test edilmiştir. Bu tuzların ilavesinin, uçucu kül içerikli çimentoların dayanımlarını artırdığı gözlemlenmiştir.

**Özel (2011)** tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında; çimento üretiminde alternatif yakıt kullanımının çevresel etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda; çimento üretiminde kullanılan atıktan üretilmiş yakıt ve bunun gibi metallerin çevresel açıdan olumsuz bir etkisinin bulunmadığı saptanmıştır.

**Kaddatz, Rasul ve Rahman (2013)** tarafından yapılan araştırmada; karbon kaplama, kullanılmış endüstriyel yağlayıcılar ve kullanılmış lastiklerin diğer bir deyişle bu üç alternatif yakıtın simülasyon sonuçları incelenmiştir. Yapılan çalışmaya göre; üçlü arasında en etkili yakıt kaynağını belirlemek için yapılan araştırmada, endüstriyel yağlayıcı,  $\text{CO}_2$  emisyonu açısından en iyi seçenek olarak bulunmuştur.

**Zhang (2013)** tarafından yapılan araştırmada, çimento klinkeri oluşumu üzerinde kalker ve kil karakteristiklerinin etkisi incelenmiştir. Araştırmacılar, farklı kalker ve kil örneklerini kullanarak çimento klinkeri üretmişlerdir. Sonuçlar, farklı kalker ve kil bileşimlerinin klinker mineralojisi ve fiziksel özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Özellikle, yüksek kalsiyum içeriğine sahip kalkerlerin daha yüksek alit ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) oluşumuyla sonuçlandığı ve bu durumun çimento kalitesini artırabileceği belirtilmiştir.

**Boshoff (2013)** tarafından yapılan araştırmada; linyit kömürü yan ürünü olan kalker katkısının çimento sistemlerinin hidrasyon ve mikroyapısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Farklı oranlarda kalker katkısı içeren çimento karışımları hazırlanmış ve hidrasyon süreci izlenmiştir. Sonuçlar, kalker katkısının hidrasyon sürecini etkilediğini ve çimento karışımlarının mikroyapısını değiştirdiğini göstermiştir. Özellikle, kalker katkısının hidrasyon ürünleri arasında daha homojen bir dağılım sağladığı ve çimento matrisinin porozitesini azalttığı bulunmuştur. Bu durum, çimento dayanımını artırabilir ve çimento kalitesini yükselebileceği göstermektedir.

Yapılan araştırmalar incelendiğinde, kireçtaşı ve kil gibi hammaddelerin çimento klinkeri oluşumu, hidrasyon süreci ve mikroyapı üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Bu çalışmaların sonuçları, hammaddelerin mineralojik bileşimi, reaktivitesi, kristal yapıları ve diğer özelliklerinin çimento kalitesini etkileyebileceğini göstermektedir. Bu bağlamda doğru hammadde seçimi ve bileşim optimizasyonu, çimento üretiminde kalite iyileştirmesi için önemli bir faktör olduğu söylenebilir.

**Engin, Tarhan ve Kumarcıbaşı (2013)** tarafından yapılan araştırmada; çimento endüstrisinde sürdürülebilir üretim incelenmiştir. İlgili araştırma kapsamında, katkılı ve sanayi yan

ürünü mineral bileşenli çimento kullanımına önem verilmesinin klinker kullanımını azaltacağı ifade edilmiştir.

**Papapari (2015)** tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmada; çimento üretiminde alternatif yakıt kullanımının çimentonun mikroyapısına ve dayanıklılığına olan etkisi incelenmiştir. İlgili araştırmada; Çimento üretiminde alternatif yakıt kullanımı, hidratlanmış çimento örneklerinin basınca dayanıklılık değerlerini etkilediği saptanmıştır.

**Pehlivan, Ateş ve Parlak (2015)** tarafından yapılan araştırmada; çimento endüstrisinde alternatif yakıt olarak kullanılan belediye çamuru ve fındık kabuğu karışımlarının kuruma kinetiği incelenmiştir. Bu kapsamda ilgili araştırmada, çimento endüstrisinde farklı oranlarda karıştırılan arıtma çamuru ve fındık kabuğu karışımlarının üst ısı değerleri 3445 ile 4900 kcal/kg arasında değiştiği saptanmıştır.

**Rahhal (2015)** tarafından yapılan başka bir araştırmada; çimento klinkeri oluşumunda kil minerallerinin etkisi araştırılmıştır. Farklı kil mineralleri içeren ham maddeler kullanılarak çimento klinkeri üretilmiştir. Sonuçlar, kil mineralinin mineralojik bileşim, kristal yapısı ve fiziksel özellikler üzerinde belirleyici bir faktör olduğunu göstermiştir. Özellikle, montmorillonit gibi kil minerallerinin yüksek sodyum içeriği nedeniyle alit ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) oluşumunu olumsuz etkileyebileceği ve çimento kalitesini düşürebileceği bulunmuştur.

**Ergüçlü (2016)** tarafından yapılan araştırmada; alternatif yakıt kullanılarak üretilen çimentodan mamul betonarme su yapılarında eser element özütlenme karakteristikleri incelenmiştir. Çalışmada sonuç olarak; EPA Metot 1315 kullanılarak hazırlanan 7 Set beton numunesi için 63 gün örnekleme süresiyle özütlenen eser element ve makro element konsantrasyonları, 500 m<sup>3</sup> hacimli betonarme su deposu için hesaplanan derişimlerle karşılaştırıldığında, belirtilen referans dokümanlarda içme suyu için belirtilen limit değerlerin altında kaldığı tespit edilmiştir. Kullanılan su haznelerinin hacmi ve dolayısıyla suyun temas ettiği yüzey alanının artması durumunda, özütlenen eser ve makro element miktarının azalacağı ve konsantrasyon değerlerinin düşeceği ifade edilmiştir. İlgili çalışmada deneyler sırasında kullanılan çimento ve beton numuneleri, alternatif yakıt kullanan bir tesisin ısı güç ikame oranının 5-6 katı olan bir ortalama değere sahip olan çimento sektöründen temin edilmiştir. Yapılan analizler ve elde edilen sonuçlar, alternatif yakıt kullanımının, bu tür yakıtları kullanan fabrikalarda üretilen çimentodan mamul betonla inşa edilen su depoları üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığı saptanmıştır.

**Öztürk (2016)** tarafından yapılan araştırmada; çimento sektöründe alternatif hammadde ve alternatif yakıt kullanımının çevresel yararları değerlendirilmiştir. İlgili araştırmada sonuç olarak; alternatif malzemelerin çimento üretim sürecine, çevreye ve nihai ürünün teknik kalitesine olumsuz bir etkisi olmadığı saptanmıştır.

**Ordu ve Öztürk (2017)** tarafından yapılan bir araştırmada ise çimento fabrikalarında alternatif hammadde ve yakıt kullanımı incelenmiştir. Araştırmada sonuç olarak; Çimento fabrikasında, demir cürufu, uçucu kül, döküm kumu ve fosfojips gibi alternatif hammadde

kullanılarak, kalite parametrelerine uygun bir şekilde geri kazanım sağladığı, alternatif hammadde kullanımı, tesis için toplamda 7.031.998 TL kazanç sağladığı saptanmıştır. Bunun yanında; alternatif yakıt olarak arıtma çamurunun kullanılması tesisin maliyet olarak kazancının 200.514.450 TL olduğu saptanmıştır.

**Kaplan (2018)** tarafından yapılan çalışmada, çimento teknolojisinde sürfaktanların kullanımının sürdürülebilir çimento üretimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırma kapsamında, farklı karmaoksit içeriğine sahip dört farklı klinker ile uçucu kül ve çimento öğütme kolaylaştırıcılarının farklı oranlarda kullanıldığı çimentolar laboratuvar ortamında üretilmiştir. İlk aşamada Taguchi L16 serisi kullanılarak farklı katkılarla 20 adet çimento üretilmiştir. Uçucu kül, Seyitömer Termik Santrali'nden temin edilerek klinker yerine farklı oranlarda (%5, 15, 25 ve 35) kullanılmıştır. Öğütme işlemi sırasında ise öğütme kolaylaştırıcı ve mukavemet arttırıcı kimyasal katkıları farklı dozajlarda kullanılmıştır. Üretilen çimentolar, klinker, alçıtaşı ve uçucu külün birlikte öğütülmesiyle elde edilmiştir. Bu aşamada yapılan optimizasyon çalışmasıyla özellikleri iyileştirilmiş 7 adet çimento seçilmiştir. İkinci aşamada, optimizasyon sonucunda elde edilen çimentoların dayanıklılığı üzerine deneyler yapılmıştır. Çimento harçları üzerinde sülfat, asit etkisi, karbonatlaşma, deniz suyu etkisi, yüksek sıcaklık etkisi ve alkali silis reaksiyonu gibi deneyler gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise sodyum sülfat, magnezyum sülfat, sülfürik asit ve deniz suyu etkilerine maruz kalan çimento pastaları üzerinde SEM/EDS analizleri yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, çimentolardaki C3A içeriğinin azalması ve C3S içeriğinin artmasıyla öğütülebilirliğin önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Uçucu kül kullanımının, öğütme performansı açısından önemli bir parametre olan C3S/C3A oranına katkı sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, uçucu kül miktarının artmasıyla çimentoların Blaine incelik değerlerinin arttığı ve ortalama tane boyutlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Uçucu kül katkılı çimentolarda, C3S içeriği yüksek klinker kullanımının hem öğütülebilirlik hem de dayanım açısından daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Çalışma ayrıca, uçucu kül katkısının çimentoların asit ve sülfat etkisiyle oluşan genleşmeleri azalttığını ve çimento pastalarında etrenjit varlığına yol açtığını göstermiştir. Deniz suyu etkisine maruz kalan çimento pastalarında da etrenjit varlığı tespit edilmiştir. Sürdürülebilirlik, doğal kaynakların korunması ve çimento dayanıklılığı gibi özellikler için çimento üretiminde uçucu kül ve öğütme kolaylaştırıcıların birlikte kullanılmasının büyük avantajlar sağladığı sonucuna varılmıştır. Çalışmanın test sonuçlarına göre, kompoze çimento üretiminde uçucu kül kullanımının %15-25 arasında ideal bir oran olduğu belirlenmiştir.

**Dehghanian ve İnan (2020)** tarafından yapılan çalışmada, kumlu kil ve çimentonun karışım oranlarının dayanım özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, içsel sürtünme açısının çimento oranına bağlı olarak belirli bir yüzdeye kadar arttığı, ancak daha sonra düştüğü tespit edilmiştir. Bu durum, çimento oranının belirli bir noktadan sonra dayanım özelliklerini olumsuz yönde etkilemeye başladığını göstermiştir.

**Şanlı ve Ünlü (2020)** tarafından gerçekleştirilen araştırmada, çimento üretiminde kullanılan ikincil yakıtların çimentonun mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre, %10 atık lastik ve %5 atık yağın ikincil yakıt olarak kullanılmasının çimentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerinde önemli değişikliklere neden olmadığı ve çevre üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Bu bulgular, atık yakıtların çimento üretiminde kullanılmasıyla hem ekonomik hem de çevresel açıdan faydalar sağlanabileceğini göstermektedir. Araştırma, ikincil yakıt kullanımının çimento endüstrisinde sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada potansiyel bir çözüm olduğunu vurgulamaktadır.

**Öztürk (2021)** tarafından yapılan çimento üretiminde alternatif yakıt kullanımının baca emisyonları üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada, bir döner fırında atık kullanımının toz (partikül madde), SOX (kükürt dioksit), TOK (toplam organik karbon), HF (hidrojen florür) ve HCl (hidroklorik asit) emisyonları üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı, ancak NOX (azot oksitleri) emisyonlarında ısı yer değiştirme yüzdesinden bağımsız olarak azalma eğilimi olduğu tespit edilmiştir. Farklı tipteki atıkların ve farklı noktalardan beslenmesinin NOx (Azot Oksit) emisyonlarını %50 oranında azaltılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, daha düşük emisyon faktörüne sahip atıkların alternatif yakıt olarak kullanılmasıyla CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, %3,47 oranında CO<sub>2</sub> emisyon azaltımı sağlanmıştır.

**Bilen ve Pala (2021)** tarafından gerçekleştirilen araştırmada, farklı tip ve oranlarda kalker tozu kullanılan çimento hamurlarında süper akışkanlaştırıcı dozajının kıvama ve priz sürelerine etkisi incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, süperakışkanlaştırıcı dozajı ve kullanılan kalker tozunun tipi, çimento hamurlarının kıvamı ve priz süreleri üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Kıvam için gerekli su miktarı ve priz süreleri, süper akışkanlaştırıcı dozajının artmasıyla birlikte değişiklik göstermiştir. Ayrıca, farklı kalker tozlarının kullanılması da kıvam ve priz sürelerini etkilemiştir. Bu bulgular, çimento hamurlarının özelliklerini kontrol etmek ve istenen kıvam ve priz sürelerini elde etmek için süper akışkanlaştırıcı dozajının dikkatli bir şekilde ayarlanması gerektiğini göstermektedir. Araştırma, çimento üretiminde kalker tozu ve süper akışkanlaştırıcı kullanımının optimize edilerek daha iyi performans elde edilmesi açısından önemli bir bilgi sağlamaktadır.

**Eren (2022)** tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kalsiyum alüminat çimentolu harçların reolojik davranışları ve uzun dönemli dayanım-dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Araştırma, kalsiyum alüminat çimentosunun hidratasyon sürecindeki dönüşüm reaksiyonlarından kaynaklanan sorunlara çözüm sunmayı ve uzun dönemde dayanım gelişimini istikrarlı hale getirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, mikro silis, anhidrit alçı ve portland çimentosu gibi katkı maddeleri eklenerek farklı harç karışımları hazırlanmıştır. Çalışmada, hazırlanan harç karışımlarının yayılma, kıvam, priz süresi ve reolojik davranışları incelenmiştir. Ayrıca, katkısız ve katkılı harç numuneleri, farklı kür etkileri altında (sabit 20±5°C ve ilk 21 gün 50±1°C'de ısıtıldıktan sonra 20±5°C'de) 400 güne kadar olan eğilme ve basınç dayanımı gelişimleri açısından takip edilmiştir. Numunelerin hidratasyon ürünlerinin kristal yapısı, morfolojisi ve boşluk yapısı ise mikroyapısal

analizler (XRD, DTA-TGA, SEM-EDS, civa porozimetre) ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, uygun katkı tiplerinin belirlenen oranlarda kullanılması durumunda, kalsiyum alüminat çimentolu harçların taze hal özelliklerinin, belirli kullanım alanlarına uygun şekilde geliştiği gözlenmiştir. Katkı maddelerinin uygun oranlarda kullanılmasıyla, kalsiyum alüminat çimentosunun hidratasyon sürecinde kararlı ürünler elde etmek mümkün olmuştur. Ayrıca, elde edilen harçların zamana bağlı olarak mukavemet kaybına uğramadan uzun dönemde dayanım gelişimi gösterdiği tespit edilmiştir.

**Kaya (2022)** tarafından yürütülen çalışma, farklı tip klinker öğütme kolaylaştırıcı katkıların çimentolu sistemlerin özellikleri üzerindeki etkisini incelemektedir. Araştırma, amin ve glikol esaslı öğütme kolaylaştırıcı katkıların (ÖKK) farklı tipleri ve kullanım oranlarının, klinker öğütme evresinde enerji verimliliği, çimento partikül boyut dağılımı, taze hal ve sertleşmiş hal özelliklerine olan etkilerini araştırmaktadır. Ayrıca, çalışmanın bir diğer amacı, yaygın olarak kullanılan trietanolaminin esterifikasyon metodu ile modifiye edilerek öğütme verimliliğini ve çimentolu sistemlerdeki performansını artırmaktır. Çalışma kapsamında, toplamda 7 farklı öğütme kolaylaştırıcı katkı kullanılmıştır, bunlardan ikisi trietanolaminin modifiye edilmiş hali olup diğerleri ise amin ve glikol esaslı öğütme kolaylaştırıcı katkı tipleridir. Öğütme kolaylaştırıcı katkılar klinker ve alçı taşının toplam ağırlığının farklı oranlarda (%0.025, %0.05, %0.075 ve %0.1) kullanılarak CEM I 42.5R tipi çimento numuneleri üretilmiştir. Öğütme süresi ve tüketilen enerji miktarı, Blaine incelik değeri hedefi olan  $4100 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g'ye}$  ulaşmak için ölçülmüştür. Harç karışımlarında Marsh hunisi akış süresi, priz süresi, reolojik parametreler, su azaltıcı katkı gereksinimi ve basınç dayanımları gibi özellikler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, öğütme verimliliği açısından triizopropanolaminin diğer öğütme kolaylaştırıcı katkılara göre daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Öğütme kolaylaştırıcı katkı kullanım oranının artmasıyla reolojik parametrelerin olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Öğütme Kolaylaştırıcı katkı ilavesinin priz süresini azalttığı, kıvam koruma performansını ve 28 günlük basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. Modifiye trietanolamin-2 katkısının ise tüm özellikler açısından en iyi performansı sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, düşük oranda (%0.025) öğütme kolaylaştırıcı katkı kullanımının öğütme verimliliği açısından daha düşük performans göstermesine rağmen çimentolu sistemlerin özellikleri açısından daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır. Bu çalışma, farklı tip ve oranlarda klinker öğütme kolaylaştırıcı katkıların çimento özellikleri üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Öğütme kolaylaştırıcı katkı kullanımının, çimentolu sistemlerin performansını artırma potansiyeline sahip olduğu ve özellikle modifiye trietanolamin-2 katkısının önemli bir performans sağladığı sonucuna varılmıştır.

**Borizan (2023)** tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül ve silis dumanı katkılı beton yol kaplamalarının fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Araştırma kapsamında farklı beton karışımları kullanılmış ve bu karışımların çökme miktarı, su emme oranı, boşluk oranı, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı gibi özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışmada, kontrol betonu

(%100 çimento) yanında ST-1 (%10 uçucu kül + %90 çimento), ST-2 (%20 uçucu kül + %80 çimento), ST-3 (%5 uçucu kül + %5 silis dumanı + %90 çimento) ve ST-4 (%15 uçucu kül + %5 silis dumanı + %80 çimento) olarak adlandırılan beton karışımları kullanılmıştır. Taze betonların işlenebilirliği, çökme testi ile değerlendirilmiştir. Taze betonlar, kalıplara doldurulmuş ve 24 saat boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Ardından, betonlar kalıptan çıkarılarak 28 gün süresince kür havuzunda bekletilmiştir. Sertleşmiş betonların su emme oranı, boşluk oranı, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, silis dumanı ve uçucu külün betonun basınç dayanımını ve yarmada çekme dayanımını artırdığı, ancak işlenebilirliği azalttığı ve çökme miktarını düşürdüğü gözlenmiştir. ST-4 beton karışımında en yüksek dayanım değerlerine ulaşılmış ve silis dumanının, dayanımı uçucu kül ve çimentoya göre daha da artırdığı belirlenmiştir. Bu çalışma, uçucu kül ve silis dumanı katkılı beton karışımlarının fiziksel ve mekanik özelliklerini inceleyerek, bu katkıların betonun dayanımını artırdığını ve özelliklerini iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Özellikle ST-4 karışımında en iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür, bu da silis dumanının dayanımı daha da artırdığını göstermektedir.

**Türkoğlu (2023)** tarafından yapılan araştırmada, farklı C<sub>3</sub>S içeriğine sahip klinkerlerin hibrit alkalilerle aktive edilmiş çimento özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araştırmada, farklı YFC/Klinker oranları (0/30 ve 90/10) ve %10 ile %20 arasında değişen tek parça alkali aktifleştirici ilavesiyle toplamda on iki adet tek bileşenli alkali ile aktifleştirilmiş hibrit klinker kompozitleri hazırlanmıştır. Ayrıca, üç farklı çimento klinker tipi ve üç farklı kür şartı (etüv kürü, su kürü ve buhar kürü) uygulanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, yüksek fırın cürufu/klinker oranı 90/10 olan ve %20 metasilikat ile aktive edilen su ile kürlenmiş karışımın yaklaşık 65 MPa basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yüksek fırın cürufu/klinker oranı 90/10 olan ve %10 metasilikat ile aktive edilen karışımların buhar ve etüv küründe en iyi yüksek sıcaklık direncini sergilediği tespit edilmiştir. Buhar kürlenmiş aynı karışımların ayrıca en iyi D-Ç direncine sahip olduğu görülmüştür. Bu araştırma, farklı C<sub>3</sub>S içeriğine sahip klinkerlerin hibrit alkalilerle aktive edilmiş çimento özelliklerine etkisini değerlendirerek, optimum kompozisyonların belirlenebileceğini ortaya koymuştur. Özellikle yüksek fırın cürufu/klinker oranı 90/10 olan ve uygun miktarda metasilikat ilavesiyle aktive edilen karışımların yüksek basınç dayanımı, yüksek sıcaklık direnci ve D-Ç direnci gibi önemli özelliklere sahip olduğu bulunmuştur.



### 3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, alternatif yakıtların klinker yapısına ve kalitesine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, klinker üzerine etkiyi araştırmak için kalker, kil, pirit külü, fosil yakıtlar (Petrokok, Linyit) ve alternatif yakıtlar (Endüstriyel plastik atık, Ömrünü tamamlamış lastik) gibi hammadde ve yakıtlar kullanılmıştır. Materyal kapsamında malzeme özellikleri anlatılmıştır.

Kullanılan materyaller ve hammadde temin yerleri Çizelge 3.1.' de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimento imalatı için kullanılan materyaller ve bölgeler

|                     |                                                                     |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Kalker              | Çanakkale Bozalan Mevki Kalker                                      |
| Kil                 | Çanakkale Taştepe Mevki Kili                                        |
| Pirit Külü          | Bandırma Eti Maden                                                  |
| Fosil yakıtlar      | Yurt Dışı                                                           |
| Alternatif Yakıtlar | İSTAÇ Endüstriyel Plastik Atıkları (İstanbul Büyükşehir Belediyesi) |
| Atık Lastik         | Yurt Dışı                                                           |

#### 3.1. Çanakkale Bozalan Mevkii Kalkeri

Çanakkale Bozalan Mevki Kalker, Türkiye'nin Çanakkale ilinde bulunan bir kalker madeni bölgesidir. Bu mevki, kalker kaynaklarının çıkarıldığı ve işlendiği bir alandır. Kalker, inşaat malzemeleri, yol yapımı, beton üretimi, çimento üretimi ve diğer endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir doğal taş türüdür. Çanakkale Bozalan Mevki Kalkeri, bölgenin ekonomisine katkı sağlayan ve inşaat sektörü için önemli bir kaynak olarak hizmet vermektedir.

Akçansa Çanakkale Fabrikası için hammadde ocakları, Çanakkale'nin güneybatısında, Biga yarımadasının batısında yer alan Taştepe ve Geyikli köyleri arasındaki dağlık alanda bulunmaktadır. Konu alanında alttan üste üç tipik litolojik-jeolojik birim yer almaktadır. Bu birimler;

A. Permo-Karbonifer (yaklaşık 300-250 milyon yıl) metaklastik Geyikli Birimi: İnce tabakalı kilttaş, silttaş, şeyl, kalker ve yeşil şist değişimlerinden oluşur.

B. Permien (yaklaşık 250 milyon yıl) Karbonat Birimi: Kalkerden oluşur.

C. Geç Permien-Erken Triyas (yaklaşık 230-220 milyon yıl) Flysch Birimi: İnce tabakalı kilttaş, silttaş, kumtaş, şeyl, kalker şist ve yeşil şist değişimlerinden oluşur.

Bu birimler, dağ sırasının batı kısmında ve çimento fabrikası çevresinde Neojen-Kuaterner sedimanter kayalarla kaplıdır (Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3).



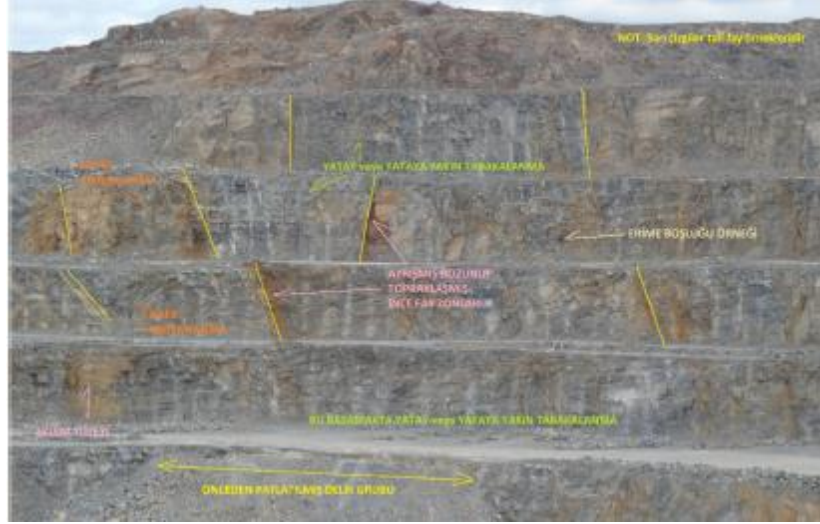


Şekil 3.1. Çalışma alanı kalker örnekleri

Akçansa tarafından çimento hammaddesi temini için işletilen ocakta Şekil 3.2’de görüldüğü gibi açık ve koyu renkli olarak tanımlanabilecek iki farklı renkte kireçtaşı türünün baskın olduğu gözlenmektedir. Kireçtaşı kayacının olağan olarak kalsit minerali içerdiği, ancak ocağın bazı yerlerinde damar halinde %5-%10 oranında dolomit minerali içeren kireçtaşları da yer almaktadır. Kaya kütle yapısını daha yakından Şekil 3.3’te görmek mümkündür. Görüldüğü üzere, kireçtaşı kaya kütlelerinde tabakalanma, fay, hafif (minör) kıvrım, yer yer erime boşluğu (karst), iki adet birbirlerine dik yönde gelişmiş dikeye yakın eğimde hâkim eklem takımları (yüzeyleri), yer yer de dördüncü ve düzensiz bir eklem takımı olduğu gözlenmektedir.



Şekil 3.2. Akçansa Çanakkale fabrikası kalker ocağı



Şekil 3.3. Kalker ocağı tabakalanma ve fay zonları

### 3.1.1. Çanakkale Taştepe Mevki Kili

Çanakkale Bozalan Mevki Kili Çanakkale'nin Bozalan bölgesinde bulunan bir kil türüdür. Killer, genellikle suyla karıştığında yapışkan bir kıvam kazanan, plastik ve kolay şekillendirilebilen bir malzemedir. Kil, doğada genellikle çamur volkanları, jeotermal kaynaklar veya nehir ve deniz tortuları gibi çeşitli jeolojik süreçler sonucu oluşmaktadır. Çanakkale Bozalan Mevki Kil, yerel jeolojik koşullar altında oluşmuş ve çevredeki jeolojik birimlerle ilişkilidir. Kilin mineralojik bileşimi, genellikle kil mineralleri olarak bilinen mika, kaolinit, illit ve montmorillonit gibi mineralleri içermektedir. Bu mineraller, kilin plastisite, su emme kapasitesi ve termal davranış gibi özelliklerini belirlemektedir. Kil, birçok endüstriyel alanda kullanılan önemli bir malzemedir. İnşaat sektöründe kil, seramik, tuğla, fayans ve çimento gibi malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Kil ayrıca seramik sanatında, seramik heykel yapımında ve seramik kaplamaların oluşturulmasında da kullanılmaktadır.

Çanakkale Bozalan Mevkiindeki kaya birimleri ve çevresi farklı litolojik özelliklere sahiptir. Bu özellikler şu şekilde sıralanabilir;

A. Geyikli Birimi: Bu birim, aynı zamanda Alt Şist Serisi olarak bilinir ve genellikle metamorfik renkli şistlerden oluşur. Kalın tabakalı ya da çok ince tabakalı, daha çok metamorfize olmuş kilitaşı, silttaşı, şeyl, dolomitik kalker, kalker şist ve yeşil şist dönüşümlerini içerir. Bu birimin tabakalama düzlemleri eğimlidir.

B. Karbonat Birimi: Karbonat Birimi, özellikle Yarigin seki bölgesindeki Kireçtaşı Ocağı'nda çıkarılmaktadır. Orta kalınlıkta tabakalı kalkerlerden oluşur ve renkleri ve yoğunlukları değişkenlik gösterir. Zaman zaman ince tabakalı kumtaşı, silttaşı ve kilitaşı ile tabakalanır.

C. Üst Kireçtaşı Birimi: Bu birim, ayrı bir birim olarak jeolojik haritada gösterilen Karadağ ve Koca Tırtıltepe'de bulunur. Üst Şist Serisi tarafından örtülen özelliği vardır.



D. Flysch Birimi: Üst Şist Serisi olarak adlandırılan bu birim, Koca Tırtiltepe'nin kuzey yamacında görülür ve kalın tabakalı ya da ince tabakalı yeşil şistler, kalker şist, silttaşı, kiltası, şeyl ve kalkerlerden oluşur (Şekil 3.4, Şekil 3.5).



Şekil 3.4. Akçansa Çanakkale Taştepe kil ocağı



Şekil 3.5. Akçansa Çanakkale Taştepe Kili

### 3.1.2. Bandırma Bor ve Asit Fabrikası Pirit Külü

Erüst (2015)'e göre; sülfürik asit üretimi için kullanılan pirit cevherlerinin kalsinasyonu esnasında atık olarak ortaya çıkan pirit külleri yüksek demir içeriğinin yanında ekonomik açıdan önemli metalleri ihtiva etmektedir. Bandırma Eti Maden İşletmeleri sülfürik asit tesisinde sülfürik asit üretimi sırasında açığa çıkan pirit küllerinin içerdiği demir dışı metallerin fiziksel ve hidrometalurjik yöntemlerle değerlendirilmesi kirliliği önlemek ve atıkların geri dönüşümünü sağlamak amacı ile uygun bir yöntem olarak görülmektedir. Sülfatlayıcı kavurma işlemi uygulanarak

yapılan ön zenginleştirme testleri farklı kavurma sıcaklığı ve asit miktarı ile gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ölçekli liç testlerinde ise asit derişimi, farklı çözücülerin performansı ve sıcaklık gibi parametrelerin bakır ve kobalt verimi üzerine etkisi incelenmiştir. Başlangıçtaki analizlere göre pirit külü 7406 ppm bakır ve 4026 ppm kobalt ihtiva etmektedir. Deneysel çalışmalar, sülfatlayıcı kavurma ile ön zenginleştirmenin bakır kazanımında etkisi olduğunu ve %79,12 oranında geri kazanıldığını göstermiştir. Kobalt kazanımı için direk liçin uygun olduğu ve kazanım oranının %65,40 olduğu tespit edilmiştir. Bu araştırma kapsamında pirit külü Bandırma Eti Maden tesisinden alınmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Pirit külü stok alanı

### 3.1.3. Fosil Yakıtlar

#### 3.1.3.1. Petrokok

Çimento sektöründe petrokok, yaygın bir şekilde kullanılmaktadır çünkü petrol rafineri tesislerinin yan ürünü olması ve kömüre göre daha uygun fiyatlı olması gibi sebepleri vardır. Petrokok, kömüre göre daha düşük uçucu madde oranına sahip olduğundan reaktivitesi daha düşüktür (Şekil 3.7). Bununla birlikte, petrokokun kükürt oranı %2 ila %7 arasında değişebilir ve bu, döner fırınlarda tıkanmalara neden olabilir (Pedersen, 2018).

Türkiye'de, %5,5 kükürtlü petrokok kullanımı ve ithalatı izin verilirken, daha yüksek kükürt oranına sahip petrokok kullanımı için Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü tarafından Resmî Gazete (2015/2) Genelgesi kapsamında deneme yakmaları yapılması zorunludur. Petrokok kullanım izinleri, deneme yakmalarında kullanılan petrokok yüzdesi ve kullanılan en yüksek kükürt oranı dikkate alınarak verilmektedir. Yüksek kükürtlü petrokok ithalatı ise Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ÇED, İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü İzin ve Lisans Daire Başkanlığı İthalat İhracat İzinleri Şube Müdürlüğü tarafından verilen tahsisat formları ile sınırlıdır. Petrokok kullanım izinleri, Çevre İzin ve Lisans Belgesi süresi olan 5 yıl boyunca geçerlidir. Tahsisat formları ise her yıl Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ilgili şube müdürlüğüne tahsisat kapatma dilekçesi

ile sunularak, bakanlığın ithal edilen petrokok miktarını takip etmesine olanak sağlar (Resmî Gazete, 2015).

Fosil yakıt analiz sonuçları Çizelge 3.2.' de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Fosil Yakıt Analizleri

| Yakıt Türleri     | Kuru Numunede Nem (%) | Kuru Numunede Kül (%) | Kuru Numunede Toplam Kükürt (%) | Kuru Numunede Uçucu Madde (%) | Kuru Numunede Alt Kalori (kcal/kg) |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| İthal Linyit      | 8.76                  | 15.87                 | 0.37                            | 26.02                         | 6602                               |
| Millileşmiş kömür | 11.63                 | 10.21                 | 0.33                            | 30.64                         | 6967                               |
| Petrokok          | 8.85                  | 1.89                  | 4.67                            | 14.34                         | 8298                               |
| Yerli kömür       | 13.55                 | 18.14                 | 0.76                            | 33.43                         | 6080                               |



Şekil 3.7. Petrokok döküm sahası

### 3.1.3.2. Linyit

Linyit, fosil yakıtlar arasında yaygın bir şekilde kullanılan bir kömür türüdür. Özellikle 1970'lerde fuel oil fiyatlarının artmasıyla birlikte birçok fabrika, kömür kullanımına yönelmiştir (Pedersen, 2018). Kömürün yanma koşullarında, tane boyutu ve uçucu madde içeriği büyük önem taşır. Genel olarak, kömürün uçucu madde içeriği %50'nin altında olması için 90 µm elek altı bakiyesi hedeflenir. Bu boyuttan daha küçük öğütülmesi, sıcaklık piklerinin ve aşırı NO<sub>x</sub> oluşumunun artmasına neden olabilir. Linyit, antrasit ve bitümlü kömürler gibi diğer yaygın kullanılan kömür tipleri arasında yer almaktadır. Kömürün yanması sonucunda oluşan kül, iyi bir yanma süreci için klinkerin yapısına bağlanmalıdır. Bu nedenle, farinin kimyasal bileşimi ayarlanması önemlidir (Pedersen, 2018). Linyit, düşük karbon içeriğine sahip olan bir organik tortul kaynaktır. Genellikle ormanlar, bataklıklar ve göller gibi sulak alanlarda yetişen bitkilerin yıllar boyunca birikmesi ve çürümesi sonucu oluşur. Linyit, diğer kömür türlerine göre daha genç bir yapıya sahip olup, daha düşük bir karbon içeriği bulunur. Yaklaşık olarak %25 ila %35 arasında karbon içerirken, geri kalan kısmı oksijen, hidrojen, azot ve kükürt gibi elementlerden oluşur. Düşük



karbon içeriği, linyitin daha düşük bir ısı değerine sahip olmasını ve diğer kömür türlerine göre daha hızlı yanmasını sağlar. Linyit genellikle kahverengi veya siyah renkte olup, toprakla kolayca karışabilen bir yapıya sahiptir. Diğer kömür türlerine kıyasla daha yumuşak bir sertliğe sahip olduğu için kolayca parçalanabilir. Bu nedenle, linyit genellikle daha küçük parçacıklara öğütülerek kullanılır. Linyit, enerji üretimi için yaygın bir şekilde kullanılan bir kömür türüdür. Ayrıca, linyitten elektrik üreten termik santraller, ısıtma amaçlı kazanlar ve endüstriyel süreçlerde kullanılan kömür bazı yakıtlar da üretilmektedir.

Kullanılan Linyit yurtdışından temin edilmektedir. Şekil 3.8.'de döküm sahasında verilmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 3.3' de verilmiştir.



Şekil 3.8. Linyit döküm sahası

### 3.1.4. Alternatif Yakıtlar

Kullanılan alternatif yakıt ve analiz sonuçları Çizelge 3.3.' de verilmiştir

Çizelge 3.3. Alternatif yakıt analizleri

| Yakıt Türü                     | Ortalama Isıl Değerler (Kcal/Kg) | Rutubet (%) | Kül (%) | Uçucu Madde (%) | Toplam Kükürt (%) | Klor (%)  | pH (%) |
|--------------------------------|----------------------------------|-------------|---------|-----------------|-------------------|-----------|--------|
| Arıtma Çamuru                  | 2500-4000                        | 5           | 55-60   | 45-90           | 0.5-0.7           | 0.03-0.08 | -      |
| Endüstriyel Plastik Atık       | 3500-4500                        | 8-25        | 10-15   | 78-80           | 0.1-0.4           | 0.5-0.65  | -      |
| Atık Yağ                       | 4500-7000                        | 10-12       | 0.2-0.4 | -               | 1.5               | 0.1       | 5-6    |
| Ömrünü Tamamlamış Lastik (ÖTL) | 6200                             | 1           | 6.5-7   | 75-80           | 1.2               | -         | -      |
| Geri Kazanılmış Katı Yakıt     | 4500                             | 8-10        | 10-12   | 75-85           | 0.25              | 0.5       | -      |
| Kontamine Atık                 | 3500                             | 10          | 9-12    | 10              | 0.5               | 0.6       | -      |

### ***Atık Lastikler***

Atık lastiklerin döner fırınlarda kullanımı, enerji geri kazanımı ve atık yönetimi açısından önemli bir stratejidir. Ancak bu uygulama, çimento fabrikalarının uygun teknik önlemler ve çevresel standartlara uyum sağlamasıyla birlikte gerçekleştirilmelidir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Kırpılmış atık lastik besleme yeri

### ***Avrupa'da Ömrünü Tamamlamış Atık Lastikler***

Ömrünü tamamlamış lastikler (ÖTL) ve bu lastiklerin kırılmasıyla elde edilen parça lastikler, çimento fabrikalarında konvansiyonel yakıtların yerine ikame edilebilen önemli alternatif yakıt kaynaklarıdır. Bu yakıtların tercih edilmesinin sebepleri arasında yaklaşık 31.4 kJ/kg kalorifik değere sahip olmaları ve düşük nem içeriğine sahip olmaları yer almaktadır (Uson ve ark., 2013). Lastikler genellikle vulkanize kauçuk, takviye dolgu maddeleri, fiberler ve düşük sıcaklıklarda esnekliği artırmak için eklenen yağlar gibi bileşenlerden oluşur (Şekil 3.10, Şekil 3.11).



Şekil 3.10. Atık yağ görüntüsü



Şekil 3.11. Kırpılmış atık lastik görüntüsü (~6100 kcal/kg)

Lastiklerin genel içerikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir (Asamany ve ark., 2015). Ömrünü tamamlamış kırpılmış atık lastik besleme hattı yatırımı teknik görseli Şekil 3.12' de verilmiştir.



Şekil 3.12. Kırpılmış atık lastik besleme hattı yatırımı teknik görseli



Çizelge 3.4. Lastiklerin kompozisyonları (Asamany ve ark., 2015).

| Komponent               | Binek Araç Lastiği           | Kamyon Lastiği                 |
|-------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Doğal Kauçuk            | 14                           | 27                             |
| Sentetik Kauçuk         | 27                           | 14                             |
| Karbon Siyahı           | 28                           | 28                             |
| Çelik                   | 14-15                        | 14-15                          |
| Kord Bezi, Dolgular vb. | 16-17                        | 16-17                          |
| Ortalama Ağırlık        | Sıfır Lastik Ağırlığı: 15 kg | Sıfır Lastik Ağırlığı: 54 kg   |
|                         | Ömrü tamamlanmış lastik 9 kg | Ömrü tamamlanmış lastik: 45 kg |

### **Endüstriyel Plastik Atık/ATY (Artık Türetilmiş Yakıt)**

#### **İSTAÇ Endüstriyel Plastik Atıkları**

İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin İSTAÇ A.Ş. tarafından işletilen Kemerburgaz Kompost ve Geri Kazanım Tesisi, evsel ve endüstriyel katı atıkların yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır. Tesiste, atıklar belirli işlemlerden geçirilerek hem bertaraf edilmekte hem de geri kazanıma yönlendirilmektedir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. İSTAÇ RDF atık tesisi

Tesiste, gelen katı atıklar eleklerle verilerek 80 mm altındaki organik malzemeler kompost ünitesine yönlendirilirken, 80 mm üzerinde kalan malzemeler ise geri kazanım ünitesine gönderilmektedir. Geri kazanım bantlarından geçen atıklar içerisinde bulunan geri dönüştürülebilir plastik, metal, kâğıt ve diğer malzemeler ayrıştırılıp preslenerek ekonomiye kazandırılmaktadır. Özellikle plastik poşetler, tekstil atıkları, çocuk bezleri, kâğıt atıkları, tahta parçaları ve plastik malzemeler, tesisin endüstriyel plastik atık üretim tesisinde değerlendirilmektedir. Bu atıklar, evsel

ve endüstriyel atıkların geri kazanılabilir malzemelerden ayrıştırıldıktan sonra kalan yanabilir malzemelerden elde edilen bir alternatif katı yakıt türüdür. Yüksek kalorifik değeri olan bu atıklar, çimento fabrikaları ve enerji üretim tesislerinde yakıt olarak kullanılmaktadır (Saltabaş ve ark., 2009).

Fabrika endüstriyel plastik atık stok alanı Şekil 3.14 ve hazırlama tesislerinde hazırlanacak yakıtın özellikleri Çizelge 3.5’ de sunulmuştur. Şekil 3.15’ de fabrikada kullanılan atık malzeme, Şekil 3.16’ da atık kırıcı ünitesi, Şekil 3.17’ de fabrika besleme iş akım şeması ve Şekil 3.18’ de stoklama ve besleme şeması verilmiştir.



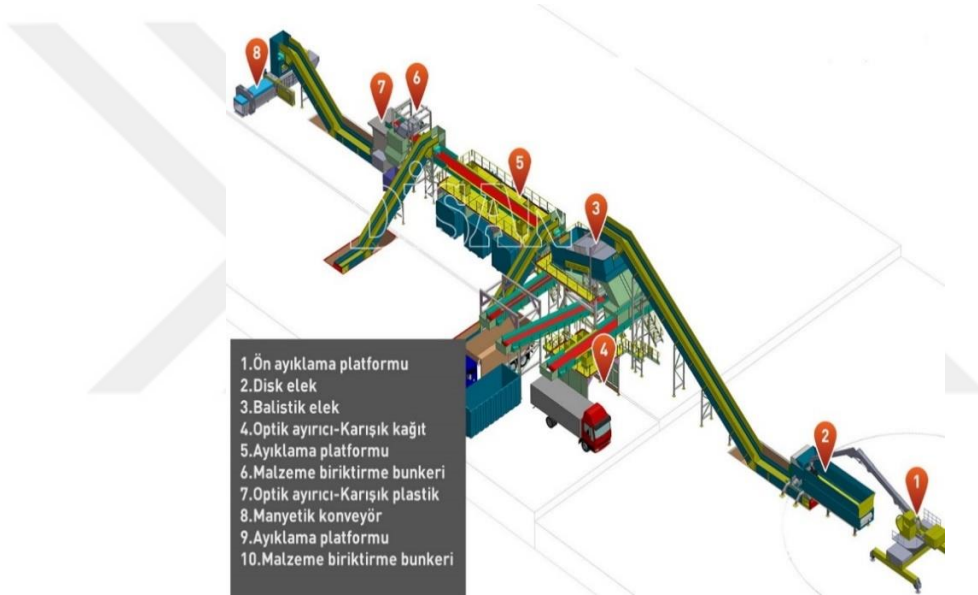
Şekil 3.14. Endüstriyel Plastik Atık/(ATY) stok alanı

Çizelge 3.5. Endüstriyel Plastik Atık (ATY) Hazırlama Tesislerinde Hazırlanacak Yakıtın Özellikleri (Yazıcı, 2019).

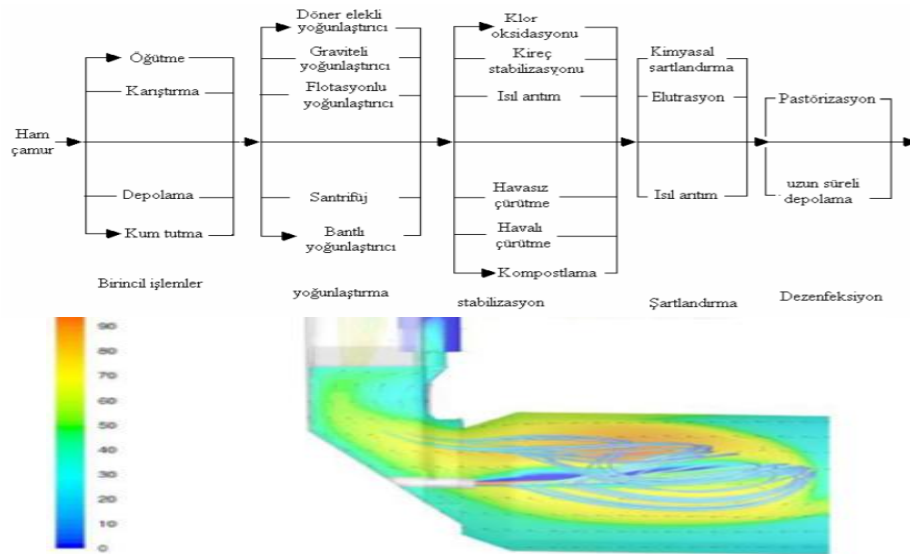
| Parametre                | Sınır Değer |
|--------------------------|-------------|
| Kalorifik Değer, Kcal/Kg | >2.500      |
| Tane Boyutu, mm          | <50         |
| Nem Oranı, %             | <35         |
| Klor İçeriği, %          | <1          |
| Hg, µg/MJ                | <330        |
| Ağır Metal Toplamı, ppm  | <2.500      |
| PCB, ppm                 | <5          |
| Solvent İçeriği, %       | <15         |



Şekil 3.15. Atıktan türetilmiş yakıt~3500 Kcal/kg

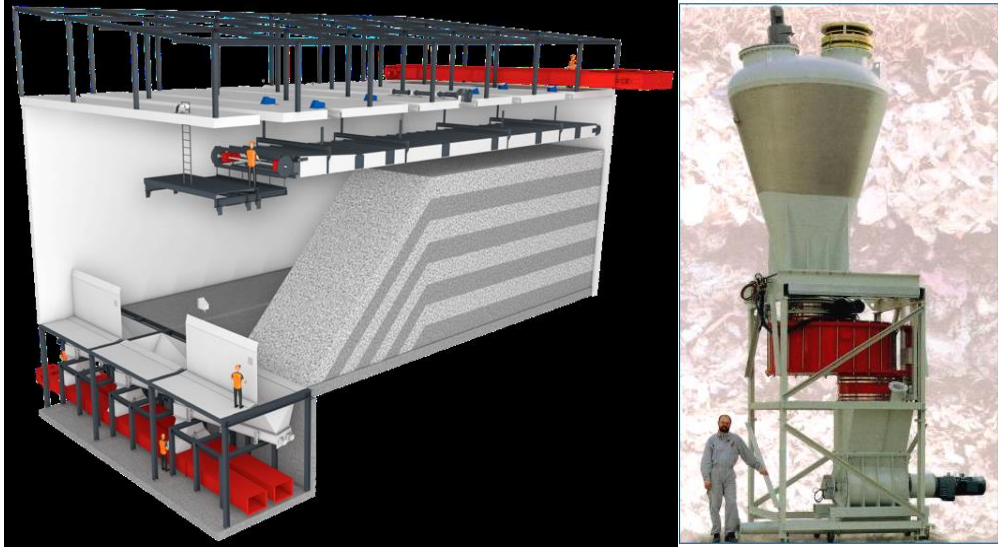


Şekil 3.16. Endüstriyel Plastik Atık kırıcı ünitesi



Şekil 3.17. Endüstriyel Plastik Atık Besleme (fırın giriş) İş Akım Şeması





Şekil 3.18. Endüstriyel Plastik Atık Stoklama ve Besleme

### ***İSKİ Kurutulmuş Arıtma Çamuru***

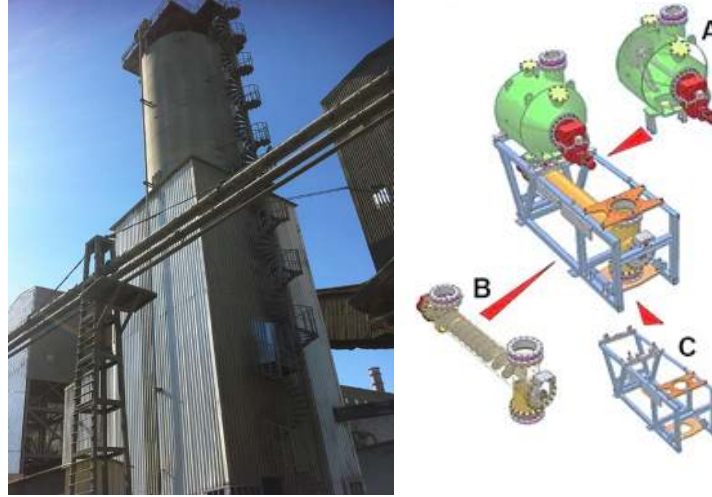
Sisteme sokulacak arıtma çamuru İSKİ den temin edilmektedir (Şekil 3.19,3.20). Arıtma çamuru stoklama ve dozajlama ekipmanları Şekil 3.21’ de verilmiştir.



Şekil 3.19. Kurutulmuş Arıtma Çamuru ~2500 kcal/kg



Şekil 3.20. Kurutulmuş Arıtma Çamuru Üretim Prosesin ~2500 kcal/kg



Şekil 3.21. Arıtma çamuru stoklama ve dozajlama ekipmanları

### 3.2. Metot

#### 3.2.1. Yapılan Analizler ve Ekipmanlar

Bu bölümde papılan analizler kimyasal, fiziksel, mineralojik, optik çalışmalar kapsamında ele alınmıştır. Malzeme ve ürün hazırlama deney ve ekipmanları ayrı ayrı incelenmiştir.

#### 3.2.2. 1. Laboratuvar Ekipmanları

Laboratuvarda kullanılan ekipmanlar ve kullanımı ile ilgili detaylar aşağıda alt başlıklar halinde sunulmuştur.

##### **Titreşimli Elek Cihazı: (32-45 Micron)**

Titreşimli Elek cihazı, malzemeleri farklı boyutlarda ayırmak veya sınıflandırmak için kullanılır. Elmas elek cihazı genellikle bir elek motoru, bir elek çerçevesi ve elek teli veya plakalarından oluşur. Elek motoru, elek çerçevesini titreterek malzemelerin elek üzerinde hareket etmesini sağlar. Elek teli veya plakaları, malzemelerin belirli boyutlara göre geçmesine veya geçmemesine izin verir. Elek cihazları, malzemelerin partikül boyutunu veya tane büyüklüğünü belirlemek için kullanılır. Malzemeler, elek çerçevesi üzerine yerleştirilen elek teli veya plakalarına yerleştirilir ve cihaz çalıştırılarak malzemelerin elek üzerinde hareket etmesi sağlanır. Bu süreçte daha küçük parçacıklar eleğin açıklıklarından geçerken daha büyük parçacıklar eleğin üzerinde kalır. Bu sayede malzemeler farklı boyutlara göre ayrıştırılır. Elek cihazları, birçok endüstriyel sektörde kullanılır. Örneğin, madencilik, inşaat, kimya, gıda, tarım ve geri dönüşüm endüstrilerinde sıklıkla kullanılır. Elek cihazları, kum, çakıl, toprak, mineraller, tahıl, un, toz ve benzeri malzemelerin sınıflandırılması, elemesi veya ayıklanması için kullanılabilir.

Elek analizi, bir zeminin tane boyutu dağılımını belirlemek için kullanılan bir deney yöntemidir. Bu yöntemde, zemin örneği belirli bir tane boyutuna göre sınıflandırılarak farklı

eleklerden geçirilir. Elekler arasındaki açıklıklar farklı tane boyutlarına karşılık gelir. Zemin örneği eleklerden geçirildikten sonra her bir elek üzerinde kalan malzeme ayrıştırılır ve tartılır. Böylece, zeminin içerdiği farklı tane boyutlarına göre yüzde dağılımı belirlenir. İnce kum boyutundaki ve daha iri danelerin dane çapı dağılımları bu analizle belirlenirken, aynı zamanda zemindeki kil ve siltin toplam miktarı da hesaplanabilir. Elek analizi, zeminlerin fiziksel özelliklerini anlamak, toprak sınıflandırması yapmak ve mühendislik tasarımlarında kullanılan zemin parametrelerini belirlemek için önemli bir araştırma yöntemidir (Dehghanian ve İnan, 2020) (Şekil 3.22). Deney aşamaları;

- 30.1 gr duyarlı bir terazide (m1 gr) numune tartılır. Titreşim cihazına elek konulur.
- Eğer set halinde eleme yapılacak ise büyük elek üste olmak kaydı ile büyükten küçüğe elekler üst üste konarak eleme işlemi yapılır.
- Tartılan numune elek üstüne boşaltılır.
- Titreşim hızı ayarlanır.
- Üst kapak çevrilerek kapatılır.
- Yan tutma ayaklarındaki vidalar sıkıştırılarak elek ve kapağı sıkıştırılır.
- Numuneye göre 10-15 dakikaya ayarlanan elek titreşim hareketi yaparak eleme işlemini gerçekleştirip zaman sonunda otomatik olarak durur.
- Sıkıştırma vidası açılır, elek kapağı çıkarılarak elek alınır.
- Bir kağıt üzerinde elle eleme yapılır bu sırada kağıt üzerine elenen numuneden dökülüyorsa 5 dk daha eleme işlemi yapılır.
- Bu işlem kağıda el ile eleme sonucu elenen numuneden gelmeyinceye kadar devam edilir.
- Eleme işleminin sonuçlandığına karar verilince kağıt üzerine elek yan çevrilerek içindeki kalıntı boşaltılır. Fırça ile fırçalanarak yapışan taneler alınır.
- Teraziye konarak tartılır ve değer kaydedilir ( $m^2$  gr).

#### **Hesaplama;**

$$\% \text{ Elek üstü kalıntı} = m^2 / m1 \times 100$$



Şekil 3.22. Titreşimli Elek cihazı

### **Etüv:**

Ünsal ve Şen (2008)'e göre; etüv, bir laboratuvar cihazıdır ve malzemelerin belirli bir sıcaklıkta kontrol altında kurutulması, ısıl işlem görmesi veya muhafaza edilmesi için kullanılır. Etüv, içerisindeki sıcaklığı sabit tutarak numunelere istenen termal koşulları sağlar (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Etüv görünümü

### **Kül Fırını:**

Kül fırını, organik maddelerin yakılması veya analiz amacıyla kalıntılarının incelenmesi için kullanılan bir laboratuvar cihazıdır. Genellikle kül analizi, kalorimetri, element analizi ve organik madde tayini gibi çalışmalarda kullanılır. Kül fırınları, yüksek sıcaklıkta yanma ve oksidasyon işlemlerini gerçekleştirmek için tasarlanmıştır. Bu cihazlar, yakma odası, ısıtma elemanları, sıcaklık kontrol sistemi ve gaz emisyonunu kontrol etmek için uygun bir egzoz sistemi gibi bileşenlerden oluşur.

Cihaz, Program 1 Eritiş-SiO<sub>2</sub> adı ile 1150 derece, program 2 Alkali Adı ile 1050 derece ve program 3 ise SO<sub>3</sub>-k.k adı ile 950 dereceye set edilerek çalıştırılır (Şekil 3.24.).



Şekil 3.24. Kül fırını

#### **Sarsma Aleti:**

Sarsma aleti, laboratuvar ortamında çeşitli uygulamalarda kullanılan bir cihazdır. Bir numuneyi sarsarak karıştırma veya çalkalama işlemlerini gerçekleştirmek için kullanılır. Genellikle kimya, biyoloji, biyokimya ve diğer bilimsel disiplinlerde yaygın olarak kullanılan bir ekipmandır. Sarsma aletleri, çeşitli boyutlarda ve tasarımlarda bulunabilir. Tipik olarak, bir taban veya platform üzerine yerleştirilmiş bir motor veya titreşim mekanizması bulunur. Bu mekanizma, tabanı sarsarak veya çalkalayarak numunenin karışmasını veya çözünmesini sağlar. Sarsma aletleri farklı hızlarda ve titreşim seviyelerinde çalışabilir. Bu, kullanıcının ihtiyaçlarına ve deney koşullarına bağlı olarak ayarlanabilir. Bazı sarsma aletleri programlanabilir özelliklere sahip olabilir, böylece belirli bir sarsma süresi ve hızı ayarlanabilir (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. Sarsma aleti

#### **Şatölye Çubukları:**

Kaya (2010)'ya göre; şatölye çubukları, çeşitli atölye ve işyerlerinde kullanılan uzun, silindirik metal çubuklardır. Genellikle çelik veya alüminyum gibi dayanıklı malzemelerden imal edilirler (Şekil 3.26).





Şekil 3.26. Şatölye çubukları

#### **Vikat Aleti:**

Bilen ve Pala (2021)'ya göre; vikat aleti, çimento ve benzeri yapı malzemelerinin işlenebilirlik özelliklerini ölçmek için kullanılan bir cihazdır. Bu özellikler genellikle malzemenin plastisite, akıcılık ve su tutma kabiliyeti gibi karakteristiklerini değerlendirmek için önemlidir. Vikat testi, yapı malzemelerinin üretim sürecinde ve kalite kontrolünde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27.Vikat aleti

#### **Blaine Cihazı:**

Çimentonun  $\text{cm}^2$ 'ye düşen miktarına blaine denir. Sonuçlar ise sonuç  $\text{cm}^2 / \text{g}$  cinsinden kaydedilmiştir. Kaya (2023)'ya göre; blaine cihazı, çimento ve benzeri inşaat malzemelerinin öğütme işlemi sonrasındaki yüzey alanını ölçmek için kullanılan bir cihazdır. Blaine cihazı, malzemenin toz formundaki yapılarının ince parçacıklarının yüzey alanını belirlemek için kullanılan bir hava akış

yöntemine dayanır. Bu ölçüm, çimento kalitesi ve öğütme verimliliği gibi faktörlerin değerlendirilmesinde önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir.

Malzemelerin özgül yüzey alanı, çeşitli yöntemlerle tespit edilebilir. Çimento endüstrisinde en yaygın kullanılan yöntem, "Hava Geçirgenlik metodu" olarak bilinen Blaine metodudur. Bu metod, sıkıştırılmış bir çimento yatağından geçen sabit hava miktarının geçtiği sürenin gözlenmesiyle çimentonun özgül yüzey alanının belirlenmesidir. Özgül yüzey arttıkça çimento inceliği artar. Cihazın kalibrasyonunda, özgül yüzeyi bilinen bir referans malzeme kullanılır. Deney sırasında kullanılacak çimento miktarı, numune yoğunluğu, cihaz kulp hacmi ve malzemenin yatak içerisinde oluşturduğu poroziteye bağlı olarak belirlenir. TS EN 196-6 standardına göre yapılan bu deneyde, belirli bir porozitedeki çimento numunesi cihaza yerleştirilir. Deney süresince geçen sabit havanın zamansal değerlendirmesi, cihaz sabiti (K), sıcaklık ve hava viskozitesi dikkate alınarak özgül yüzey değeri hesaplanır. Bu araştırma kapsamında dijital blaine cihazı kullanılmıştır. Blaine hesaplama çizelgesi Çizelge 3.6' da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Blaine Hesaplama Çizelgesi

| <b>d</b> | <b>m=Vxd(1-e)</b> | <b>d</b> | <b>m=Vxd(1-e)</b> |
|----------|-------------------|----------|-------------------|
| 2.60     | 79.43             | →        | →                 |
| 2.61     | 79.74             | 2.92     | 89.21             |
| 2.62     | 80.04             | 2.93     | 89.51             |
| 2.63     | 80.35             | 2.94     | 89.82             |
| 2.64     | 80.65             | 2.95     | 90.12             |
| 2.65     | 80.96             | 2.96     | 90.43             |
| 2.66     | 81.26             | 2.97     | 90.73             |
| 2.67     | 81.57             | 2.98     | 91.04             |
| 2.68     | 81.87             | 2.99     | 91.34             |
| 2.69     | 82.18             | 3.00     | 91.65             |
| 2.70     | 82.49             | 3.01     | 91.96             |
| 2.71     | 82.79             | 3.02     | 92.26             |
| 2.72     | 83.10             | 3.03     | 92.57             |
| 2.73     | 83.40             | 3.04     | 92.87             |
| 2.74     | 83.71             | 3.05     | 93.18             |
| 2.75     | 84.01             | 3.06     | 93.48             |
| 2.76     | 84.32             | 3.07     | 93.79             |
| 2.77     | 84.62             | 3.08     | 94.09             |
| 2.78     | 84.93             | 3.09     | 94.40             |
| 2.79     | 85.23             | 3.10     | 94.71             |
| 2.80     | 85.54             | 3.11     | 95.01             |
| 2.81     | 85.85             | 3.12     | 95.32             |
| 2.82     | 86.15             | 3.13     | 95.62             |
| 2.83     | 86.46             | 3.14     | 95.93             |
| 2.84     | 86.76             | 3.15     | 96.23             |
| 2.85     | 87.07             | 3.16     | 96.54             |
| 2.86     | 87.37             | 3.17     | 96.84             |

Çizelge 3.6'nın devamı

|      |       |      |       |
|------|-------|------|-------|
| 2.87 | 87.68 | 3.18 | 97.15 |
| 2.88 | 87.98 | 3.19 | 97.45 |
| 2.89 | 88.29 | 3.20 | 97.76 |
| 2.90 | 88.59 | 3.21 | 98.07 |
| 2.91 | 88.90 | 3.22 | 98.37 |

\*\*\* $m = V \cdot d \cdot (1 - e)$ ,  $Sw = \text{Blaine (cm}^2/\text{g)}$ ,  $m = \text{alınan tartım (g)}$ ,  $V = \text{Bulk hacmi (61.10 cm}^3)$ ,  $d = \text{Standart numunenin özgül ağırlığı (g/cm}^3)$ ,  $e = \text{Standart numunenin porozitesi (0.50)}$ ,  $t = 2-3 \text{ nolu uç arası geçiş zamanı (sn)}$ ,  $\sqrt{n} = \text{Havanın deney sıcaklığındaki vizkozitesi (poise)}$ ,  $K = \text{Cihazın sabit sayısı}$ ,  $T = \text{Deney sıcaklığı } ^\circ\text{C}$

Blain  $Sw = K \cdot \sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t} / d \cdot (1 - e) \cdot \sqrt{0.1} \cdot n$  formülasyonu olarak hesaplanmaktadır. Blaine cihazı Şekil 3.28' de verilmiştir.



Şekil 3.28. Blaine cihazı

### 3.2.1.2. Mekanik Testler

Türk Çimento (2021)'ya göre; çimentoların sınıflandırılması, Avrupa Standardı EN 197-1 (2012'e göre belirlenen tiplere ve kriterlere göre gerçekleştirilir. Bu standart çerçevesinde çimentoların piyasaya sunulması ve CE işareti taşınması gerekmektedir. Ürün performansı kontrolü ise farklı ülkelerde farklı standartlara göre yapılmaktadır.

Belgelendirme süreci kapsamında çimentolar detaylı bir şekilde incelenir ve teknik kalite parametreleri ile limit değerleri ilgili standartlara uygun olarak test edilmektedir. Fiziksel ve mekanik deneyler özelinde TS EN 197-1 (2012) standardı göz önünde bulundurulduğunda, aşağıdaki parametreler değerlendirilmektedir;

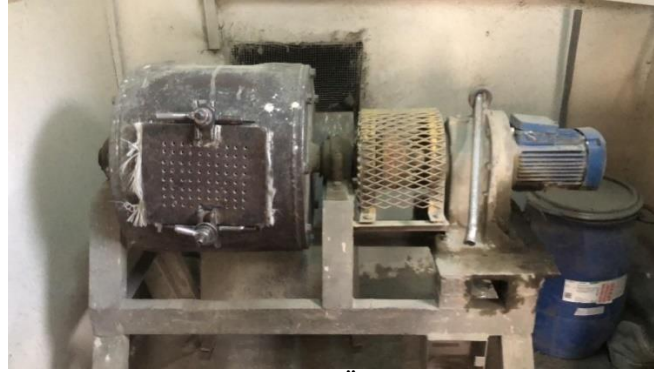
- 2 Günlük veya 7 Günlük Erken Basınç Dayanımı (N, R veya L): Çimentonun belirli bir süre içinde ne kadar dayanıklı olduğunu gösterir. Bu parametre, çimentonun hızlı kullanım gerektiren durumlarda erken aşamada ne kadar güçlü olduğunu belirlemek için önemlidir.

- 28 Günlük Standart Basınç Dayanımı: Çimentonun 28 günlük süre içinde ne kadar dayanıklı olduğunu gösterir. Bu dayanım değeri, yapı malzemesi olarak kullanılan çimentonun uzun vadeli mukavemetini belirlemek için önemlidir.

Mekanik testler için kullanılan ekipmanlar aşağıda verilmiştir.

#### Öğütücü Değirmen:

Öğütücü değirmenler, malzemeleri küçük parçalara veya toz haline getirmek için kullanılan cihazlardır. Öğütücü değirmenleri klinker öğünme sürelerini hesaplamak için de kullanılmaktadır. Genellikle endüstriyel ve laboratuvar ortamlarında kullanılmaktadır.. Çeşitli endüstrilerde, özellikle madencilik, kimya, gıda, ilaç ve malzeme işleme sektörlerinde yaygın olarak kullanılırlar. Öğütücü değirmenlerin temel amacı malzemeleri parçalayarak daha küçük boyutlara indirmektedir. Bu işlem, malzemelerin yüzey alanını artırır, reaksiyon hızlarını artırır, homojenlik sağlar ve bazı durumlarda malzemelerin fiziksel veya kimyasal özelliklerini değiştirir. Öğütücü değirmenlerin farklı tipleri bulunur ve kullanılan yöntem veya prensiplerine göre sınıflandırılırlar. İşleme prensipleri arasında çekiçli değirmenler, bilyalı değirmenler, rulo değirmenler, konik değirmenler ve kesme değirmenleri gibi farklı tipler yer almaktadır. Öğütücü değirmenler genellikle bir döner tambur veya silindir içerir. Malzeme, tamburun içine yerleştirilir ve tambur dönerek malzemeyi öğütür. Öğütme işlemi genellikle darbe kuvvetleri, sürtünme veya kesme kuvvetleriyle gerçekleşir. Bazı değirmenlerde öğütme medyası olarak bilye, çekiç veya kesici bıçaklar kullanılmaktadır (Şekil 3.29).



Şekil 3.29. Öğütücü değirmen

#### Dayanım Cihazı (Tek eksenli):

Uz ve Saltan (2012)'na göre; dayanım cihazı, malzemelerin mekanik dayanım özelliklerini ölçmek için kullanılan bir cihazdır. Çimento endüstrisinde, çimentonun dayanımının belirlenmesi ve kalite kontrolü için dayanım cihazları kullanılır. Dayanım cihazları genellikle çekme, basma veya bükme testleri gibi farklı test yöntemlerine sahip olabilir. Bu testlerde, çimento numuneleri belirli bir yük altında veya belirli bir yük hızında test edilir ve dayanım değerleri ölçülür. Çekme testi, bir

çimento numunesinin belirli bir yük altında çekme kuvvetine maruz bırakıldığı bir test yöntemidir. Bu test, çimentonun gerilme dayanımını ve elastik özelliklerini değerlendirmek için kullanılır.

- Cam Kaplar: 20°C yoğunluğu verecek 250 ml' lik mezür + 3 ml değişkenliktedir.
- Kalıplar: Max.3 küp aralığından fazla olmayan. Rockwell sertliği min.55, iç yüzeyleri düz değişkenlik + 00025 mm olan 50 mm' lik kalıplar kullanılır.
- Karıştırıcı: EN 196 cihazı kullanılmıştır.
- Sıkıştırıcı: 25\*13\*150 mm meşeden yüzü düz olan çubuk (Çubuk 15 dakika 200°C de parafinlenmiş olacak şekilde hazırlanmıştır.
- Mala: 100-150 mm lik düz kenarlı çelik bıçaklıdır.
- Basınç Dayanım Cihazı: EN 196 cihazının uygun modülü kullanılmıştır.
- Isı ve Nem: Karıştırıcı bölümü, kuru materyaller, kalıplar 20-27,5° C de tutulmalıdır. Karıştırılmış suyun ısısı ve nem dolabı, depodaki ısısı 23°C+ 1,7 °C olmalıdır. Laboratuvar nemi min.%50 ve rutubet dolabı nemi min%95'tir (Şekil 3.30.).



Şekil 3.30. Dayanım cihazı

### 3.2.1.3 .Kimyasal, Mineralojik Analiz Ekipmanları

#### XRF Cihazı:

X-ışını analizi, malzemenin kimyasal bileşimini ve kristal yapısını belirlemek için kullanılan bir tekniktir (Cullity ve Stock, 2001). Bu analiz, X-ışınlarının malzemeye uygulanması ve geri saçılma veya emilme özelliklerinin incelenmesi yoluyla gerçekleştirilir (Birkholz, 2006). X-ışını analizinde, öncelikle klinker örneği X-ışını kaynağına maruz bırakılır. Als-Nielsen ve McMorro (2011)'a göre; X-ışınları, malzemenin atomik yapısıyla etkileşime girer. Klinkerde bulunan elementler, X-ışınlarını farklı şekillerde saçar veya emer (Şekil 3.31).



Şekil 3.31. XRF cihazı

Bu tez çalışması, üretim yapılan ocaklardan alınan numuneler üzerinde  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Cl}$  ve kızdırma kaybı değerlerinin analiz edilmesi amaçlanmıştır (Öztürk, 2022). Numuneler, üretim sahasından alınan delik tozlarından seçilmiş ve laboratuvara teslim edilmiştir. İlk olarak, teslim edilen numunelerin kızdırma kaybı belirlenmektedir. Bu işlem için numune poşetinden 1 gram numune alınır ve  $975 \pm 25$  °C yüksek sıcaklıkta etüvde 15 dakika boyunca ısıtılır. Isıl işlem, sabit bir kütle elde edilene kadar devam eder ve sonucunda kızdırma kaybı değeri hesaplanır.

$$\text{Kızdırma Kaybı} = 1000 * ((\text{İlk tartım} - \text{Sabit Kütle Tartımı}) / \text{İlk Tartım})$$

Kızdırma kaybı sonucu, TS EN 196-2 (2014) standardına göre yüzde olarak ifade edilir. Bu değer XRF cihazına aktarılır. Numunenin rutubetini ölçmek için, TS EN 1097-5 standardına göre  $(110 \pm 5)$  °C'lik etüvde sabit bir kütle elde edilene kadar bekletilir. XRF analizi için numune öğütülerek 350-400 mikron seviyesine kadar inceltir. XRF yöntemi için, 0,6 gram öğütülmüş numune, 0,03 gram lityum iyodür ve 4,6 gram dilyum tetraborat platin kroze içerisine yerleştirilir. Kroze içindeki malzeme spatula yardımıyla homojen bir karışım elde edene kadar karıştırılır. Eritme cihazı için hazırlanan kroze bulunan homojen malzeme, tablet kalıba yerleştirilir. Eritme cihazı dört aşamalı bir çalışma programına sahiptir: ilk 10 dakika ısıtma, 5 dakika eritme, son 5 dakika soğutma ve boşaltma olmaktadır. Oluşturulan cam tabletler, X-ışını Flüoresans spektrometresinde analiz edilir (TS EN 196-2, 2014).

Korkmaz (2021)'a göre; Klinkerdeki kalker ve kilin çimento kalitesine olan etkisini değerlendirmek için X-ray cihazları kullanılabilir. X-ray difraksiyon/x ışınları difraktometresi (XRD) veya X ışınları floresans (XRF) gibi teknikler, klinkerde bulunan mineral bileşenlerin tanımlanması ve nicel analizi için kullanılan yaygın yöntemlerdir. XRF ise klinkerde bulunan

elementlerin kimyasal bileşimini belirlemek için kullanılan bir tekniktir. Klinker örneği X-ray ışınlarına maruz bırakılır ve bu ışınlar örnekteki elementler tarafından emilir ve yeniden yayılır. Yeniden yayılan X-ray ışınlarının enerjileri, klinkerdeki elementlerin tespit edilmesi ve miktarlarının hesaplanması için kullanılır. Kalker ve kil gibi bileşenlerin çimento kalitesine olan etkileri, XRF analizi ile elementel analizlerle belirlenebilir.

### **XRD Cihazı:**

XRD (X-ray Diffraction) cihazı, malzemelerin kristal yapılarını analiz etmek için kullanılan bir teknolojidir. Bu cihazlar, X-ışınları ile malzemelere ışınlar göndererek, malzemenin kristal yapılarında yayılmaya neden olan difraksiyon desenlerini kaydetme ve analiz etme yeteneğine sahiptir. Yılmaz, Bursa ve Tanverdi (2018)'na göre; XRD cihazları, çeşitli malzemelerin kristal yapılarını, faz bileşimlerini, kristal boyutlarını ve kristal oryantasyonlarını belirlemek için kullanılır. Kalker, kil ve diğer mineral bileşenlerin çimento klinkeri içindeki dağılımını ve miktarını belirlemek için de XRD cihazlarından faydalanılabilir. XRD cihazı, çalışma prensibi olarak X-ışınlarının malzemeden geçerken yayılması veya kırılması sonucu oluşan yayılma desenlerini algılar. Bu yayılma desenleri, malzemenin kristal yapısının özelliklerini yansıtır. XRD analizi, X-ışınları ile malzemeye çeşitli açılarda ışınlar gönderilerek yayılan ışınların intensitelerinin ölçülmesini içerir. Bu veriler, bir difraksiyon deseni oluşturarak malzemenin kristal yapısını ve bileşenlerini tanımlamak için kullanılmaktadır (Şekil 3.32).



Şekil 3.32. XRD cihazı

### **Diferansiyel Termal Analiz Cihazı (DTA):**

Özger (2019)'e göre; Diferansiyel Termal Analiz (DTA), malzemelerin termal davranışını incelemek için kullanılan bir analiz tekniğidir. DTA cihazı, numune ve referans numunesi arasındaki sıcaklık farkını ölçerek malzemenin termal özelliklerini belirlemektedir. Numune ve referans numunesi, aynı zamanda ısıtılan iki ayrı fırına yerleştirilir. İki fırın da aynı zamanda ısıtılır, ancak numune fırınındaki sıcaklık, referans numunesi fırınındaki sıcaklığa göre değişir. Numune ve referans numuneleri arasındaki sıcaklık farkı, cihaz tarafından sürekli olarak ölçülür. Numune



ısıtıldığında veya soğutulduğunda, malzemenin içindeki fiziksel veya kimyasal değişimler termal enerji değişikliklerine neden olur. Bu değişiklikler, numune ve referans numunesi arasındaki sıcaklık farkının değişmesine yol açar. DTA cihazı, numune ve referans sıcaklıkları arasındaki farkı ölçerek, bu termal değişiklikleri tespit eder.

Diferansiyel Termal Analiz (DTA), malzemelerin termal davranışlarını incelemek için kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu yöntemde, bir numune ve referans malzeme aynı anda ısıtılırken, numune ile referans malzeme arasındaki sıcaklık farkı ölçülür. Bu fark, numunedeki termal değişikliklerin tespit edilmesini sağlar.

DTA'nın çalışma prensibi şu şekildedir: Numune ve referans malzeme aynı ısıtma hızıyla ısıtılır. Numunedeki termal değişiklikler (örneğin, erime, kristalizasyon, faz dönüşümleri) sırasında numune sıcaklığındaki değişimler, referans malzeme ile karşılaştırılarak tespit edilir. Numune ve referans malzemeler aynı ortamda aynı koşullarda tutulduğu için çevresel etkiler minimize edilir.

DTA analizi sonuçları, numunenin termal davranışını belirlemek için kullanılır. Örneğin, bir malzemenin erime noktası, kristalizasyon sıcaklığı, faz dönüşümleri gibi termal özellikleri DTA analizi ile belirlenebilir. Ayrıca, malzemenin termal kararlılığı, termal bozunma sıcaklıkları ve termal ayrışma gibi özellikler de DTA ile incelenebilir.

DTA cihazları genellikle bir fırın, termoelektrik çiftler, termoelektrik amplifikatörler ve bir veri kaydedici veya bilgisayar içerir. Numune, önceden belirlenmiş bir sıcaklık programına göre ısıtılırken, DTA cihazı tarafından sıcaklık değişimleri kaydedilir.

Termal analizler Perkin Elmer Sapphire Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ile yapılmıştır (Şekil 3.33).



Şekil 3.33. Diferansiyel termal analiz cihazı (DTA)

#### **Termogravimetrik Analiz Cihazı (TGA):**

Obuz (2018)'e göre; termogravimetrik Analiz (TGA), malzemelerin ağırlık değişimlerini ve termal davranışlarını incelemek için kullanılan bir analiz tekniğidir. TGA cihazı, numunenin sıcaklığını kontrol ederken aynı zamanda numunenin ağırlık değişimini de ölçer. TGA'nın çalışma prensibi şu şekildedir: Numune, hassas bir tartı cihazında yerleştirilir ve cihaz, numunenin ağırlığını



sürekli olarak ölçer. Numune sıcaklığı yavaşça artırılır veya azaltılırken, numunenin termal davranışı nedeniyle ağırlık değişimi meydana gelir. Bu değişimler, TGA cihazı tarafından hassas bir şekilde kaydedilir.

TGA’da yakıt analizleri yapılır. Numune spatül ile kroze 0.5-1.5 gr arasında konulur. 105 °C de  $\% \pm 0.05$  hata ile bünye rutubeti tayini yapar. 950 °C de 7 dk. da kroze tartımlarını alır. Cihaz  $\% \pm 0.05$  hata ile kül tayini yapmak için 750 °C'ye yükselir.

TGA (Termogravimetrik Analiz), numunenin kütlesini, numunenin sıcaklığına veya zamana bağlı olarak ölçen bir analiz yöntemidir. Genellikle numune sabit bir sıcaklıkta ısıtılır veya sabit bir sıcaklıkta tutulur. TGA, kontrol edilebilen lineer olmayan sıcaklık programları da kullanabilir. Sıcaklık programının seçimi, istenen bilgilere dayalı olarak numune özelliklerine bağlıdır. Ayrıca TGA deneylerinde atmosferin, reaktif, inert veya oksitleyici olması önemli bir faktördür. Termogravimetrik Analiz (TGA) ile birlikte TGA eğrilerinin birinci türevi de kullanılabilir, bu türev değerler kütle değişimini gösterir. Bu eğriler DTG (Diferansiyel Termogravimetri) eğrileri olarak adlandırılır. TGA ölçümünün sonucunda kütle veya kütle yüzdesinin zamana veya sıcaklığa bağlı olarak grafiği TGA eğrileri şeklinde görüntülenebilir. Kütle değişimi, numunenin farklı yollarla malzeme kaybı veya çevresiyle reaksiyona girmesi sonucunda oluşur. Bu oluşum, TGA eğrilerinde adım şeklinde veya DTG eğrilerinde bir tepe noktası şeklinde gözlemlenebilir. TGA, malzemelerin termal davranışını, bozunma, ayrışma, buharlaşma, oksidasyon gibi termal olayları incelemek için kullanılan güçlü bir araştırma aracıdır. Numunenin termal kararlılığı, ayrışma sıcaklığı, termal bozunma mekanizmaları gibi bilgiler TGA analizi ile elde edilebilir. Bu yöntem, polimerler, plastikler, organik ve anorganik bileşikler, gıda maddeleri, ilaçlar ve diğer birçok malzeme üzerinde uygulanabilir (Dağlı, 2012). Termogravimetrik analiz cihazı (TGA) Akçansa Labratuvary tarafından yapılmıştır (Şekil 3.34).



Şekil 3.34. Termogravimetrik analiz cihazı (TGA)

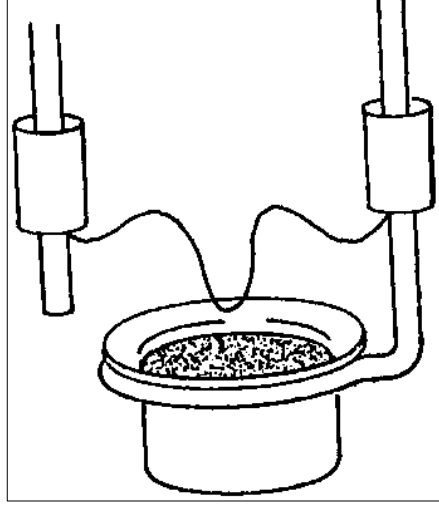
### **Kalori Tayini:**

Topçuoğlu (2016)'na göre; klinker kalori tayini, klinker adı verilen malzemenin içerdği enerji miktarının belirlenmesi sürecidir. Klinker, çimento üretiminde kullanılan önemli bir bileşendir ve çimento kalitesini etkileyen faktörlerden biridir. Klinker kalori tayini genellikle bomba kalorimetreleri kullanılarak gerçekleştirilir. Bomba kalorimetreleri, yakma reaksiyonlarından kaynaklanan ısıyı ölçerek bir maddenin kalori değerini belirler. Klinker örneği, bomba kalorimetre cihazına yerleştirilir ve tamamen yakılır. Yakma işlemi sırasında açığa çıkan ısı ölçülerek klinkerin kalori değeri hesaplanır (Şekil 3.35).



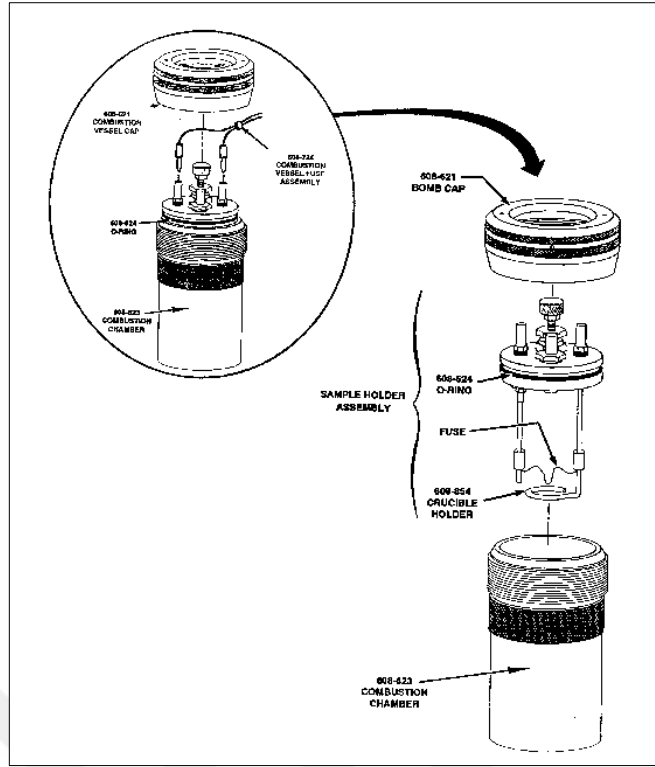
Şekil 3.35. Kalori tayini cihazı

- Bir adet kroze alınarak 0.0001 hassasiyetli terazide krozenin darası alınır.
- Kroze içine analizi yapılacak numuneden 1 spatül (yaklaşık 0,5 – 1,5 gr) numune konulur.
- Numune miktarı ekranda “Weight” yazan yere gelmesi için terazide tuşuna basılır tartım klavyede görülecektir. “NEXT” tuşuna basarak değer otomatik olarak hafızaya alınır.
- Cihaz verileri hafızasında tutar ve ikinci tartım için hazır duruma gelir.
- Tartım işlemi bittikten sonra numunenin ve bombanın hazırlanma işlemi vardır.
- Kroze, numune koyma ve bağlama bölümündeki (16) yerine konulur.
- Bir adet yakma teli alınarak aşağıdaki belirtilen şekilde (Şekil 3.36) gözüktüğü gibi tel iki ayağa bağlanır ve numunenin üst yüzeyine deyecek şekilde ayarlanır. (Numune gerekli hallerde tablet olarakta yapılabilir). Tellerin krozeye değmemesine dikkat edilmelidir.



Şekil 3.36. Yakma teli

- Numune bağlama işi yapıldıktan sonra bomba yakma odası altına bir miktar su konulur (4-5 ml kadar). Numune bağlandığı parça aşağıda şekilde görüldüğü gibi bomba yakma odası yerleştirilir ve üst kapak kapatılır (Şekil 3.37).
- Böylelikle bombamız analize hazır hale gelmiş olur.
- Kapak kapatıldıktan sonra gaz tahliye vidası sıkılmış olmalıdır.
- Bombanın üst kısmında kalan gaz doldurma yerine oksijen doldurma aparatı yerleştirilir.
- Gaz doldurma aparatı üzerindeki düğmeye bir defa basıldığında bomba içine gaz basılmaya başlanmış olacaktır. 29 kg/cm<sup>2</sup> basınca gelince otomatik olarak gaz verme işlemi kesilir.
- Ardından analiz ve yakma bölümünün içinde bulunan kova çıkartılarak hazırlanmış olan bomba kova içindeki bölüme yerleştirilir.
- Daha sonra içinde su dolu olan pipet altına, bomba bulunan kova konulur. Pipetin altında bulunan musluk açılarak (yarım tur) pipet içindeki suyun kova içine alınır.
- Su alma işlemi bitiminde musluk yarım tur çevrilerek kapatılır. Pipet içine tekrar su dolmaya başlar. Daha sonra içine su doldurduğumuz kova kalorimetre analiz ve yakma bölümüne konulur.



Şekil 3.37. Bomba yakma odası

- Artı (+) ve eksi (-) bağlantı kabloları elektrot kutuplarına bağlanır.
- Analiz ve yakma bölümünün kapağı kapatılarak klavye yardımı ile “START” tuşuna basılarak analize başlanır.
- Analizin ilk bölümünde su dengesi sağlanır, daha sonra yakma işlemi yapılarak analiz sonuçlanır. Analiz sonucu ekran üzerinde görünür.

#### **Bünye Rutubeti Tayini:**

Poole ve Sims (2016)’e göre; Bünye rutubeti analizi, klinker gibi yapı malzemelerinin su emme kapasitesini belirlemek için kullanılan bir test yöntemidir. Bu analiz, malzemenin porozite ve su geçirgenliği özelliklerini değerlendirmeye yardımcı olur. Deney aşamaları;

- Kaba rutubeti alınmış olan numune agat havanda öğütülür ve porselen kapsüllere konulur.
- Bu numuneden en az 10 gr numune porselen krozeyle tartılır. ( $m_1$ ). Kroze 105°C bir etüv veya fırında sabit tartıma gelene kadar bekletilir, desikatörde soğutulur ve tartılır. ( $m_2$ ).
- Bünye rutubeti aşağıdaki formüle göre hesaplanır. (Havada kuru kömürde uçucu madde miktarı bulunur)

$$\% \text{Bünye Rutubeti} = \frac{m_1 - m_2}{T} \times 100$$

Burada;

$m_1$  = Numune + kroze toplamı (gr)

$m_2$  = 1050C sabit tartıma gelen numune + kroze (gr)

$T$  = Deney numune kütlesi (gr)

#### **Kül Tayini:**

Kül tayini analizi, Protherm PLF 12017 marka kül fırınında gerçekleştirilmiştir. Analiz ASTM D3174-04 standardına göre yapılmıştır. İşlem adımları şu şekildedir:

- Numune, önceden nemden arındırılmış halde porselen krozede tartılır (Güzel, 2011).
- Tartılan numune, 750°C'de 2 saat boyunca kül fırınında bekletilir.
- Numune, ardından desikatörde soğutulur.
- Soğutulan numune tekrar tartılır ve kül miktarı hesaplanmaktadır.
- % Kül =  $[(A - B) / C] \times 100$

Burada:

A: Kroze ve içinde kalan kül kalıntısı (gr) ağırlığı,

B: Boş kroze ağırlığı (gr),

C: Başlangıç numune ağırlığı (gr).

Bu yöntem, numunenin kül içeriğini belirlemek için kullanılır. Kül, numunede yanma veya termal bozunma sonucunda geride kalan inorganik kalıntıları temsil eder. Kül miktarının tespiti, malzemenin yanma özellikleri, kalite kontrol süreçleri ve diğer uygulamalarda önemli bir parametre olabilir.

#### **Uçucu Madde Tayini:**

Düğenci ve Çelik (2016)'e göre; uçucu madde, yüksek sıcaklıkta yanabilen ve gaz hâline geçebilen maddelerdir. Klinker üretimi sırasında kullanılan hammadde karışımı yüksek sıcaklıkta fırınlanırken, içerisindeki uçucu maddeler buharlaşır ve gaz haline dönüşür. Bu uçucu maddelerin yanma sırasında serbest bıraktığı gazlar, çimento üretiminde belirli özelliklere sahip olması gereken birçok kimyasal reaksiyonu tetikler. Uçucu madde tayini, klinkerin içerdiği uçucu maddelerin yüzdesini belirlemek için yapılan bir analizdir. Bu tayin genellikle laboratuvar ortamında

gerçekleştirilir. Analiz sürecinde klinker numunesi yüksek sıcaklığa maruz bırakılır ve uçucu maddelerin buharlaşması sağlanır. Sonrasında numune tartılarak uçucu madde miktarı hesaplanır. Bu veriler, çimento üretimi ve kalite kontrol süreçlerinde önemli bir parametre olarak kullanılır.

$$\%UçucuMadde = \frac{m_1 - m_2}{T} \times 100$$

Burada;

$m_1$  = Yakılmamış numune + kroze toplamı (gr)

$m_2$  = 950°C'de 7 dakika bekletilmiş numune + kroze toplamı (gr)

T = Deney numune kütlesi (gr)

#### **Kükürt Analizi:**

Koç ve Şahin (2015)'e göre; Klinkerde kükürt analizi, klinker adı verilen çimento hammaddesinde bulunan kükürt miktarının tespit edilmesini sağlayan bir analiz yöntemidir. Kükürt, çimento üretim sürecinde kullanılan hammadde kaynaklarından veya yanma işleminden kaynaklanabilir ve çimento kalitesini etkileyebilir. Bu nedenle, kükürtün belirlenmesi ve kontrol edilmesi önemlidir. Klinkerde kükürt analizi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında gravimetrik yöntem, titrimetrik yöntem ve spektrofotometrik yöntem bulunmaktadır. Deney aşamaları;

- Hassasiyetli terazide tartılan 1.0 gr. numune (İnce toz haline gelmiş numune) platin krozeye eşka karışımı (3-5 katı kadar) birlikte konulur.
- Platin kroze içinde karıştırıldıktan sonra üzerine tekrar eşka karışımı örtülür.
- Krozenin kapağı kapatılarak 950-1000°C'lık fırında (Düşük ısıda) 2-3 saat civarında yakılır.
- Kroze sıcak sulu behere aktarılır. Asitli su katılarak çözülür. Sulfat haline geçmeyen sülfidler, yükseltgemek için nitrik asit (HNO<sub>3</sub>) damlatılır, karıştırılır ve kaynamaya bırakılır.
- Ardından beyaz banttı süzme işlemi uygulanır. (Çözünmeyen kalıntı, SiO<sub>2</sub>'ler uzaklaştırılır) Süzüntü içine karıştırılarak damla damla 10 cc %10'luk baryum klorür (BaCl<sub>2</sub>) konur ve kaynamaya bırakılır.
- Kum banyosunda çökme gözlenir. Mavi banttı süzme işlemi yapılır. Süzgeç kağıdı ve kalıntı sıcak su ile yıkanır.

- Darası alınmış ( $m_1$ ) porselen krozeye süzgeç kağıdı ve çökelti konur. 950-1000°C'de 1 saat fırında bekletilir. Sabit tartıma gelen kroze desikatörde soğutulur ve tartılır ( $m_2$ ).
- Toplam kükürt tayini aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$$\%S = 100 \times \frac{(m_1 - m_2) \times 0.137}{T}$$

Burada;

T = Numune miktarı       $\text{Ba}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{BaSO}_4$

$m_1$  = Boş kroze

$m_2$  = Dolu kroze

$$0.137 = \frac{S}{\text{BaSO}_4}$$

#### **Klor Analizi:**

Klor, çimento üretim sürecinde kullanılan hammadde kaynaklarından veya yanma işleminden kaynaklanabilmektedir (Yılmaz, 2005). Klor içeriğinin belirlenmesi, çimento kalitesinin kontrol edilmesi açısından önemlidir. Klinkerde klor analizi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında gravimetrik yöntem, titrimetrik yöntem ve potansiyometrik yöntem bulunmaktadır. Tayindeki titrasyon işlemi TS 689'daki Cl tayininde kullanılan çözeltilerle yapılır. Bombanın hazırlanması kalori tayinindeki gibidir.

#### ***Tabletin Hazırlanması***

- Kalori değerini bir adet telden 9 cm kesilerek tartılır.
- Tablet sıkıştırma makinasında 0.5-1 gr. arası kömürle tablet hazırlanır
- Tel + kömür ağırlığı tartılır

#### ***Kalorimetre Su Kabının Hazırlanması***

- Kalorimetrede kullanacağın saf suyu oda sıcaklığında bekletilir.
- Oda sıcaklığına gelen sudan 1800 cc alarak kalorimetre su kabı hazırlanır.

### *Bombanın Hazırlanması*

- Kalorimetre bombası içine, bombanın iç yüzeylerini bu çözelti ile yıkayarak 15 cc % 10'luk Amonyum Karbonat çözeltisinden koyulur.
- Hazırlanmış olan tablet yakma kapsülü içine yerleştirerek, telin uçları ateşleme çubuklarına bağlanır.
- Bombanın kapağı sıkıca kapatılır, önce yavaş bir şekilde oksijen basarak, bomba içindeki yabancı gazların atılması sağlanır ve tahliye sibobu kapatılır. 1 dakika 25-30 atmosfer oksijen basıncı altında bekleterek oksijen doldurulur.

### *Ateşleme*

- Hazırlanan bomba ve kalorimetre su kabı, kalorimetre içine yerleştirilir.
- Ateşleme telleri bağlanır ve kalorimetre kapağı kapatıldıktan sonra ateşleme yapılır.
- Ateşleme sonrası 10 dk. kadar beklenir.
- Bomba kalorimetreden çıkarılır, tahliye sibobu yavaşça açılarak (1 dk. içinde ortam basıncına inecek şekilde) içindeki gazın boşalması sağlanır.
- Bomba açılır. İçinde yanmamış kömür kalıntıları olup olmadığına bakılır. Eğer varsa deney iptal edilip tekrar baştan yapılır.
- Bomba parçalarının iç yüzeylerini saf suyla yıkayarak behere aktarılır. Bu sırada yıkama sularının dışarı dökülmemesine dikkat edilir.
- Behere 3 ml derişik  $\text{HNO}_3$  eklenir
- Çözeltinin rengi çok koyu değilse ve çok fazla kül yoksa süzmeden titrasyona başlanır.
- Eğer gerekiyorsa beyaz bant süzgeç kağıdı kullanılarak süzülür.

### *Titrasyon*

- 0.05 cc duyarlılıkta büret kullanarak behere 5 ml 0.05 N  $\text{AgNO}_3$  eklenir ve karıştırılır.
- 15 dk. bekledikten sonra 8-10 damla  $\text{FeNH}_4 (\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (Demir III Amonyum Sülfat) indikatörü damlatılır
- 0.05 N  $\text{NH}_4\text{SCN}$  çözeltisi ile titretme yapılır.
- Çözeltinin rengi süt beyazından kıvı kahveye döndüğünde sarfiyat kaydedilir. (V1)



### *Kör Deneme*

- Deneyde anlatılan tüm işlemleri aynı çözeltileri aynı miktarlarda kullanarak, numune olmadan yapılır.
- Titrasyonda sarfedilen çözelti miktarı kaydedilir. ( $V_2$ )

### Hesaplama;

- Kömür içindeki % Cl miktarı;

$$\% \text{ Cl} = 0.1773 (V_2 - V_1)/m$$

m :Numune tartımı, gr.

### **Kuvars-Kalsit Tayini:**

Korkmaz ve Hacıfazlıoğlu (2019)'na göre; klinkerde kuvars-kalsit tayini, klinker numunelerinde kuvars ( $\text{SiO}_2$ ) ve kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ) minerallerinin miktarını belirlemek için yapılan bir analiz yöntemidir. Bu analiz, klinkerin bileşimi ve kalitesi hakkında bilgi sağlar. Kuvars-kalsit tayini genellikle X-ışını floresans spektrometrisi (XRF) veya termogravimetrik analiz gibi teknikler kullanılarak gerçekleştirilir. XRF yöntemi, numunenin X-ışını ile bombardıman edilerek numunedeki elementlerin karakteristik floresans ışınımını ölçer. Böylece kuvars ve kalsit gibi minerallerin içerdikleri elementlerin miktarı tespit edilir. Termogravimetrik analiz ise numunenin ısıtılmasıyla gerçekleştirilir. Numune ısıtıldığında, kalsit gibi mineraller termal bozunma ile karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) dönüşebilir. Bu değişiklik termogravimetri cihazıyla izlenebilir ve kalsitin miktarı hesaplanabilir. Kuvars-kalsit tayini, klinkerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini anlamak için önemlidir. Kuvars ve kalsit içeriği, klinkerin hidratasyon özelliklerini, çimento üretimi sırasında oluşabilecek olumsuz etkileri ve dayanıklılık özelliklerini etkileyebilir. Bu nedenle, kuvars-kalsit tayini çimento endüstrisinde kalite kontrolünün bir parçası olarak kullanılmaktadır.

### **Donma Başı-Sonu Analizi:**

Klinker donma başı-sonu analizi, çimento üretiminde kullanılan klinker numunelerinin donma ve çözülme davranışını belirlemek için yapılan bir testtir. Bu analiz, klinkerin dayanıklılık özellikleri ve çimento performansı hakkında bilgi sağlamak amacıyla gerçekleştirilir. Donma başı-sonu analizi, klinker numunelerinin farklı sıcaklık aralıklarında dondurulmasını ve çözülmesini içerir. Bu test, genellikle ASTM C 666 veya EN 196-1 standartlarına uygun olarak yapılmaktadır. Analiz sırasında, klinker numunesi belirli bir sıcaklık aralığında birçok kez dondurulur ve çözülür. Bu süreçte numunenin ağırlığı, hacmi ve dayanıklılığı takip edilir. Bu veriler, klinkerin donma ve

çözülme döngülerine karşı olan direncini ve potansiyel çatlama ve bozulma riskini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Klinkerin donma başı-sonu analizi, çimentonun donma-çözülme direncini belirlemede önemli bir faktördür. Klinkerin bu testte iyi performans göstermesi, çimento üretiminde kalite ve dayanıklılık açısından olumlu bir işarettir. Analiz sonuçları, çimento formülasyonlarının optimize edilmesine ve çimento üretim sürecinin iyileştirilmesine yardımcı olur.

#### **Yoğunluk Analizi:**

Yoğunluk analizi, klinkerin belirli bir hacme olan kütlesini ölçerek yoğunluğunu hesaplamayı sağlar. Bu analiz genellikle Arşimed Prensibi'ne dayanır. Yoğunluk analizi kapsamında yer alan işlem basamakları şu şekilde sıralanabilir;

- Numune hazırlığı: Klinker numunesi, uygun bir şekilde öğütülerek homojen bir halde hazırlanır.
- Tartım: Belirli bir hacimde (genellikle suyla doldurulan bir piknometre kullanılarak) numunenin kütlesi ölçülür.
- Daldırma: Piknometre içindeki su seviyesi kaydedilir ve numune dikkatlice piknometreye daldırılır. Numunenin piknometre içindeki su seviyesini değiştirdiği gözlemlenir
- Su seviyesi ölçümü: Numunenin daldırılması sonucunda su seviyesi tekrar kaydedilir.
- Hesaplama: Daldırma öncesi ve sonrasında su seviyesindeki değişim kullanılarak,
- Arşimed prensibi'ne göre klinker numunesinin yoğunluğu hesaplanır.

Yoğunluk analizi, çimento üretiminde ve malzemenin kalitesinin kontrolünde önemli bir parametredir. Klinkerin yoğunluğu, çimento karışımlarının özelliklerini etkileyen bir faktördür. Bu analiz yöntemi, çimento endüstrisinde standartlar ve yönergeler tarafından belirlenen prosedürlere göre gerçekleştirilir.

#### **Kızdırma Kaybı Analizi:**

Ağırlığı önceden bilinen ( $1 \pm 0.05$  g) bir örnek, çok yüksek sıcaklıkta ( $975 \pm 25$  °C) kızdırılarak ağırlık kaybına tabi tutulur. Bu ağırlık kaybına "kızdırma kaybı" denir ve genellikle yüzde olarak ifade edilir (Kaya, 2010). Kaya (2010)'ya göre bu analizde yer alan adımlar şu şekilde sıralanmaktadır;

- Sabit tartıma getirilmiş bir kroze alınır.
- Rutubeti alınmış çimento numunesinden 0.0001 hassasiyetle 1.00 g ( $m_1$ ) alınır ve kroze içine yerleştirilir.

- Kroze, 975°C ± 25 °C sıcaklıkta bulunan fırında 15 dakika boyunca kızdırılır.
- Kızdırma işlemi tamamlandıktan sonra kroze, oda sıcaklığına kadar soğutulur ve tartılır.
- Aynı işlem 5 dakika daha tekrarlanarak kroze oda sıcaklığına kadar soğutulur ve tekrar tartılır.
- Bu işlem, sabit tartıma (m<sub>2</sub>) ulaşıncaya kadar tekrarlanır.

Bu analizde amaç, numunenin kızdırma işlemi sırasında kaybettiği ağırlığı belirlemektir. Kızdırma kaybı, çimento numunesindeki organik ve uçucu maddelerin, suyun ve diğer bileşenlerin kızdırma sırasında buharlaşması veya ayrışması sonucunda ortaya çıkar. Analizin sonucunda elde edilen kızdırma kaybı yüzdesi, numunenin bileşimi ve kalitesi hakkında bilgi sağlar.

$$\% \text{ Kızdırma Kaybı} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 = \frac{(m_1 - m) - (m_2 - m)}{(m_1 - m)} \times 100$$

Burada;

m: Boş kroze

m<sub>1</sub>: Dolu (yaş tartım) kroze

m<sub>2</sub>: Dolu (kuru tartım) kroze

M<sub>1</sub>: Deney numunesi kütlesi = m<sub>1</sub> – m

M<sub>2</sub>: Kızdırılmış deney numunesi sabit tartım kütlesi = m<sub>2</sub>-m

#### **Mineralojik Analizler:**

Bu çalışmadaki mineralojik analizler Türk Çimento laboratuvarlarında Optik Polarize Mikroskop (OPM) ile yapılmıştır.

Optik polarize ışık mikroskopunda incelenen klinker granülleri, numune genelini temsil edebilmesi için kabaca kırıcıdan geçirilerek, 1-4 mm' lik elekler yardımı ile elenmiş, bu boyutların arasında kalan numuneden alınan temsili granüller polyester içerisine gömülerek dondurulmuştur. Donma sonrasında yüzey düzeltme amaçlı olarak zımparalanmış, ardından parlatma işlemi ile minerallerin görünür hale gelmeleri sağlanmıştır. Numune hidroflorik asit buharına tutularak mineraller renklendirilmiştir.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, sadece fosil yakıt ile üretilen ve fosil yakıt ile alternatif yakıt ile üretilen klinkerin mikroyapısına etkileri araştırılmıştır. Fosil yakıt olarak ithal linyit, millileşmiş kömür, petrokok, yerli kömür kullanılmıştır. Fosil yakıt analizleri olan sonuçları Çizelge 3.2’ de verilmiştir.

Tez çalışmasında alternatif yakıt ve katkı maddesi olarak, endüstriyel plastik atık, ömrünü tamamlamış lastik (ÖTL) kullanılmıştır. Çalışma amacımız, farklı yakıt kompozisyonu ile her iki yakma sonucu klinker karakteri ve mikroyapı ve faz değişiminin analizidir.

Yakma sonucu oluşan klinker üretiminde kullanılan petrokok, Endüstriyel plastik atık ve kırılmış ömrünü tamamlamış lastiklerin kısa analizleri yapılmış ve Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Rutubet, Kül, Kükürt ve Uçucu Madde Analizleri

| Yakıtlar                       | Kaba Rutubet (%) | Bünye Rutubeti (%) | Toplam Rutubet (%) | Kuru Kömürde Kül (%) | Kuru Kömürde Uçucu Madde (%) | Kuru Kömürde Kükürt (%) |
|--------------------------------|------------------|--------------------|--------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|
| Petrokok                       | 4.91             | 0.62               | 5.50               | 0.32                 | 13.65                        | 5.73                    |
| Endüstriyel Plastik Atık       | 12.56            | 1.79               | 14.13              | 5.93                 | 88.21                        | 0.41                    |
| Ömrünü Tamamlamış Lastik (ÖTL) | -                | 3.00               |                    | 8.40                 | -                            | -                       |

Rutubet değerleri Petrokok ve Endüstriyel plastik atık gibi atıklar için takip edilen değerlerdir. Alternatif yakıtlı olarak numunesini incelediğimiz klinkerde tüketilen yakıtlarda rutubet değerleri (toplam rutubet değeri %15 üzerine çıkılmaması istenmektedir) çalışılabilir düzeydedir. Kül analizi farin ile beraber klinkerleşme evresinde önemli rol almaktadır ve alternatif yakıtlarda beklenen kül yüzdesi fosil yakıtı yakın olmasıdır. Tüketilen endüstriyel plastik atık ve ÖTL numunelerinin kül değerleri düşüktür. Uçucu madde yanabilirlik açısından takip edilen bir değerdir. Endüstriyel plastik atıklar petrokoka göre daha hızlı yanma eğilimi gösterdiğinden dolayı uçuculuğu petrokoka göre yüksektir. Kükürt en önemli takip edilmesi gereken analiz parametresidir. Döner fırın ön ısıtıcı siklonetlerinde yakıt kaynaklı kükürt fazlalılığı anast dediğimiz sarmal yapıları oluşturarak siklonetleri bloajlayarak tıkanmalara sebep olmaktadır. Üretim kaybı ve İSG (İşçi Sağlığı ve Güvenliği) anlamında problemler yaşatmaktadır. En önemli denge kükürtün alkaliler ( $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$ ) ile yapacağı bağ ile klinker ile beraber sistemden çıkmasının sağlanmasıdır. Endüstriyel plastik atıkların kükürt değeri petrokoka göre düşük olduğundan dolayı kullanımı tercih nedenleri arasındadır.

Fosil ve alternatif yakıtlarda takip edilen diğerlerde en önemli unsurlar ise kalori, karbon ve klordur. Bu tez çalışmasında tüketilen fosil ve alternatif yakıtların Klor, Karbon ve Kalori analizleri Çizelge 4.2’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.2. Klor, Karbon ve Kalori Analizleri

| Yakıtlar                 | Klor (%) | Karbon (%) | Orjinal Kömürde Net Kalori (Kcal/kg) |                           | Net Kalori (Kcal/kg)          |                            |                           |
|--------------------------|----------|------------|--------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|
|                          |          |            | Orjinal Kömürde Aşağı Kalori         | Kuru Kömürde Aşağı Kalori | Orjinal Kömürde Yukarı Kalori | Kuru Kömürde Yukarı Kalori | Havada Kuru Yukarı Kalori |
| Petrokok                 | -        | 89.05      | 7703                                 | 8186                      | 7951                          | 8414                       | 8361                      |
| Endüstriyel Plastik Atık | 0.49     | -          | 4031                                 | 4793                      | 4035                          | 5178                       | 5085                      |
| Kırpılmış Lastik (ÖTL)   | -        | 24.1       | 6200                                 |                           |                               |                            |                           |

Klor takibi özellikle Endüstriyel Plastik Atık gibi atıklarda yoğun olarak takip edilen parametrelerin başında gelmektedir. Klor proses içerisinde herhangi bir kimyasal bağ yapmayıp tamamen proses içerisinde hapsediği için sistemi ciddi anlamda blokaja maruz bırakmaktadır. Bu tez çalışması aşamasında kullanılan endüstriyel plastik atıkların ‘Cl’ değeri (%0.49) oldukça düşüktür.

Karbon da klor gibi çalışma şartlarını zorlayıcı etmenler arasında gelmektedir. Siklon tepesindeki ‘O<sub>2</sub>’ ve ‘C’ değerleri çalışma proses takibi açısından oldukça önemlidir. Alternatif yakıtların Karbon yüzdelерinin fosil yakıtlara göre düşük olması beklenir ve bu tez çalışmasında tükettiğimiz endüstriyel plastik atıkların ‘C’ değeri fosil yakıtı göre eser miktarda çıkmıştır ve kullanımı uygundur.

Bu tez çalışmasında takip edilen en önemli parametrelerden biri de yakıtların kalorifik değerleridir. Fosil yakıtların kalorileri alternatif yakıtlara göre yüksektir. Özellikle Net Kalori Havada kuru yukarı kalori olarak takibi sağlanan kalori değeri, yakıtların %100 kuru olarak net kalori tayini değeridir. Çizelge 4.2’de belirtildiği gibi endüstriyel plastik atıkları ve ÖTL’ler kalorifik olarak yüksek değerlere sahip olduğundan alternatif yakıt olarak fosil yakıtı ikame olarak tercih edilmiştir. Alternatif yakıtlarda tercih edilen kalorifik değer 3500 kcal/kg’den yüksek olmalıdır. Aksi halde düşük kalorifik değere sahip atıkların yakılması fosil yakıtın ikamesini sağlayamayacağı gibi üretim kayıplarına da neden olmaktadır.

#### 4.1. Fosil Yakıt Kullanılan Klinker Analizi

Yaklaşık 1000°C sıcaklıkta ön kalsinasyona tabi tutulan farin, döner fırın ön ısıtıcı siklonetlerinden geçtikten sonra döner fırına aktarılır. Kalsinasyon işlemi döner fırında da devam ederek klinkerleşme meydana gelir. Oluşan klinker soğutma ünitesinde şok soğumaya uğratılarak yaklaşık 150-200 °C'ye kadar soğutularak stoklama sahasına yönlendirilir. Klinkere ait kimyasal ve mineralojik analizler Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4' de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Klinkerlerin Özelliklerine Göre Yapılan Kimyasal Analiz Sonuçları

| Özellik<br>(Properties)                     | Birim<br>(Unit) | KLİNKER | Metot                                          |
|---------------------------------------------|-----------------|---------|------------------------------------------------|
| Kızdırma Kaybı                              | %               | 0.15    | TS EN 196-2/ EN 196-2                          |
| SiO <sub>2</sub>                            | %               | 20.45   | TS EN 196-2/ EN 196-2 (XRF Metodu)             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | %               | 4.60    | TS EN 196-2/ EN 196-2 (XRF Metodu)             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | %               | 3.06    | TS EN 196-2/ EN 196-2 (XRF Metodu)             |
| CaO                                         | %               | 64.73   | TS EN 196-2/ EN 196-2 (XRF Metodu)             |
| MgO                                         | %               | 2.94    | TS EN 196-2/ EN 196-2 (XRF Metodu)             |
| SO <sub>3</sub>                             | %               | 1.89    | KKL.TA.12 İşletme İçi Metod (Spektrofotometre) |
| Na <sub>2</sub> O                           | %               | 0.44    | TS EN 196-2/ EN 196-2                          |
| K <sub>2</sub> O                            | %               | 1.04    | TS EN 196-2/ EN 196-2                          |
| Na <sub>2</sub> O Eşd. Cins.<br>Top. Alkali | %               | 0.86    | Hesaplama (Calculation)                        |
| CI                                          | %               | 0.0134  | TS EN 196-2/ EN 196-2 (XRF Metodu)             |
| Serbest CaO                                 | %               | 0.34    | Glikol Metodu (Asidimetrik)                    |
| KDF                                         | %               | 100.08  | Hesaplama (Calculation)                        |
| SM                                          | %               | 2.67    | Hesaplama (Calculation)                        |
| AM                                          | %               | 1.50    | Hesaplama (Calculation)                        |
| C <sub>3</sub> S                            | %               | 71.39   | Bogue                                          |
| C <sub>2</sub> S                            | %               | 4.82    | Bogue                                          |
| C <sub>3</sub> A                            | %               | 7.01    | Bogue                                          |
| C <sub>4</sub> AF                           | %               | 9.31    | Bogue                                          |
| Likit Faz                                   | %               | 24.88   | Hesaplama (Calculation)                        |

Klinkerdeki SO<sub>3</sub> miktarı pişme esnasında alkaliler (Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O) ile bağ yaptığının göstergesidir. Bu tez çalışması esnasında alınan numunelerde alternatif yakıtlı ve yakıtsız klinkerlerde kükürt değeri birbirine yakındır. Çok düşük olmadıkları için (<1%) alkaliler ile de bağ yaptığının göstergesidir. Yani proseste verimli yanma şartının da olduğu izlenmiştir. Eğer 1'in altında SO<sub>3</sub> değeri, kükürt sistem içerisinde bir yerde biriktiğini ve prosesteki CO miktarı yüksek olduğunu göstermektedir.

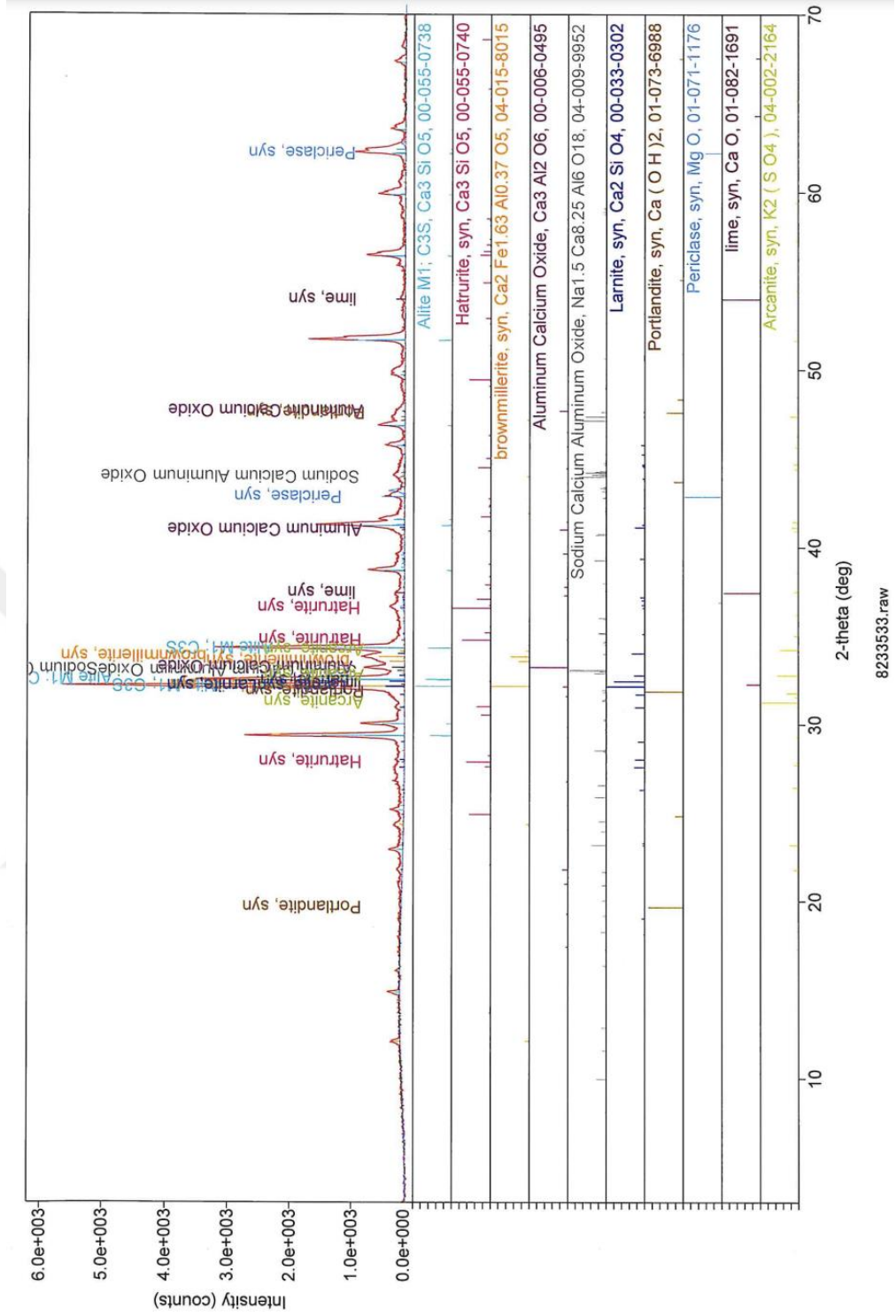
Bir diğ er önemli parametre ise serbest kireç değ eridir. Serbest kirecin  $1.5\% < S.CaO < 2\%$  olması gerekir. Serbest kireç yükseldikçe dayanım düş mektedir. İncelenen numunelerde serbest kireç değ erleri kullanılabilir aralıkta gelmiştir. Ayrıca, Çizelge 4.3' e göre  $\%C_3S$ ; 71.39,  $\%C_2S$ ;4.82,  $\%C_3A$ ; 7.01,  $\%C_4AF$ ; 9.31 ve  $\%Likit\ Faz$ ; 24.88 bulunmuştur.

Çimentonun esas bileş en minerali  $C_2S$  ve  $C_3S$ 'tir.  $C_3A$  fazı düşük mukavemetlidir ancak betonun katılaşmasını baş latmak amacıyla kullanılır. Çizelge 4.4' e göre kristal yapılarına göre oluş an mineral analiz sonuçları;  $\%Ca_3SiO_5$  ;67.0,  $\%Ca_2SiO_4$ ; 10.5,  $\%Ca_3Al_2O_6$  ;6.7,  $\%Ca_2Fe_{1.5}Al_{0.5}O_5$  ; 10.6,  $\%MgO$ ; 2.0,  $\%CaO$ ; 1.0,  $\%Ca(OH)_2$  ;0.2,  $\%K_2SO_4$ ; 1.0 ,  $K_3Na(SO_4)_2$  ; 0.0 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.4. Klinkler Mineral Analiz Sonucu

| Mineraller          |                           | Birim<br>(Unit) | Klinker |
|---------------------|---------------------------|-----------------|---------|
| $C_3S - M3$         | $Ca_3SiO_5$               | %               | 15.0    |
| $C_3S - M1$         |                           | %               | 52.0    |
| $C_3S - Toplam$     |                           | %               | 67.0    |
| $C_2S$              | $Ca_2SiO_4$               | %               | 10.5    |
| $C_3A - Kùbik$      | $Ca_3Al_2O_6$             | %               | 1.2     |
| $C_3A - Ortorombik$ |                           | %               | 5.5     |
| $C_3A - Toplam$     |                           | %               | 6.7     |
| $C_4AF$             | $Ca_2Fe_{1.5}Al_{0.5}O_5$ | %               | 10.6    |
| Periklaz            | $MgO$                     | %               | 2.0     |
| Serbest Kireç       | $CaO$                     | %               | 1.0     |
| Portlandit          | $Ca(OH)_2$                | %               | 0.2     |
| Arkanit             | $K_2SO_4$                 | %               | 1.0     |
| Aftitalit           | $K_3Na(SO_4)_2$           | %               | 0.0     |

Klinker yapısının mineral analizleri XRD kırınım yöntemi ile de tespit edilmiş ve mineral fazlar ortaya konmuştur. Şekil 4.1.'e göre Alit ( $C_3S$ ), Hatrurite ( $Ca_3SiO_5$ ), Millerite ( $Ca_2Fe_{1.63}Al_{0.37}O_5$ ), Portlandite ( $Ca(OH)_2$ , Periklas ( $MgO$ ), kireç ( $CaO$ ) ana mineral parajenezleri olarak ortaya konmuştur.



Şekil 4.1. XRD cihazından elde edilmiş olan kırınım deseni

#### 4.1.1. Fosil Yakıt Kullanılan Klinker Mikroyapı İncelemesi

Mikroskop kesit incelemeleri, Ham Karışım Kaynaklı Etkiler, Pişme Sıcaklığı Kaynaklı Etkiler, Fırın Atmosferi Kaynaklı Etkiler, Alev Şekli Kaynaklı Etkiler, Soğutma Hızı Kaynaklı Etkiler, Faz Miktarı Sonuçları, Mikroskopik Boyut Analiz Sonuçları alt başlıkları altında detaylandırılmıştır.



### ***Ham Karışım Kaynaklı Etkiler***

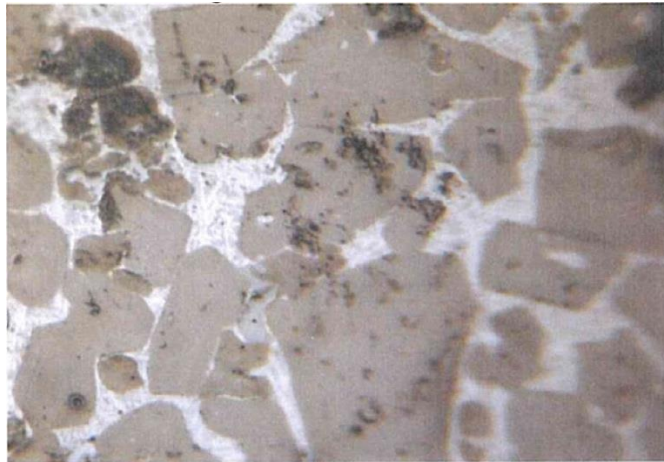
Farin kompozisyonu, pişmeyi etkileyen faktörlerdendir. Kimyasal kompozisyon, incelik, homojenlik ve pişebilirlik parametreleri hammadde karışımı kaynaklı etkilerdir.

Mikroskop incelemeleri sonucu klinker numunelerinde miktarca daha çok olacak şekilde ortorombik kristallere rastlanılırken kübik kristal yapılı  $C_3A$  minerallerine de rastlanılmıştır (Şekil 4.2). Alüminatın kübik yapıda olması alkalilerin düşük miktarda bulunduğunu, sülfatlara bağlandıklarını ve az reaktif olduklarını göstermektedir. Alüminat içerisinde alkali oranı yükseldikçe sülfatlaşma oranı azalmakta, malzemenin reaktifliği artarken  $C_3A$  yapısı ortorombik olmaktadır (Şekil 4.2). İncelenen numunede ortorombik  $C_3A$  kristallerinin iyi kristallenmiş olduğu söylenebilir. Şekil 4.2'ye göre; klinkerde; kahverengi açık kahverengi kristaller alit, krem rengi zemin üzerindeki gri kristaller  $C_3A$  mineralleridir.



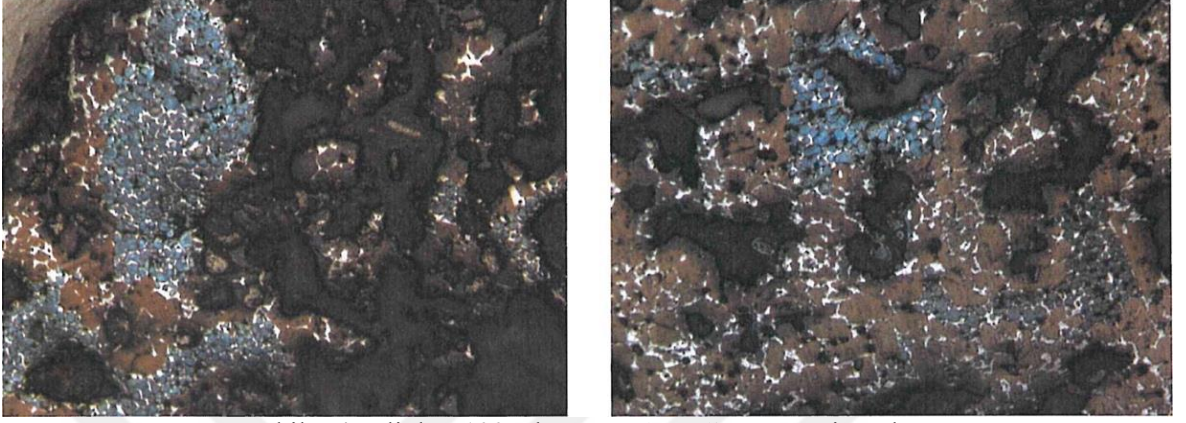
Şekil 4.2. Klinker 500x büyütme; ham karışım kaynaklı etkiler

Şekil 4.3'e göre; Kahverengi açık kahverengi kristaller aliti krem rengi zemin üzerindeki gri kristaller  $C_3A$  mineralleridir (Lamel şeklinde gri şekiller ortorombik  $C_3A$  yapısıdır).



Şekil 4.3. Klinker 500x büyütme;  $C_3A$  mineralleri

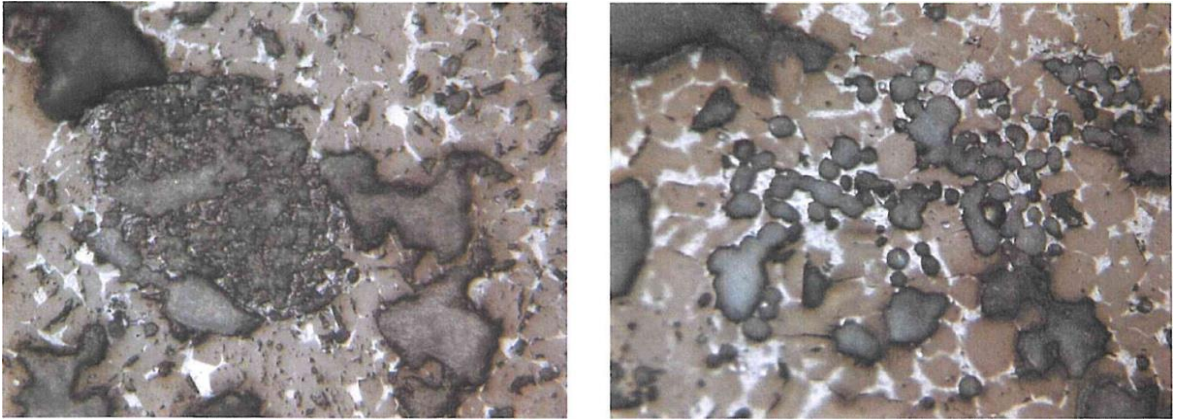
Şekil 4.4 de görüldüğü üzere belit ( $C_2S$ ) minerallerinin homojen ve dağınık bir görüntü ile yer alması beklenmektedir. Belit ( $C_2S$ ) minerallerinin kümelenmiş olması farinde iri taneli kuvars mineralleri varlığında gerçekleşmektedir. Ancak klinker numunesi incelendiğinde genel itibariyle kümeli belit yapılanması gözlenirken, homojen belit yapılanması gözlenmemiştir.



Şekil 4.4. Klinker 100X büyütmede Belit ( $C_2S$ ) mineral görünümü

#### ***Pişme Sıcaklığı Kaynaklı Etkiler***

Yakıtların kalorifik değeri ve fırının sıcaklık profili klinkerde sıcaklık kaynaklı etkilere sebep olmaktadır. İyi pişmemiş klinkerlerde yüksek miktarda boşluklu yapının yanı sıra belit ve serbest kireç kümelenmeleri gözlenmektedir. Ham karışım kaynaklı etkiler bölümünde belirtildiği gibi, klinker numunesinin genel yapısının kümeli belit olduğu gözlemlenmiştir. Serbest kireç değerleri incelendiğinde ise normal seviyelerde olduğu görülmüştür. (Şekil 4.5). Serbest kireç değerinin normal seviyelerde olması, numunede bulunan belit minerallerinin genel yapılarının homojen belit yapılanmasında olmasına yol açmaktadır. Ancak incelenen numunede kümeli belit yapısı gözlenmiştir. Bu nedenle, bu numunede pişme sıcaklığı kaynaklı olumsuz bir durumun varlığı söz konusu olabilir. Şekil 4.5'e göre; siyah yuvarlak kümeli yapılar serbest kireç mineralleridir.



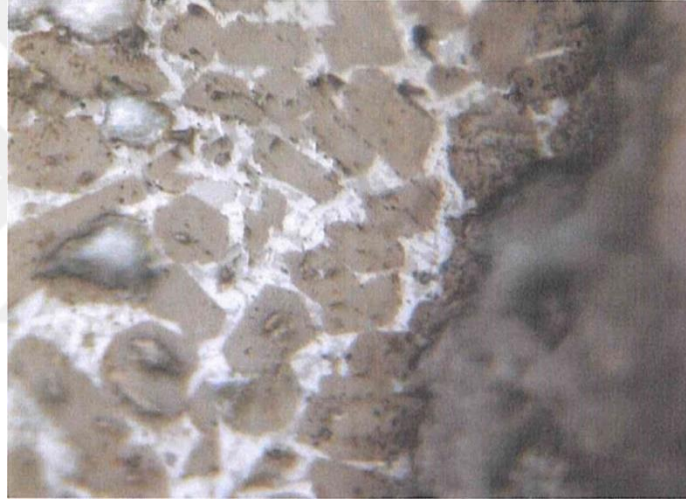
Şekil 4.5. Klinker 100x büyütme; serbest kireç görünümü

### ***Fırın Atmosferi Kaynaklı Etkiler***

Klinker yatağında indirgen koşulların var olması, farklı yakıt özellikleri (tane boyutu ve yanma davranışı) klinker yapısını etkilemektedir. İndirgen koşulların yavaş klinker soğutması ile birlikte var olması durumunda kristal kafesi içerisine  $Fe^{+2}$  iyonunun yerleşmesi ile  $C_3S$ 'in serbest kirece ayrışması gerçekleşir. Bu durum çimentonun basınç dayanımında düşmeye veya hacim stabilitesinde değişikliğe sebep olabilir.  $C_4AF$  mineralinin düşük,  $C_3A$  mineralinin yüksek olması ise priz süresini kısaltmaktadır.

İncelenen klinker numunesinde;  $C_4AF$  mineralinin  $C_3A$  minerallerinden daha az olması durumuna rastlanmamıştır. Ancak yine de sayısal veri için mikroskobik analizde ne yazık ki sıvı faz bileşenlerinde miktarsal olarak değer verilememektedir (Şekil 4.6).

Şekil 4.6'ya göre; klinker 500X Büyütmede kahverengi kristaller alit, krem rengi ( $C_4AF$ ) zemin üzerindeki gri kristaller  $C_3A$  mineralleridir.



Şekil 4.6. Klinker 500x büyütme; krem rengi kristaller ( $C_4AF$ ), gri kristaller  $C_3A$  mineralleri

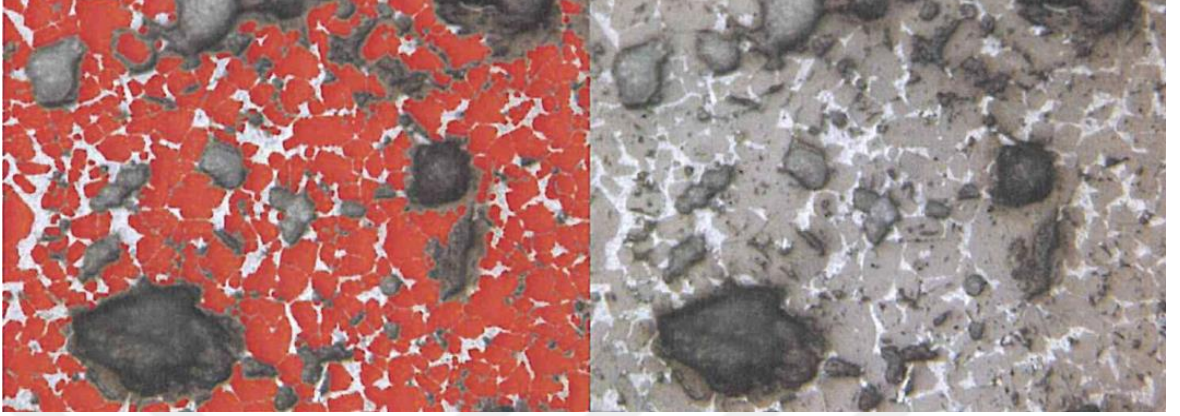
### ***Alev Şekli Kaynaklı Etkiler***

Minerallerin optik mikroskop yardımı ile görsel incelenmesinde, klinker granüllerinde alit kristallerinin idealde 25-35  $\mu m$  arasında, belit kristallerinin ise idealde 15-20  $\mu m$  civarında olması beklenir. Kullanılan program vasıtasıyla gerçekleştirilen ayrılmış kristallerdeki boyut analizinde; Şekil 4.7. ve Şekil 4.8'e göre; Alit ( $C_3S$ ) boyutlarının ortalama 20.00  $\mu m$ , belit ( $C_2S$ ) boyutlarının ortalama 13.12  $\mu m$  kadar olduğu söylenebilir.

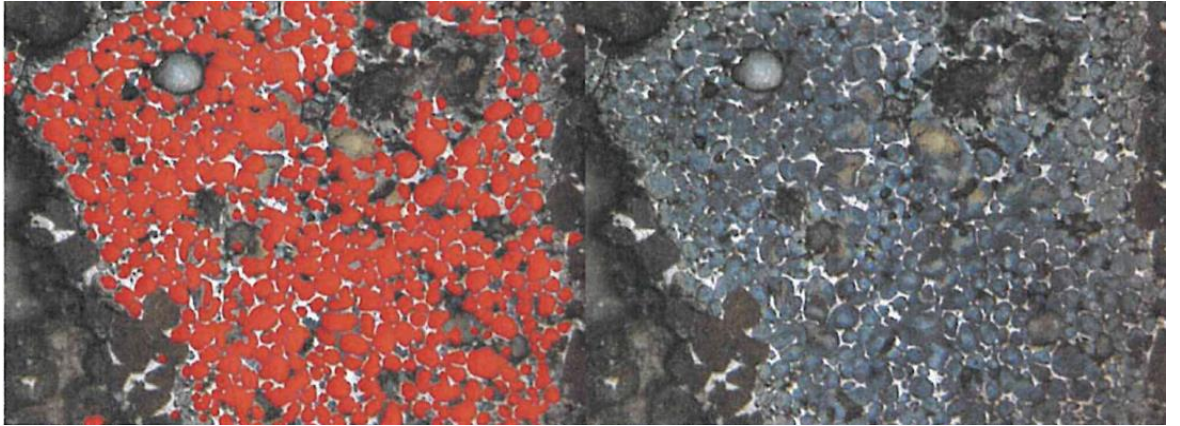
Alit ve belit minerallerinin boyutlarının ideal aralıkta olması klinker numunesinin yanma süresinin ideal koşullarda olduğunu göstermektedir. Klinker numunesinde alit ve belit minerallerinin boyutlarının ideal boyut aralığında olmadığı görülmektedir. Klinker numunesi incelendiğinde alit ve belit minerallerinin boyutlarının ideal sürede olmadığı; yanma süresinin normal koşullar dışında olmasının işaretidir. Alit kristalleri genellikle altıgen şekilli ve köşeli yapıda, belit kristalleri ise birbirinden uzak, dairesel yapıda görülmesi beklenmektedir. İncelenen numunede kristal yapılarında



yer yer belit kristalleri yuvarlak ve ayrıışmış durumdadır. Alit kristalleri de köşeli dikdörtgen yapıda gözlenmiştir. Bununla beraber numunede belit kristalleri için yeterli bir pişmenin göstergelerinden olan çok yönlü lameller gözlenmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.7. Klinker 200x büyültme; Alit ( $C_3S$ ), belit ( $C_2S$ ) kristalleri (Alit Boyut Seçiminde orijinal foto ve taranmış kopyası)



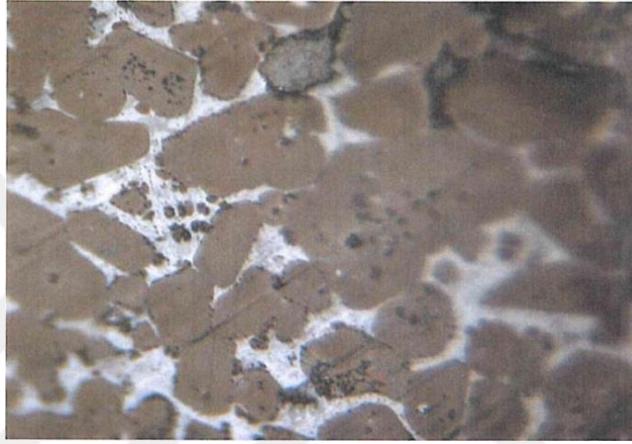
Şekil 4.8. Klinker 200x büyültme; Alit ( $C_3S$ ), belit ( $C_2S$ ) kristallerinin boyutsal görünümü (Alit Boyut Seçiminde orijinal foto ve taranmış kopyası)



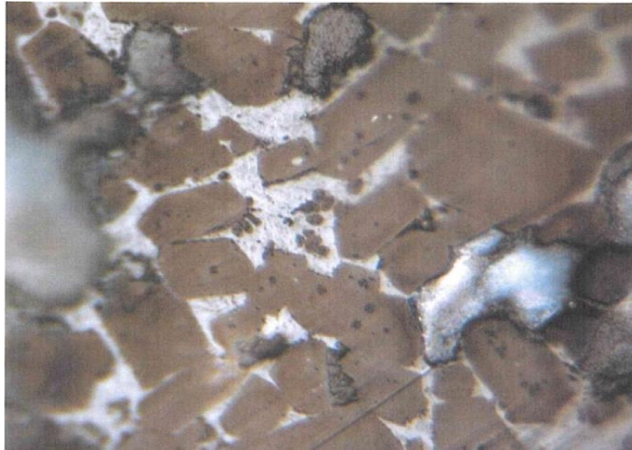
Şekil 4.9. Klinker 200x büyültme, belit lamelleri

### ***Soğutma Hızı Kaynaklı Etkiler***

Klinker soğutma sistemi tasarımının yanı sıra, klinkerin kimyasal ve mineralojik kompozisyonuna dayanan etkiler de vardır. Örneğin ikincil belit oluşumu ya da parmak şekilli belit mineralleri bu etki kaynaklıdır. Normal veya hızlı soğutma yapıldığında  $C_3S$ 'in köşeli dış yüzeyinden  $C_2S$  ve  $CaO$  ayrışır,  $C_3A$  oluşumu için gerekli  $CaO$  buradan sağlanırken,  $C_3S$ 'ler çevresinde oluşan belit kenarlıkların kalınlığı, sıvı fazdaki (eriyik)  $C_3A$  içeriğine bağlıdır. Aşınmış belit kristallerinin yüzey yapıları bozularak parmak şeklini alır. Daha ileri seviyede ise alit kristallerini çevreleyen ikincil belit oluşumları gözlenir. Klinker numunesinde soğutma kaynaklı ikincil belit minerallerine rastlanmıştır ancak parmak şekilli belit gözlenmemiştir. (Şekil 4.10 ve Şekil 4.11).



Şekil 4.10. Klinker 500x büyültme, Alit kenarlarındaki küçük kahverengi yuvarlak yapılar - İkincil belit görünümü

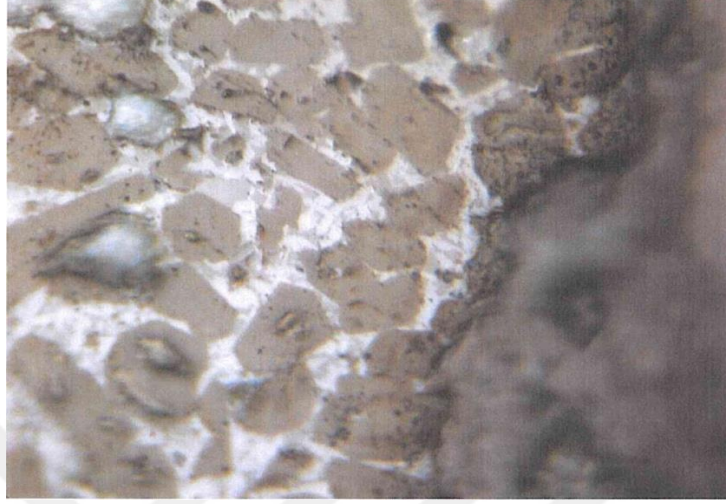


Şekil 4.11. Klinker 500x büyültme, Alit ve ikincil belit oluşumu

Ön soğutmanın basınç dayanımı üzerine de etkisi vardır. Kalsiyum silikatlar yavaş soğutulmuş ve  $C_3A'$  ca zengin olan klinkerlerde daha az reaktiftirler. Bu durum çimentonun basınç dayanımına düşürücü etki yapabilir. Klinker numunesindeki ikincil belit kristalleri varlığı açısından incelendiğinde, bu yapıya sahip klinkerlerin basınç dayanımlarında düşme görülmesi olasıdır.



Hızlı soğutma yapılması durumunda ara fazların ( $C_3A$  ve  $C_4AF$ ) iyi ayrıştığı,  $C_3A$ 'nın daha yüksek reaktiflik gösterdiği bilinmektedir. Numunenin geneline bakılarak fazların belirgin olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Klinker 500x büyültme, Alit lamelleri

#### **Faz Miktarı Sonuçları**

Mikroskopik faz tayin sonuçları Çizelge 4.5' ve 4.6'te verilmiştir. Çizelge 4.5. e göre; Klinkerde  $C_3S$  (Alit) % 57.39,  $C_2S$  (Belit) %10.70,  $C_3A$  (Alüminat) +  $C_4AF$  (Ferrit) %10.06 ve Boşluk oranı%21.85 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.5'te alternatif yakıtsız klinker için  $C_3S$  miktarının, boşluklu yapının yüksek olmasından dolayı baskılanıp düşük olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.5. Mikroskopik Faz Tayini (Boşluk miktarı ile birlikte yüzdesel gösterim)

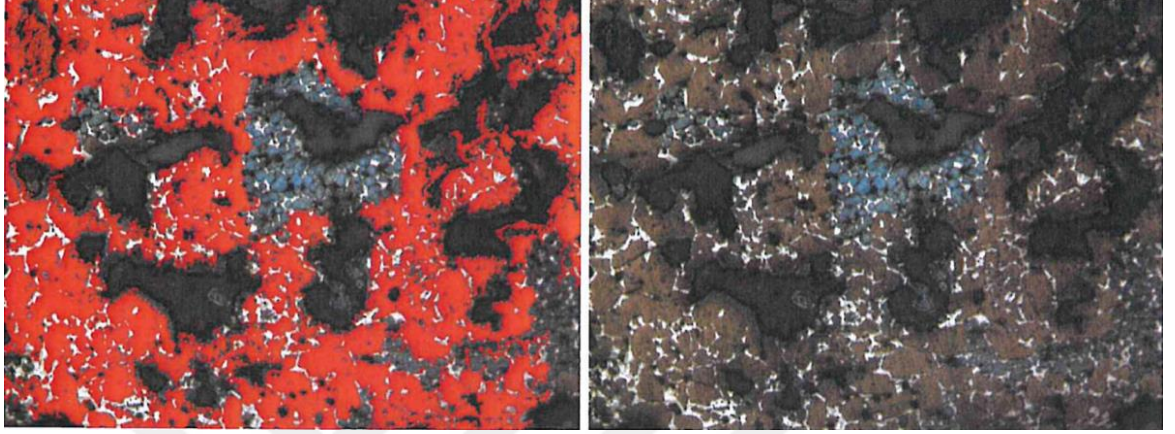
| <b>Mineral</b>                       | <b>Klinker</b> |
|--------------------------------------|----------------|
| $C_3S$ (Alit)                        | %57.39         |
| $C_2S$ (Belit)                       | %10.70         |
| $C_3A$ (Alüminat) + $C_4AF$ (Ferrit) | %10.06         |
| Boşluk                               | %21.85         |

Çizelge 4.6. Mikroskopik Faz Tayini (Boşluk miktarı olmadan yüzdesel gösterim)

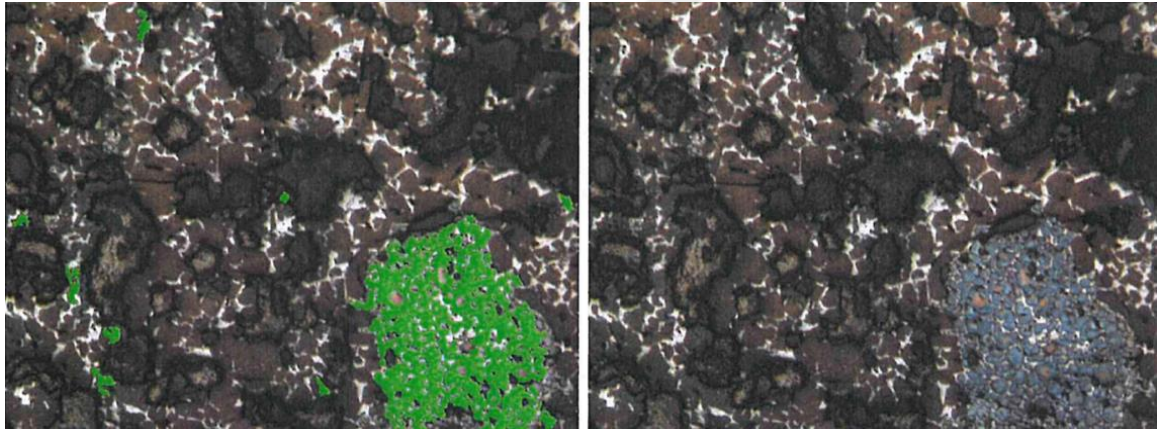
| <b>Mineral</b>                       | <b>Klinker</b> |
|--------------------------------------|----------------|
| $C_3S$ (Alit)                        | %73.43         |
| $C_2S$ (Belit)                       | %13.69         |
| $C_3A$ (Alüminat) + $C_4AF$ (Ferrit) | %12.87         |

Çizelge 4.6.'a göre;  $C_3S$  (Alit) %73.43,  $C_2S$  (Belit) %13.69,  $C_3A$  (Alüminat) +  $C_4AF$  (Ferrit) %12.87 tespit edilmiştir. Soğutmanın verimliliği ile  $C_3S$  miktarının klinkere olan etkisini olumlu yansıtmıştır.

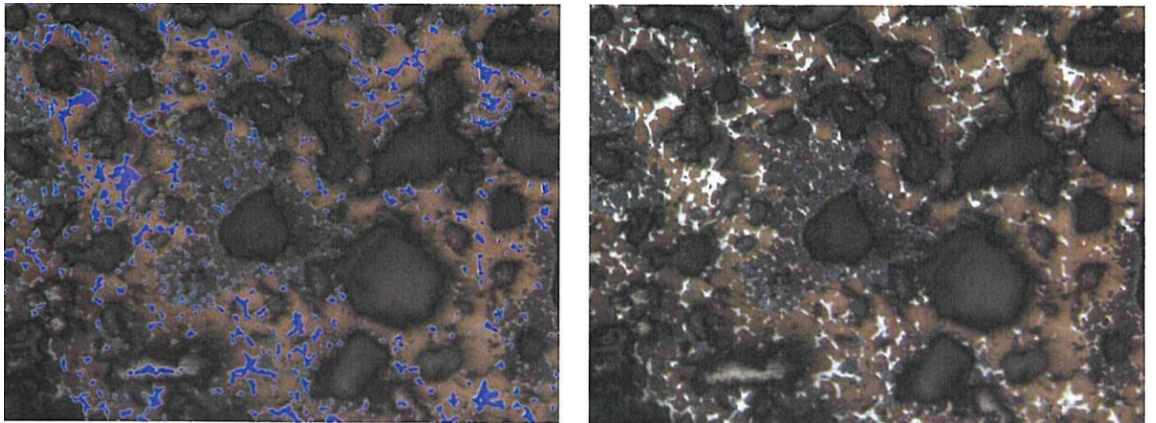
Alit, Belit, Sıvı faz ve Boşluk yapılarının taranmış ve orijinal görüntüleri Şekil 4.13-Şekil 4.16 aralığında verilmiştir.



Şekil 4.13. Klinker 200x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış alit görünümü)

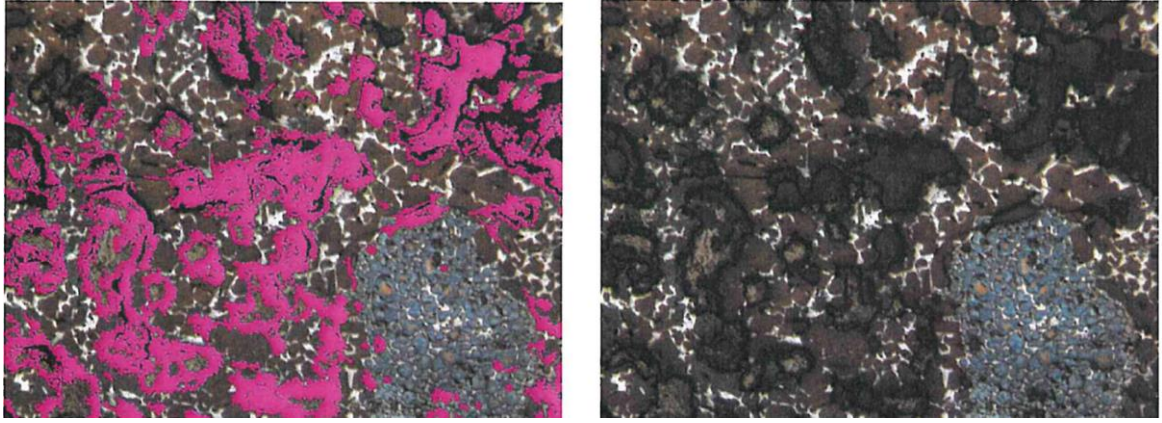


Şekil 4.14. 200x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış belit görünümü)



Şekil 4.15. 100x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış sıvı faz görünümü)





Şekil 4.16. 100x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış boşlukların görünümü)

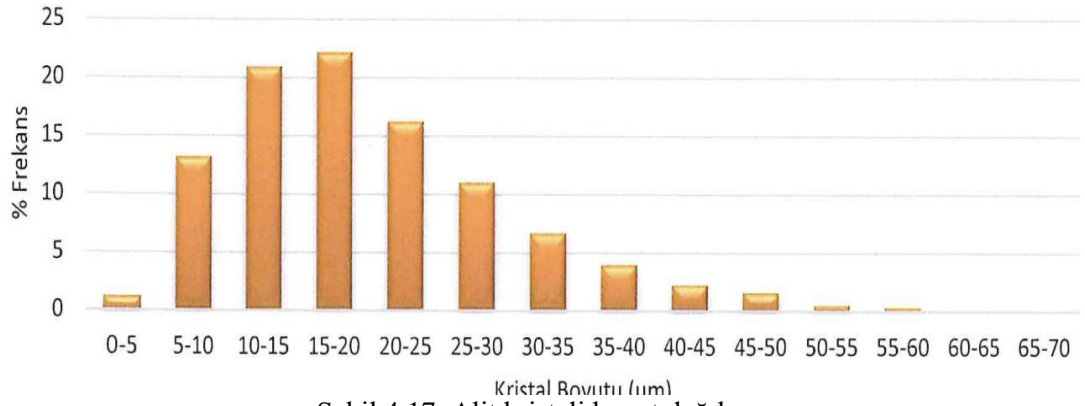
#### **Mikroskopik Boyut Analiz Sonuçları**

Klinkerleşme içerisindeki Alit ( $C_3S$ ) ve Belit ( $C_2S$ ) minerallerinin boyutsal analizleri ve yüzdelik dağılımları Çizelge 4.7 ve Şekil 4.17-4.18’ de verilmiştir.

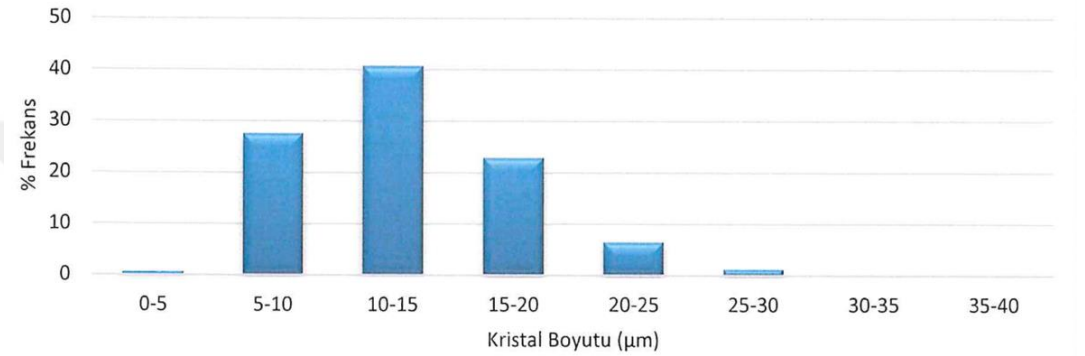
Çizelge 4.7. Mikroskopik Boyut Analiz Sonuçları

| <b>Klinker</b>                                 |               |                                                |               |
|------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------|---------------|
| <b>Alit</b>                                    |               | <b>Belit</b>                                   |               |
| <b>Kristal Boyutu<br/>(<math>\mu m</math>)</b> | <b>Miktar</b> | <b>Kristal Boyutu<br/>(<math>\mu m</math>)</b> | <b>Miktar</b> |
| 0-5                                            | 1.19          | 0-50                                           | 0.65          |
| 5-10                                           | 13.18         | 5-10                                           | 27.59         |
| 10-15                                          | 20.90         | 10-15                                          | 40.73         |
| 15-20                                          | 22.15         | 15-20                                          | 22.84         |
| 20-25                                          | 16.22         | 20-25                                          | 6.47          |
| 25-30                                          | 11.01         | 25-30                                          | 1.29          |
| 30-35                                          | 6.66          | 30-35                                          | 0.22          |
| 35-40                                          | 3.96          | 35-40                                          | 0.22          |
| 40-45                                          | 2.24          | 40-45                                          | 0.00          |
| 45-50                                          | 1.58          | 45-50                                          | 0.00          |
| 50-55                                          | 0.53          | 50-55                                          | 0.00          |
| 55-60                                          | 0.33          | 55-60                                          | 0.00          |
| 60-65                                          | 0.00          | 60-65                                          | 0.00          |
| 65-70                                          | 0.07          | 65-70                                          | 0.00          |
| >70                                            | 0.00          | >70                                            | 0.00          |





Şekil 4.17. Alit kristali boyut dağılımı



Şekil 4.18. Belit kristali boyut dağılımı

#### 4.2. Alternatif Yakıt Kullanımı İle Elde Edilen Klinker Analizleri

Klinker üretiminde alternatif yakıt olarak; %14 oranında ÖTL (Ömrünü tamamlamış lastik), %11 oranında endüstriyel plastik atık, Fosil yakıt olarak; Yerli petrokok: %75 oranında kullanılmıştır. Alternatif yakıt kullanılarak elde edilen klinkerin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.8’de verilmiştir. Klinkerin minerallerine göre kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.8’ a göre; %C<sub>3</sub>S 70.21, % C<sub>2</sub>S 5.22, %C<sub>3</sub>A 7.50, % C<sub>4</sub>AF 10.53, likit faz % 26.35 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.9’ de kristal yapılarına göre oluşan mineral analiz sonuçlarına göre %Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>; 56.60, %Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>; 10.60, %Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> ;3.50, % Ca<sub>2</sub> Fe<sub>1.5</sub> Al<sub>0.5</sub>O<sub>5</sub> ; 14.20, % MgO; 0.90, % CaO; 1.70, % Ca(OH)<sub>2</sub> ;7.0, % K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 2.10 , K<sub>3</sub> Na (SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> ; 4.00 olarak tespit edilmiştir.

Alternatif yakıt kullanılarak üretilen klinkerlerde %Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> azalma, % MgO azalma olup, % Ca<sub>2</sub> Fe<sub>1.5</sub> Al<sub>0.5</sub>O<sub>5</sub> artma, % Ca(OH)<sub>2</sub> artma, % K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, % K<sub>3</sub> Na (SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> artma olmuştur.

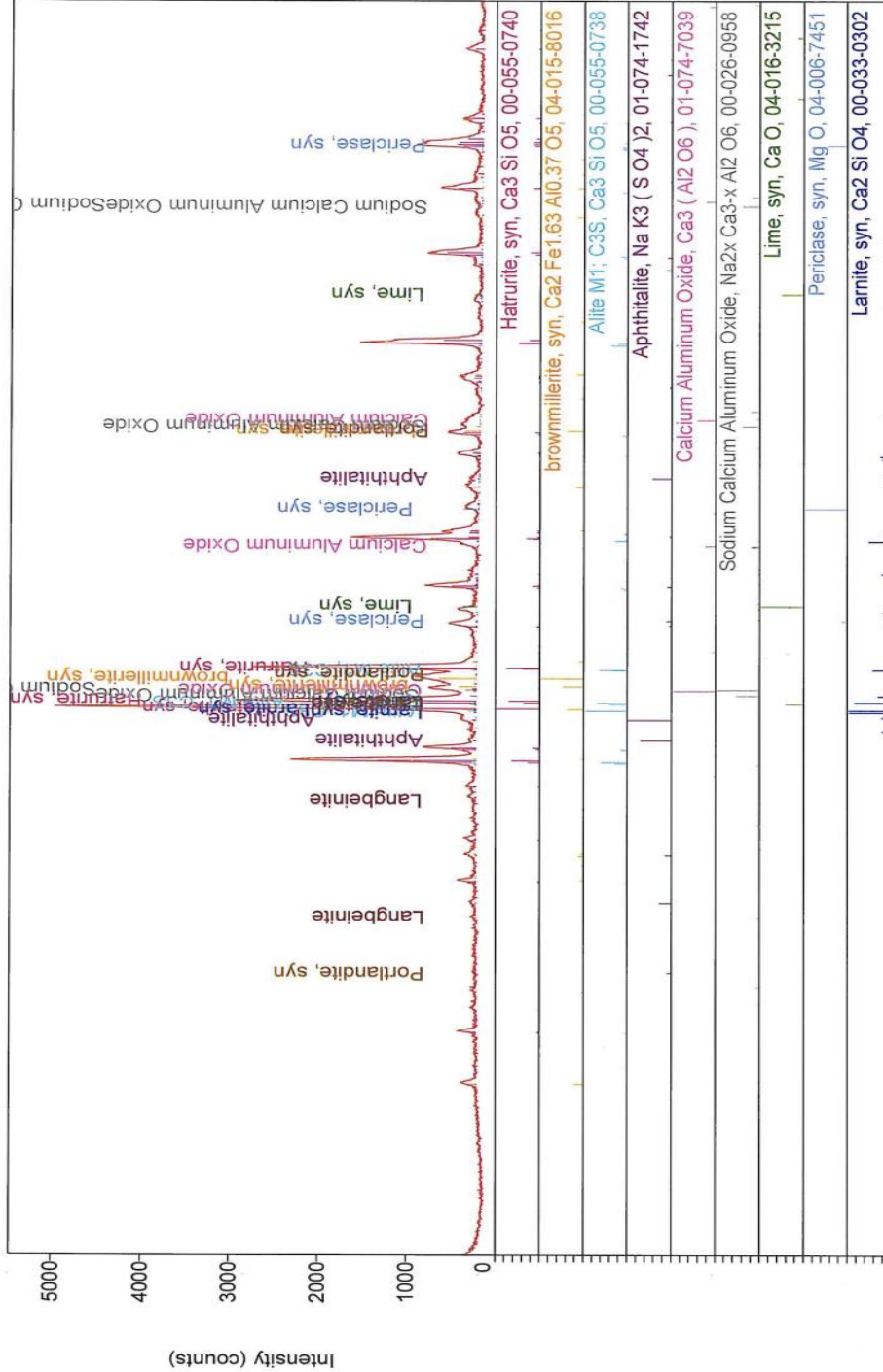
Çizelge 4.8. Klinkerin Özelliklerine Kimyasal Analiz Sonuçları

| Özellik                                                                                                  | Birim | Klinker<br>Günlük | Metot                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------|---------------------------------------------------|
| Kızdırma Kaybı                                                                                           | %     | 0.23              | TS EN 196-2/ EN 196-2                             |
| SiO <sub>2</sub>                                                                                         | %     | 20.28             | TS EN 196-2/ EN 196-2 (XRF Metodu)                |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                           | %     | 5.04              | TS EN 196-2/ EN 196-2 (XRF Metodu)                |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                           | %     | 3.46              | TS EN 196-2/ EN 196-2 (XRF Metodu)                |
| CaO                                                                                                      | %     | 65.32             | TS EN 196-2/ EN 196-2 (XRF Metodu)                |
| MgO                                                                                                      | %     | 2.52              | TS EN 196-2/ EN 196-2 (XRF Metodu)                |
| SO <sub>3</sub>                                                                                          | %     | 1.35              | KKL.TA.12 işletme içi Metod<br>(Spektrofotometre) |
| Na <sub>2</sub> O                                                                                        | %     | 0.34              | TS EN 196-2/ EN 196-2                             |
| K <sub>2</sub> O                                                                                         | %     | 0.84              | TS EN 196-2/ EN 196-2                             |
| Na <sub>2</sub> O Top. Alkali                                                                            | %     | 0.89              | Hesaplama (Calculation)                           |
| Cl                                                                                                       | %     | 0.0079            | TS EN 196-2/ EN 196-2 (XRF Metodu)                |
| Serbest CaO                                                                                              | %     | 0.67              | Glikol Metodu (Asidimetrik)                       |
| KDF                                                                                                      | %     | 100.52            | Hesaplama (Calculation)                           |
| S.M.                                                                                                     | %     | 2.39              | Hesaplama (Calculation)                           |
| A.M.                                                                                                     | %     | 1.46              | Hesaplama (Calculation)                           |
| C <sub>3</sub> S ((CaO) <sub>3</sub> SiO)                                                                | %     | 70.21             | Bogue                                             |
| C <sub>2</sub> S ((CaO) <sub>2</sub> SiO)                                                                | %     | 5.22              | Bogue                                             |
| C <sub>3</sub> A ((CaO) <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )                                    | %     | 7.50              | Bogue                                             |
| C <sub>4</sub> AF ((CaO) <sub>4</sub><br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | %     | 10.53             | Bogue                                             |
| Likit Faz                                                                                                | %     | 26.35             | Hesaplama (Calculation)                           |

Çizelge 4.9. Klinkerin Minerallerine Göre Kimyasal Analiz Sonuçları

| Mineraller                    | Birim | Miktar |
|-------------------------------|-------|--------|
| C <sub>3</sub> S-M3           | %     | 41.00  |
| C <sub>3</sub> S-M1           | %     | 15.60  |
| C <sub>3</sub> S-Toplam       | %     | 56.60  |
| C <sub>2</sub> S              | %     | 10.60  |
| C <sub>3</sub> A - Kübik      | %     | 3.20   |
| C <sub>3</sub> A - Ortorombik | %     | 0.30   |
| C <sub>3</sub> A- Toplam      | %     | 3.50   |
| C <sub>4</sub> AF             | %     | 14.20  |
| Periklaz                      | %     | 0.90   |
| Serbest Kireç                 | %     | 1.70   |
| Portlandit                    | %     | 7.00   |
| Langbeinit                    | %     | 2.10   |
| Aftitalit                     | %     | 4.00   |

XRD cihazından elde edilmiş olan kırınım deseni Şekil 4.19' da verilmiştir. Şekil 4.19.'a göre Portlandit ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), Langbeinit ( $\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$ ), Alit ( $\text{C}_3\text{S}$ ), Periklas ( $\text{MgO}$ ), Aftitalit  $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$ , kireç ( $\text{CaO}$ ) ana mineral parajenezleri olarak ortaya konmuştur.



Şekil 4.19. XRD cihazından elde edilmiş olan kırınım deseni

#### 4.2.1. Mikroyapı İncelemesi

Optik polarize ışık mikroskobunda incelenen klinker granülleri, numune genelini temsil edebilmesi için kabaca kırıcıdan geçirilerek, 1-4 mm' lik elekler yardımı ile elenmiş, bu boyutların

arasında kalan numuneden alınan temsili granüller polyester içerisine gömülerek dondurulmuştur. Donma sonrasında yüzey düzeltme amaçlı olarak zımparalanmış, ardından parlatma işlemi ile minerallerin görünür hale gelmeleri sağlanmıştır. Numune hidroflorik asit buharına tutularak mineraller renklendirilmiştir. Klinker granüllerinin kesitleri incelendiğinde, yeterli pişmeyi gösteren koyu gri granüllere rastlanmıştır. Bu bölümde alternatif kaynaklı klinkerlerin İnce kesit incelemeleri, Ham Karışım Kaynaklı Etkiler, Pişme Sıcaklığı Kaynaklı Etkiler, Fırın Atmosferi Kaynaklı Etkiler, Alev Şekli Kaynaklı Etkiler, Soğutma Hızı Kaynaklı Etkiler, Faz Miktarı Sonuçları, Mikroskopik Boyut Analiz Sonuçları alt başlıkları altında detaylandırılmıştır.

#### ***Ham Karışım Kaynaklı Etkiler***

Farin kompozisyonu, pişmeyi etkileyen faktörlerdendir. Malzemenin kimyasal kompozisyonu, incelik, homojenlik ve pişebilirlik parametreleri hammadde karışımı kaynaklı etkilemektedir.

Klinker numunesinde kübik kristal yapılı  $C_3A$  minerallerine rastlanırken (Şekil 4.20), miktarca daha az olacak şekilde ortorombik kristallere de rastlanmıştır. Alüminatın kübik yapıda olması alkalilerin düşük miktarda bulunduğunu, sülfatlara bağlandıklarını ve az reaktif olduklarını göstermektedir. Alüminat içerisinde alkali oranı yükseldikçe sülfatlaşma oranı azalmakta, malzemenin reaktifliği artarken  $C_3A$  yapısı ortorombik kristal yapılı olmaktadır (Şekil 4.20). Numunede kübik  $C_3A$  kristallerinin iyi kristallermiş olduğu söylenebilir.

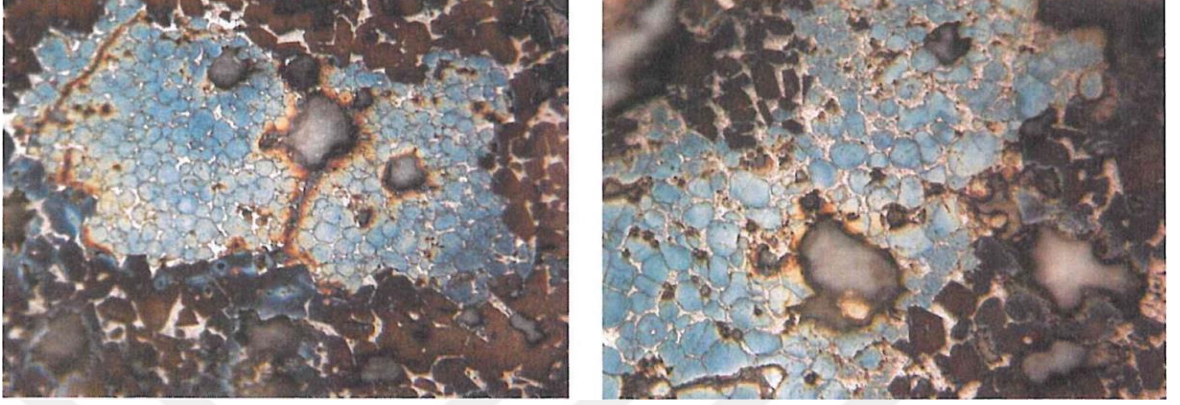


Şekil 4.20. 500x büyütme (kahverengi açık kahverengi kristaller alit, krem rengi zemin üzerindeki gri kristaller  $C_3A$  mineralleridir.

Numunede Belit ( $C_2S$ ) minerallerinin homojen ve dağınık bir görüntü ile yer alması beklenir. Belit( $C_2S$ ) minerallerinin kümelenmiş olması farinde iri taneli kuvars mineralleri



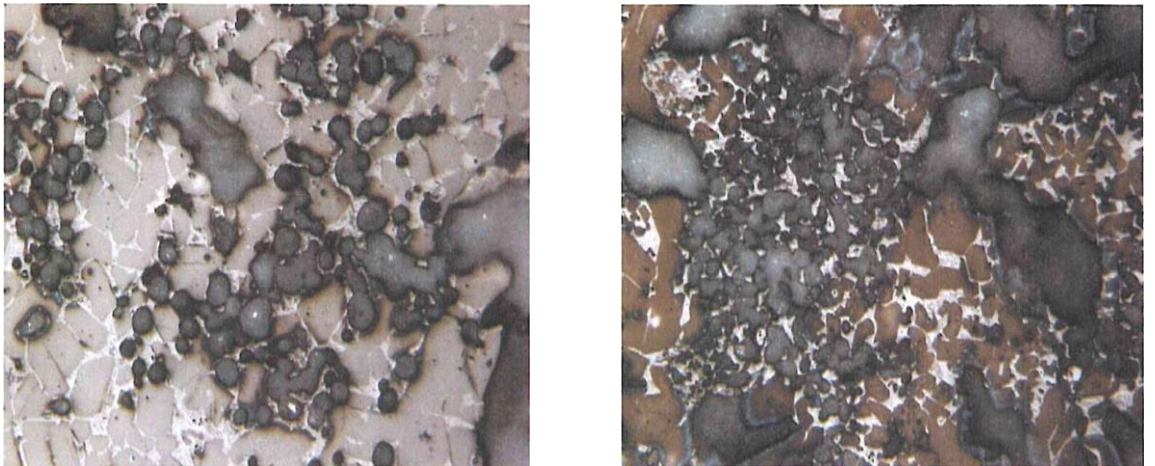
varlığında gerçekleşmektedir. Klinker numunesi incelendiğinde kümeli belit minerallerinin bulunduğu söylenebilir; genel itibariyle homojen belit yapılanmasına daha az rastlanmıştır (Şekil 4.21).



Şekil 4.21. 200x büyütme(kahverengi kristaller alit, mavi kristaller belit mineralleridir kümeli belit görünümü)

#### ***Pişme Sıcaklığı Kaynaklı Etkiler***

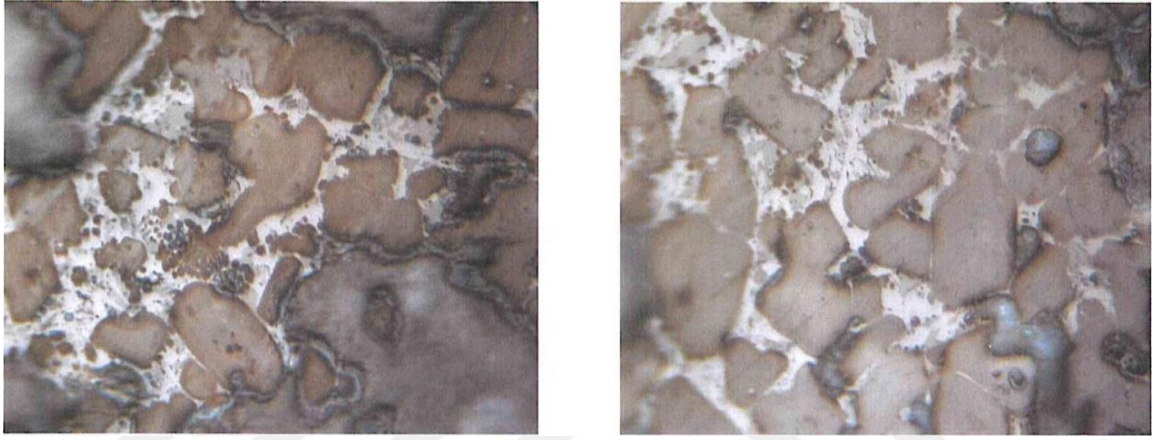
Yakıtların kalorifik değeri ve fırının sıcaklık profili klinkerde sıcaklık kaynaklı etkilere sebep olmaktadır. İyi pişmemiş klinkerler yüksek miktarda boşluklu yapının yanı sıra belit ve serbest kireç kümelenmeleri içermektedir. Ham karışım kaynaklı etkiler bölümünde belirtildiği gibi, klinker numunesinin genel yapısının kümeli belit olduğu ve birbiri ile bağlantılı birleşmiş boşluklar içerdiği gözlemlenmiştir. Serbest kireç değerleri incelendiğinde ise normal seviyelerde ancak kümeli bir yapı göstermiştir (Şekil 4.22). Kümelenmiş serbest kireç kristalleri genleşmeye sebep olabilir. Serbest kireç değerinin normal seviyelerde olması, numunede bulunan belit minerallerinin genel yapılarının homojen belit yapılanmasında olmasına yol açar, incelenen numunede kümeli belit yapısı dağılımı gözlenmiştir. Bu nedenle, bu numunede pişme sıcaklığı kaynaklı olumsuz bir durumun varlığı söz konusu olabilir.



Şekil 4.22. 200x büyütme, siyah yuvarlak kümeli yapılar serbest kireç mineralleri

### ***Fırın Atmosferi Kaynaklı Etkiler***

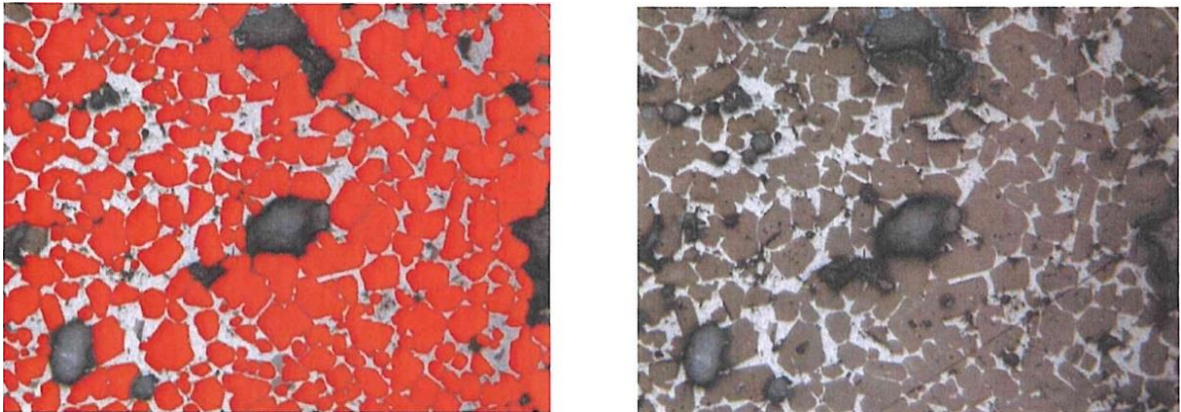
Klinker yatağında indirgen koşulların var olması, farklı yakıt özellikleri (tane boyutu ve yanma davranışı) klinker yapısını etkilemektedir. İndirgen koşulların yavaş klinker soğutması ile birlikte var olması durumunda kristal kafesi içerisine  $Fe^{+2}$  iyonunun yerleşmesi ile  $C_3S$ 'in  $C_2S$ 'e ve serbest kirece ayrışması gerçekleşir. Bu durum çimentonun basınç dayanımında düşmeye veya hacim stabilitesinde değişikliğe sebep olabilir.  $C_4AF$  mineralinin düşük,  $C_3A$  mineralinin yüksek olması ise priz süresini kısaltmaktadır. İncelenen klinker numunesinde;  $C_4AF$  mineralinin  $C_3A$  minerallerinden daha az olması durumuna rastlanmamıştır. (Şekil 4.23). Ancak yine de sayısal veri için mikroskopik analizde miktarsal olarak değer verilememektedir.



Şekil 4.23. 500x büyütme, Kahverengi kristaller alit, krem rengi ( $C_4AF$ ) zemin üzerindeki gri kristaller  $C_3A$  mineralleridir.

### ***Alev Kaynaklı Etkiler***

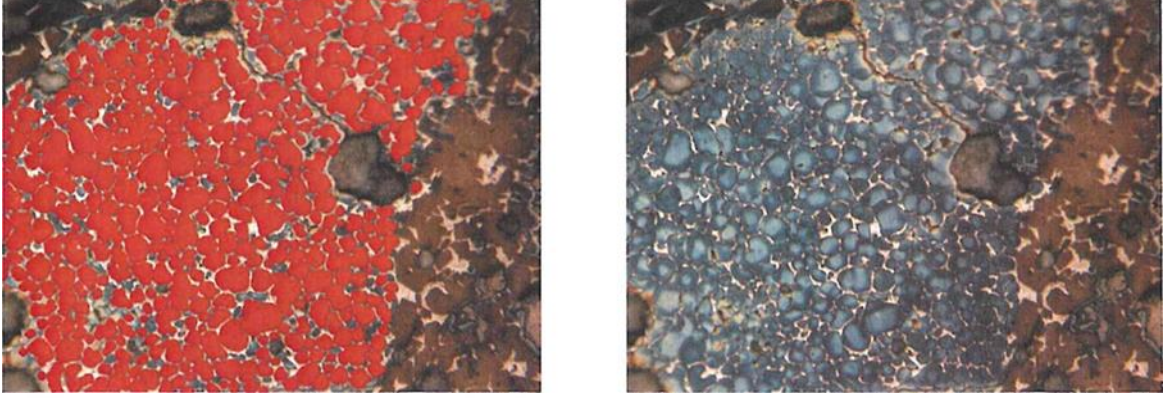
Minerallerin optik mikroskop yardımı ile görsel incelenmesinde, klinker granüllerinde alit kristallerinin idealde 25-35  $\mu$  arasında, belit kristallerinin ise idealde 15-20  $\mu$ m civarında olması beklenir. Kullanılan program vasıtasıyla gerçekleştirilen ayrılmış kristallerdeki boyut analizinde; Alit boyutlarının ortalama 24,29  $\mu$ m, belit boyutlarının ortalama 13,63  $\mu$ m kadar olduğu söylenebilir (Şekil 4.24 ve 4.25).



Şekil 4.24. 200x büyütme (alit boyut seçimi için orijinal foto ve taranmış kopyası)

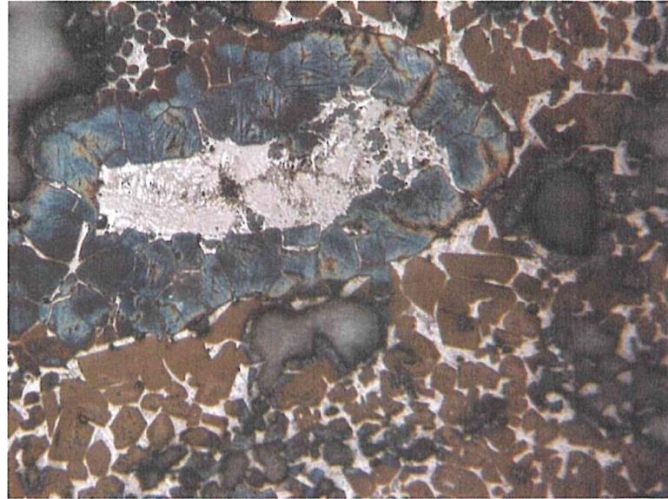


Klinker numunesinde alit ve belit minerallerinin boyutlarının ideal boyut aralığından küçük olduğu görülmektedir. Alit ve belit minerallerinin boyutlarının ideal aralıkta olmaması klinker numunesinin yanma süresinin ideal koşulların dışında olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.25. 200x büyütme belit boyut seçimi için orijinal foto ve taranmış kopyası

Alit kristallerinin genellikle altıgen şekilli ve köşeli yapıda, belit kristalleri ise birbirinden ayrık, dairesel yapıda görülmesi beklenmektedir. İncelenen numunede kristal yapıları ayrılmış ancak yer yer birbirine yapışık ve ayrılmamış olduğu gözlenmiştir. Bununla beraber numunede belit kristalleri için yeterli bir pişmenin göstergelerinden olan çok yönlü lameller gözlenmiştir (Şekil 4.26).



Şekil 4.26. 200x büyütme, mavi kristaller belit, krem rengi zemin üzerindeki gri kristaller  $C_3A$  mineralleridir

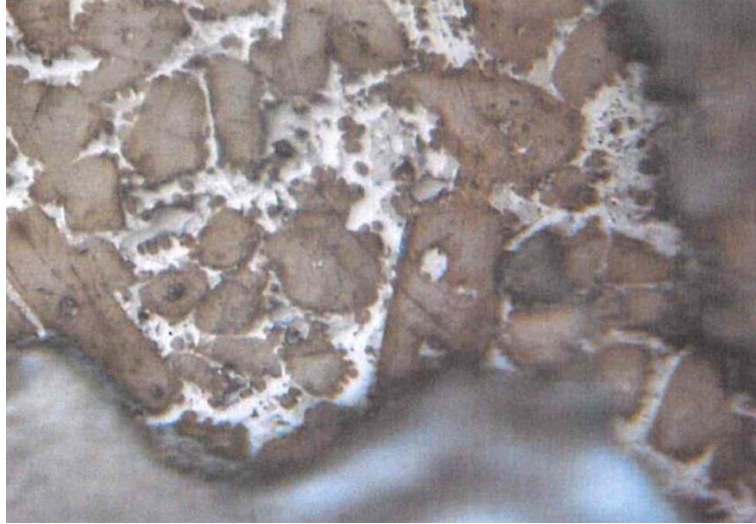
#### ***Soğutma Hızı Kaynaklı Etkiler***

Klinker soğutma sistemi tasarımının yanı sıra, klinkerin kimyasal ve mineralojik kompozisyonuna dayanan etkiler de vardır. Örneğin ikincil belit oluşumu ya da parmak şekilli belit mineralleri bu etkiler kaynaklıdır. Normal veya hızlı soğutma yapıldığında  $C_3S$ 'in köşeli dış

yüzeyinden  $C_2S$  ve  $CaO$  ayrışır.  $C_3A$  oluşumu için gerekli  $CaO$  buradan sağlanırken,  $C_3S$ 'ler çevresinde oluşan belit kenarlıkların kalınlığı, sıvı fazdaki (eriyik)  $C_3A$  içeriğine bağlıdır. Aşınmış belit kristallerinin yüzey yapıları bozularak parmak şeklini alır (Şekil 4.27). Daha ileri seviyede ise alit kristallerini çevreleyen ikincil belit oluşumları gözlenir (Şekil 4.28). Klinker numunesinde fazla miktarlarda ve ikincil belit yapılarının oluşumuna rastlanmıştır.



Şekil 4.27. Klinker belitli görünüm, 200x büyütme



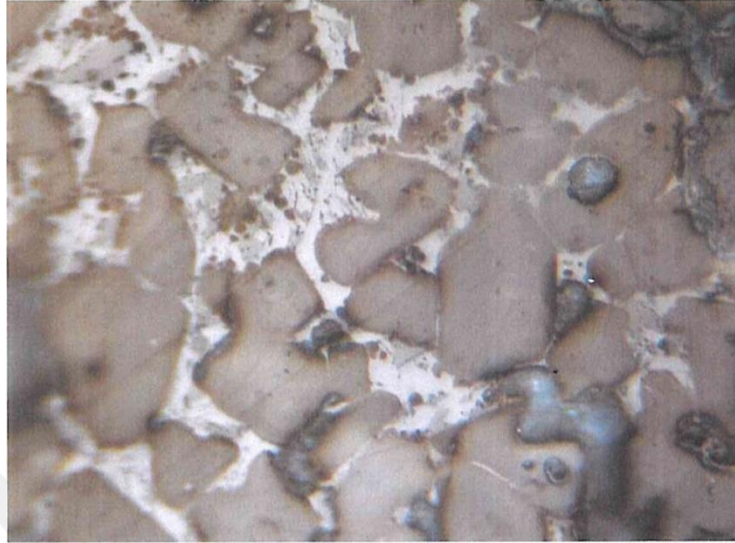
Şekil 4.28. 500x büyütme, alit kenarlarındaki küçük yuvarlak yapılar - ikincil belit görünümü

Ön soğutmanın basınç dayanımı üzerine etkisi vardır. Kalsiyum silikatlar yavaş soğutulmuş ve  $C_3A'$  ca zengin olan klinkerlerde daha az reaktiftirler. Bu durum çimentonun basınç dayanımını düşürücü etki yapabilir. Klinker numunesindeki ikincil belit kristalleri varlığı açısından incelendiğinde, bu yapıya sahip klinkerlerin basınç dayanımlarında düşme görülmesi olasıdır.

Hızlı soğutma yapılması durumunda ara fazların ( $C_3A$  ve  $C_4AF$ ) iyi ayrıştığı,  $C_3A$ 'nın daha yüksek reaktivite gösterdiği bilinmektedir. Klinker numunesinde geneline bakılarak ara fazların



yeterince ayrıştığı, fazların genellikle belirgin bulunduğu gözlenmiş, sıvıfaz belirgin şekilde ayırt edilmiştir (Şekil 4.29).



Şekil 4.29. 500x büyütme, Kahverengi kristaller alit, krem rengi zemin üzerindeki gri kristaller  $C_3A$  mineralleridir, Ayrık sıvıfaz ve ikincil belit görünüm

#### 4.2.2. Faz Miktarı Sonuçları

Boşluk miktarına göre mikroskobik faz tayini ve faz miktar sonuçları Çizelge 4.10. ve 4.11.'de verilmiştir. Çizelge 4.10 ve 4.11'de alternatif yakıtlı klinkerde  $C_3S$  miktarı olumlu gözlemlenmiştir. Bu da alternatif yakıtın proseste verimli yandığını ve soğutmanın verimli çalıştığını göstermiştir.

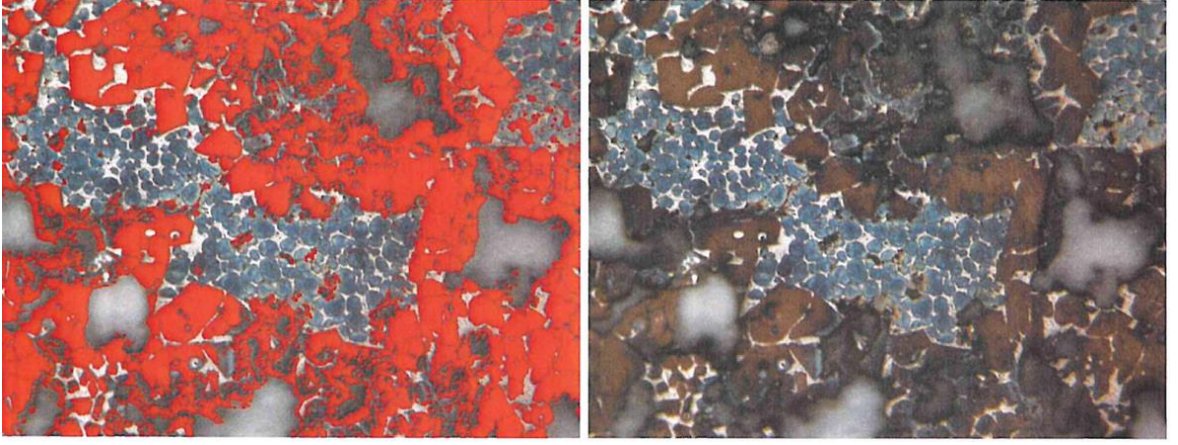
Çizelge 4.10. Mikroskobik Faz Tayini (Boşluk miktarı ile birlikte yüzdesel gösterim)

| Mineral                              | Klinker |
|--------------------------------------|---------|
| $C_3S$ (Alit)                        | 60.98 % |
| $C_2S$ (Belit)                       | 14.75 % |
| $C_3A$ (Alüminat) + $C_4AF$ (Ferrit) | 11.24 % |
| Boşluk                               | 13.03 % |

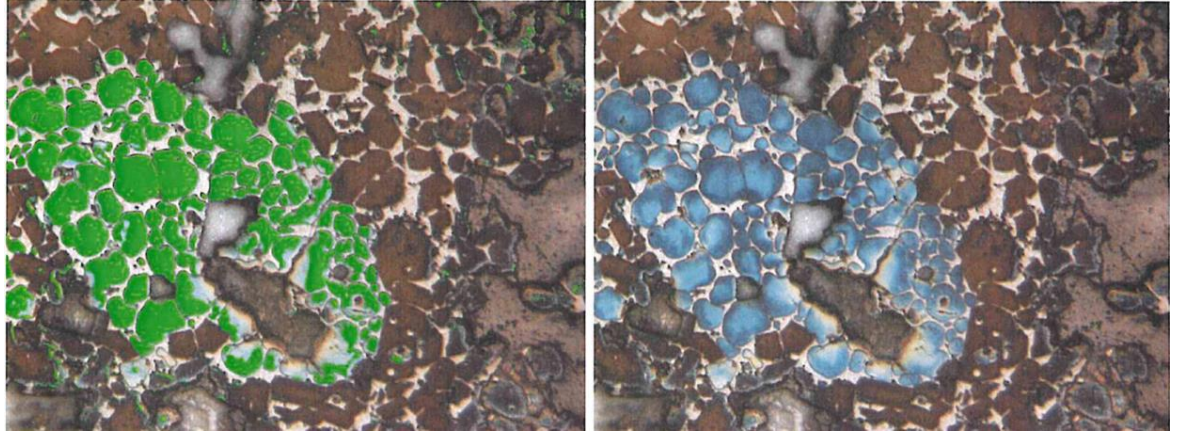
Çizelge 4.11. Mikroskobik Faz Tayini (Boşluk miktarı olmadan yüzdesel gösterim)

| Mineral                              | Klinker  |
|--------------------------------------|----------|
| $C_3S$ (Alit)                        | 70.120 % |
| $C_2S$ (Belit)                       | 16.96 %  |
| $C_3A$ (Alüminat) + $C_4AF$ (Ferrit) | 12.92 %  |

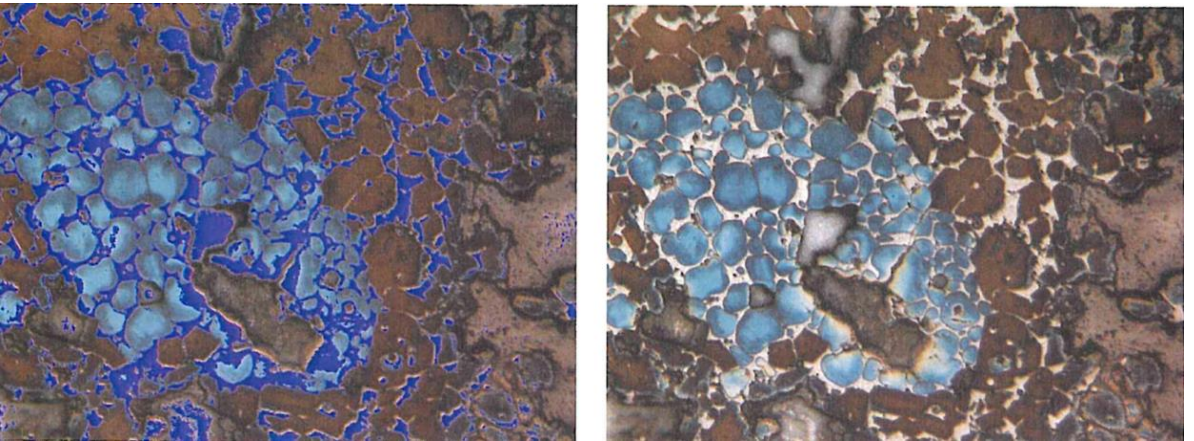
Klinkerde; Alit, Belit, Sıvıfaz ve Boşluk yapılarının taranmış ve orijinal görüntüleri Şekil 4.30, Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33’de verilmiştir.



Şekil 4.30. 100x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış alit görünümü)

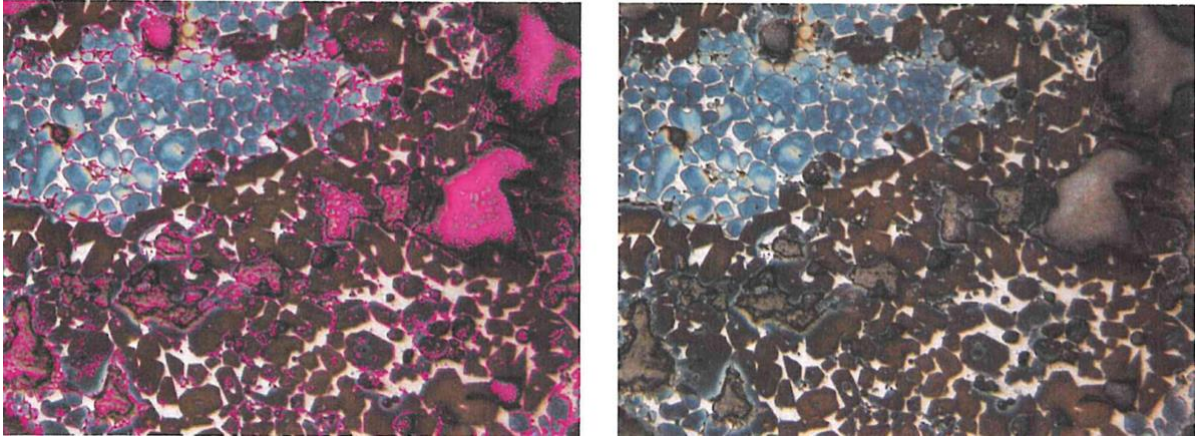


Şekil 4.31. 200x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış belit görünümü)



Şekil 4.32. 200x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış sıvıfaz görünümü)





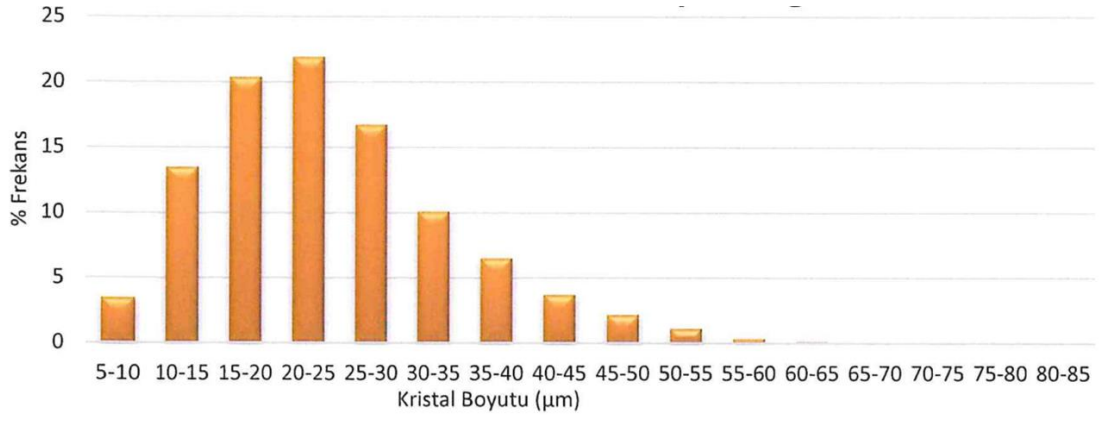
Şekil 4.33. 200x büyütme (orijinal ve tarama yapılmış boşlukların görünümü)

#### 4.2.3. Mikroskobik Boyut Analiz Sonuçları

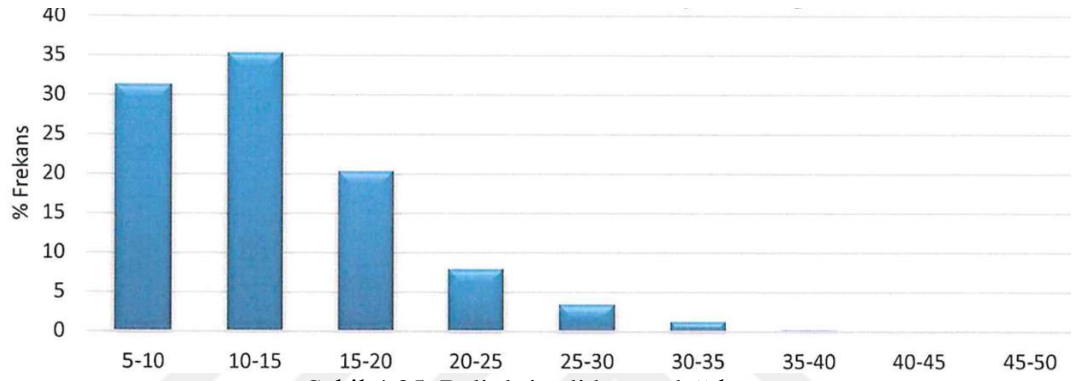
Klinkerleşme içerisindeki Alit ( $C_3S$ ) ve Belit ( $C_2S$ ) minerallerinin boyutsal analizleri ve yüzdelik dağılımları Çizelge 4.12’de verilmiştir. Tane boyut dağılımları Şekil 4.34 ve 4.35’deki grafiklerde verilmiştir.

Çizelge 4.12. Mikroskobik Analiz Sonuçları

| Klinker Numunesi           |        |                            |        |
|----------------------------|--------|----------------------------|--------|
| Alit                       |        | Belit                      |        |
| Kristal Boyutu ( $\mu m$ ) | Miktar | Kristal Boyutu ( $\mu m$ ) | Miktar |
| 0-5                        | 0.00   | 0-5                        | 0.00   |
| 5-10                       | 3.45   | 5-10                       | 31.33  |
| 10-15                      | 13.46  | 10-15                      | 35.36  |
| 15-20                      | 20.35  | 15-20                      | 20.33  |
| 20-25                      | 21.91  | 20-25                      | 7.93   |
| 25-30                      | 16.71  | 25-30                      | 3.45   |
| 30-35                      | 10.08  | 30-35                      | 1.28   |
| 35-40                      | 6.50   | 35-40                      | 0.26   |
| 40-45                      | 3.71   | 40-45                      | 0.00   |
| 45-50                      | 2.15   | 45-50                      | 0.06   |
| 50-55                      | 1.11   | 50-55                      | 0.00   |
| 55-60                      | 0.33   | 55-60                      | 0.00   |
| 60-65                      | 0.13   | 60-65                      | 0.00   |
| 65-70                      | 0.07   | 65-70                      | 0.00   |
| >70                        | 0.07   | > 70                       | 0.00   |



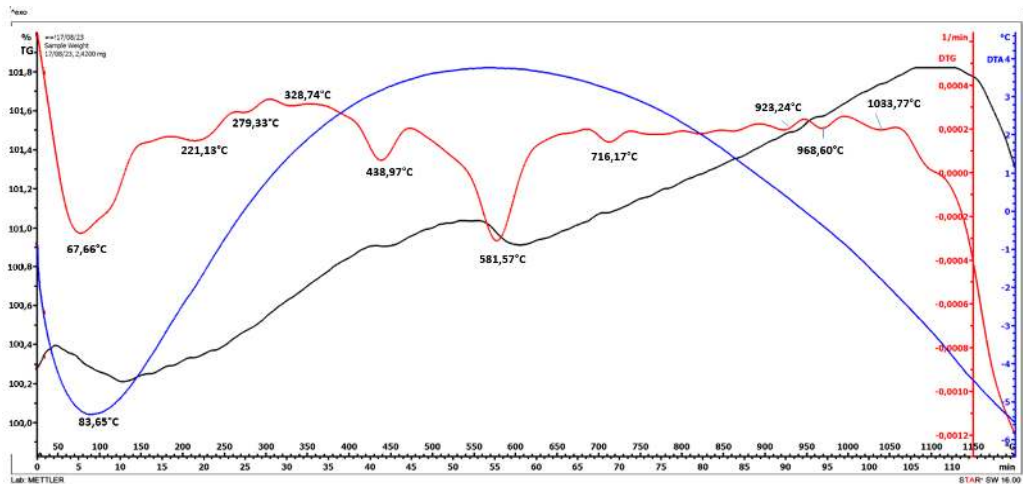
Şekil 4.34. Alit kristali boyut dağılımı



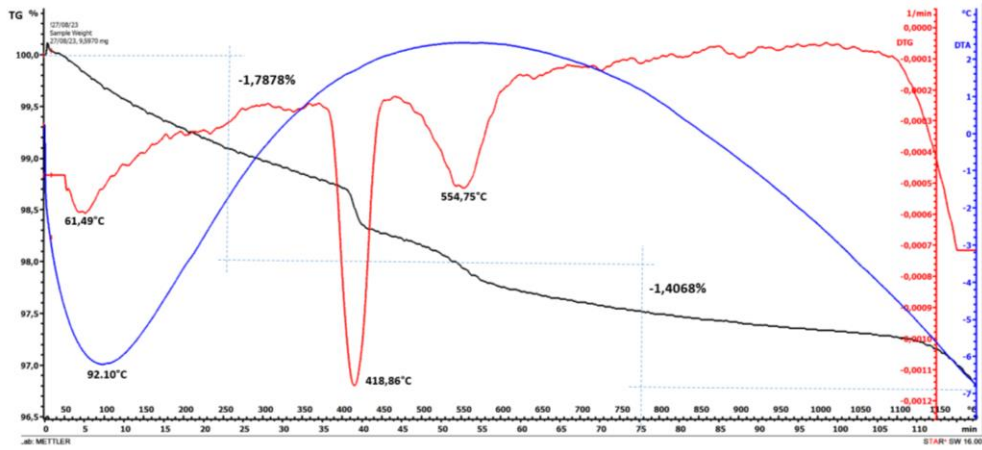
Şekil 4.35. Belit kristali boyut dağılımı

#### 4.3. TGA-DTA Analiz Sonuçları

Çalışma kapsamında Klinker örneklerinin sıcaklık artışına karşılık kaybettiği (%) ağırlık miktarını belirlemek amacı ile Termogravimetrik Diferansiyel Analiz (TGA-DTA) analiz yapılmıştır. Numuneler etüvde 105°C’de bekletilerek kurutulmuş ve agat havanda -65µm boyutuna öğütülmüştür. Analiz, Mettler Toledo marka TGA/DSC 3+ model cihaz kullanılarak 25- 1200 °C arasında, azot atmosferde ve 10 °C/dk ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir. TGA-DTA analiz eğrisi Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de verilmiştir.



Şekil 4.36. 17.08.2023 kodlu örneğin TG-DTA eğrisi



Şekil 4.37. 27.08.2023 kodlu örneğin TG-DTA eğrisi

Her iki numunede de 25-100°C aralığında yüzeye tutunan suyun buharlaşması ve ardında alçının (gypsum) içerdiği 2 mol suyun 0,5 molünün dehidratasyonun başlangıcı tespit edilmiştir. Alçının bozunumu kademe kademe 200-250°C aralığına dek devam etmektedir. 100-150°C aralığında etrenjit fazının ve kalsiyum silikat hidratın (C-S-H) ve hemen ardından 150-200°C aralığında monosülfatın ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ :  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_{12}$ ) dekompozisyonları başlamaktadır.

Çizelge 4.13. 27/08/2023 ve 17/08/2023 gün çıkışlı örneklerin sıcaklık aralıklarında belirlenen kütle değişim değerleri (ağ.%)

|             |        |          | Sıcaklık Aralıklarında Belirlenen Kütle Değişim Değerleri (ağ.%) |           |           |           |           |           |           |           |            |             |             |                           |
|-------------|--------|----------|------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|---------------------------|
| Numune Kodu |        | 25-100°C | 100-200°C                                                        | 200-300°C | 300-400°C | 400-500°C | 500-600°C | 600-700°C | 700-800°C | 800-900°C | 900-1000°C | 1000-1100°C | 1100-1200°C | 25-1200°C<br>Toplam Kütle |
| 27.08.2023  | (ağ.%) | -0,329   | -0,385                                                           | -0,314    | -0,260    | -0,556    | -0,403    | -0,147    | -0,115    | -0,083    | -0,073     | -0,063      | -0,469      | -3,195                    |
| 17.08.2023  |        | -0,018   | +0,039                                                           | +0,225    | +0,303    | +0,153    | -0,085    | -0,157    | +0,164    | +0,193    | +0,220     | +0,172      | -0,511      | +1,031                    |

Bu sıcaklık aralığında alümina miktarına bağlı olarak malzeme içerisinde oluşan çeşitli kalsiyum aluminatlı fazların ardışık olarak bozunması meydana gelmektedir. Ayrıca numune içerisinde yer alan organik malzemeler ve uçucu bileşenler 300-400°C arasında uzaklaşır. Tane boyutuna bağlı olarak 400°C'ye kadar alüminanın gipsit, böhmit, bayerit fazlarının dönüşümü başlar ve bu dönüşümler 500-550°C'ye dek sürmektedir. 400-450°C aralığında periklasın (MgO) ve brusit ( $\text{MgOH}_2$ )'in hidratasyon pikleri görülmektedir. Üretim esnasında ortamda bulunan karbondioksit varlığına bağlı olarak hidrotalsit ( $\text{M}_6\text{A} \cdot \text{C} \cdot \text{H}_{12}$ ) fazının meydana gelmesi halinde 450-500°C aralığında pikler görülmektedir. Bu fazların kompozisyon olarak birbirine yakınlığı, tane boyutu ve ısıtma

hızının da etkisiyle birlikte her bir fazın meydana getirdiği piklerin kesin sıcaklıklarının verilmesini zorlaştırmaktadır. 550°C'den başlayarak 800°'e kadar kalsitin vaterit ve aragonit fazlarının dönüşümleri ve ardından dekarbonizasyonu ve magnezyum karbonatın bozunması pikler oluşturmaktadır. 27.08.2023 kodlu numunenin TG/DTA eğrisi ve 25-1200°C arasındaki kütle değişimlerine bakıldığında numune ısıtıldıkça kütlenin azaldığı görülmektedir. Toplam kütle kaybı ağı. (-)%3,195 olarak tespit edilmiştir. Kütle kaybı 3 basamakta gerçekleşmiştir. DTG eğrisinde yaklaşık 61, 418 ve 554°C'sıcaklıklarda pikler gözlemlenmiş olup literatür ile uyumludur. 17.08.2023 kodlu numunenin TG/DTA eğrisi ve 25-1200°C arasındaki kütle değişimlerine bakıldığında numune ısıtıldıkça numunenin kütlesinin çeşitli sıcaklık aralıklarında artıp azaldığı görülmektedir. TG(%) eğrisi artma eğilimi sergilemiş ve toplam kütle değişimi ağı. (+)%1,031 olarak belirlenmiştir. DTG eğrisi incelendiğinde 67, 221, 279, 328, 438, 581, 716, 923, 968 ve 1033°C'lerde piklerin varlığı dikkat çekmektedir. 923 °C sıcaklıktaki pik trikalsiyum silikatın(alitin) triklinik formdan monoklinik forma geçişini ifade etmektedir. Literatürde 980 °C'de görülen dönüşüm pikinin daha düşük sıcaklıklarda meydana gelmiş olabileceği düşünülmektedir. Bu sıcaklık alitin monoklinik formdan trigonal forma veya önce triklinik, sonra trigonal forma dönüşmesini ve rotasyon yapmasını ifade etmektedir. Ayrıca 960°C'de gama belitin ( $\gamma$ -C<sub>2</sub>S)'in beta belite ( $\beta$ -C<sub>2</sub>S) dönüştüğü bilinmektedir. Isıl analiz yöntemlerinin destekleyici analiz olması sebebiyle kesin bir sonuç vermek için X-ışını difraktometresi ile desteklenmesi gerekmektedir. Ayrıca demir içeren kireç taşlarının, kaolenit, illit ve montmorillonit hammaddelerinin kullanımında da benzer pikler olduğu ifade edilmiştir. Atık plastikin yakıt olarak kullanılması durumu dikkate alındığında, polimerik malzemeler en fazla 300-400°C'ye kadar dayanım sergilemekte ve hızlıca kütle kaybı olmaktadır. Ancak analizin yapıldığı cihazın içerisindeki süpürme gazı (purge gas, azot) debisinin yeterli olmadığı durumlarda bozunan malzemelerin bileşenleri- buharı, analizi yapılan numunelerin yüzeyine tekrar tutunabilir, kısmi basınç oluşturabilir ve bağ kurabilir. Ayrıca bu atık plastiklerin üretimi esnasında kullanılan killer ve kirecin de bozunma bileşenleri ile reaksiyon oluşturarak kütlenin artmasına neden olmuş olabileceği düşünülmektedir. Bu durumda yukarıda sözedildiği şekilde DTA eğrisinin değerlendirilmesi dikkate alınmaktadır.

#### 4.4.Fiziksel Testler

Bu tez çalışmasında Fosil yakıtlı ve Alternatif yakıtlı klinker numuneleri üzerinde, donma, blaine, su ihtiyacı, basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir.

Çimento üretiminin en önemli parametresi dayanımdır. Tüm proses bu parametre üzerine kurgulanmıştır. Fosil yakıt fiyatlarının yükselmesi ile fabrikaların alternatif yakıtlara olan yönelimleri aslında bir nevi dayanım parametresini de tehdit etmektedir. Bu bağlamda atığın doğru bir kurgu ile yakılması dayanımı oldukça fazla etkilemektedir. Bu tez çalışmasında alternatif yakıtlı ve yakıtsız klinkerlerin 2-7-28 günlük dayanımları incelendiğinde fazla bir fark olmamakla birlikte Çizelge 4.14'e göre minimum 1 MPa kadar bir fark oluştuğu görülmektedir.

Çizelge 4.14. Dayanım, Kızdırma Kaybı, İncelik ve Öğünme Süresi Analizleri

| Klinker Analizleri | Donma Başlangıç Süresi (dk) | Donma Bitiş Süresi (dk) | Su ihtiyacı (%) | Le Chatelier | Kızdırma Kaybı | Blaine | 2 gün (Mpa) | 7 gün (Mpa) | 28 gün (Mpa) | Öğünme Süresi (dk) |
|--------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------|--------------|----------------|--------|-------------|-------------|--------------|--------------------|
| Alternatif Yakıtlı | 130                         | 185                     | 24.0            | 1.0          | 0.20           | 3241   | 29.2        | 39.8        | 46.2         | 22.40              |
| Fosil Yakıtlı      | 125                         | 180                     | 24.6            | 1.0          | 0.12           | 3210   | 30.0        | 40.3        | 47.4         | 23.00              |

Bu tez çalışmasında donma başı ve sonu süreleri her iki klinker numunelerinde de birbirine yakın olarak gerçekleşmiştir. Bu da blaine değerlerinin birbirine yakın (düşük) olması ile su ihtiyacı değerini düşük olarak çıkarmıştır.

Öğünme değirmeninde hesaplanan öğünme süresinde her iki klinker numunelerinde birbirine yakın sürelerde gerçekleşmiştir. Öğünmeyi etkileyen parametre Serbest kireç ve  $SO_3$  miktarıdır. Yüksek serbest kireçli klinkerlerin öğünme süreleri daha kısa sürede gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Alternatif yakıtlı numunenin serbest kireci alternatif yakıtsız numuneye göre yüksek olduğu için öğünme süresi daha erken sürede gerçekleşmiştir.

Bu tez çalışmasında alınan numunelerdeki elek analizleri Çizelge 4.15'te verilmiştir. Blaine değerleri birbirine yakın olan her iki numunenin elek analizlerinde de birbirine yakın ölçümler elde edilmiştir.

Çizelge 4.15. Elek Analiz Sonuçları

| Klinker Analizleri  | 32mm | 45mm | 90mm | 1 mm Elek Üstü% | 5 mm Elek Üstü% | 10 mm Elek Üstü% | 19 mm Elek Üstü% | 25 mm Elek Üstü% | 32 mm Elek Üstü% |
|---------------------|------|------|------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Alternatif Yakıtlı  | 29.7 | 19.1 | 4.9  | 79.2            | 57.8            | 37.5             | 15.3             | 3.0              | 0.00             |
| Alternatif Yakıtsız | 38.1 | 19.8 | 4.3  | 79.0            | 58.6            | 37.4             | 18.3             | 5.5              | 0.8              |

Klinker minerolojisinin en önemli parametreleri Çizelge 4.16'da yer alan klinker fazlarıdır. Tüm mikroyapıyı bu fazlar oluşturuyor diyebiliriz. Silikat modülü için genelde çalışma aralığı 2.35-2.45 aralığındadır. Tez çalışmasında alınan numunelerde alternatif yakıtsız numunenin S.M değerinin alternatif yakıtlı numuneye göre ve çalışma şartlarına göre de yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ilgili günde fırın içerisinde meydana gelen kemerleşmenin silis oranının yükseltilmesi ile düşürülmeye çalışılmasıdır.



Çizelge 4.16. Klinker Fazları, Modülleri ve Likit Faz Oranları

| Klinker Analizleri  | S.M  | A.M. | Kireç Doygunluk Faktörü | C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF | Likit Faz (Sıvı Faz) |
|---------------------|------|------|-------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| Alternatif Yakıtlı  | 2.37 | 1.45 | 99.22                   | 62.97            | 11.09            | 7.56             | 10.71             | 26.85                |
| Alternatif Yakıtsız | 2.66 | 1.54 | 99.51                   | 65.71            | 9.60             | 7.29             | 9.28              | 25.00                |

C<sub>3</sub>S fazının klinkerde dayanımı etkilediği için genelde 58-62 aralığında çalışılması istenir. 62< üzerinde çalışılması demek aslında daha fazla yakıt tüketimi demektir ve en yüksek CaO oranlı hammaddelerin kullanılması demektir. Klinker üretim maliyetini arttıran bir durumdur. Alternatif yakıtsız klinker üretiminde C<sub>3</sub>S değeri alternatif yakıtsıza göre yüksektir ve fosil yakıt tüketimininde yüksek olduğunu göstermiştir. C<sub>3</sub>S'in yüksek olması daha yüksek dayanım anlamında da gelmektedir. Fakat alternatif yakıtlı klinker numunesindeki C<sub>3</sub>S değeri de çalışma aralığında kaldığı için alternatif yakıtın dayanıma olumsuz bir etkisinin olmadığını da göstermiştir. Diğer fazlar da her iki numune için çalışma aralığındadır.

Likit faz fırının dış kabuğundaki mantoyu koruyan ve içinde örülü olan refrakter tuğlaların çalışma ömrü için oldukça önemli parametredir. 25-28 aralığında çalışması ideal koşulları gösterir. Likit fazı etkileyen en önemli oksit MgO'dir. Hammadde içerisinde MgO değeri yüksek ise likit faz ile ayarlanır. Döner fırın içerisinde pişme esnasında 3 oksit ve alkaliler fırında likit fazı oluşturarak daha yüksek sıcaklıklarda oluşan C<sub>3</sub>S'ı daha düşük bir sıcaklıkta oluşmasına sebebiyet verir. Likit faz yüksek olur ise fırın içerisinde kemerleşme meydana gelir. Düşük olması durumunda ise pişme zorlaşır, yakıt tüketimi artar ve maliyet artışları gerçekleşir.

Alınan numune örneklerinin ilgili günlerinin spesifik enerjileri Çizelge 4.17'de verilmiştir. Alternatif yakıtlı ile üretilen klinker döner fırınında spesifik enerjilerin ve kalori tüketimlerinin alternatif yakıtsız klinker üretimine göre bir miktar yüksek olduğu görülmüştür. Bu değerler sadece alternatif yakıtla bağlı değildir. Fırın çalışma şartları esnasında yaşanabilecek arızalar da bu değerlerde değişkenliklere neden olabilir.

Çizelge 4.17. Spesifik Enerji Tüketimleri

| Spesifik Enerji Tüketimleri                        | Alternatif Yakıtlı Klinker | Fosil Yakıtlı Klinker |
|----------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| İlgili Günde Toplam Klinker Üretimi (Ton)          | 5750                       | 5780                  |
| Fırın Spesifik Enerji Tüketimi (Kwh/Ton Klinker)   | 44.44                      | 43.45                 |
| Klinker Spesifik Enerji Tüketimi (Kwh/Ton Klinker) | 70.99                      | 70.81                 |
| Döner Fırın Kalori Tüketimi (Kcal/kg klinker)      | 876                        | 833                   |

#### 4.5.Alternatif Yakıt Kullanımından Dolayı Yapılan Karlılık-Maliyet Hesabı

Alternatif yakıt kullanımından kaynaklı olarak yapılacak karlılık hesaplarında tüm yakıt girdileri dahil edilerek hesaplamalar yapılır. Karlılığa en çok etki eden parametre alternatif yakıtın kalorifik değeri ile beraber klinker üretimi esnasında yanma verimliliğinden dolayı artış gösteren tüketim miktarıdır.

Örnek bir hesaplama metodolojisi aşağıdaki gibi yapılmaktadır;

Bir döner fırın işletmesi ay sonunda 933.21 kcal/kg klinker ile üretim yapmıştır. Üretim esnasında fosil yakıtlar ve alternatif yakıtlar kullanılmıştır. Bu döner fırın ay sonunda 98.000 ton klinker üretimi yapmıştır. Bütçeye göre alternatif yakıt kullanımı ile kar analiz sonucu aşağıda verilmiştir. Bütçe-Gerçekleşen Klinker Üretiminde Fosil ve Alternatif Yakıt Tüketimleri karşılaştırılmalı olarak hesaplanmıştır.

Rakamlar olası değerler olarak verilmiştir.

##### Bütçe;

Yakıt Tüketim Maliyeti: 100.35 TL/Ton Klinker

Fırın Kalorisi: 902.56 kcal/ton klinker

TL/ M kalori: 111.18 TL

Alternatif Yakıt Kullanım Oranı: %22

##### Gerçekleşen;

Çizelge 4.18 de görüldüğü üzere Fosil ve Alternatif Yakıtların kalorifik maliyetlerinin klinker üretiminde kullanım oranlarına bağlı olarak gerçekleşen karlılık hesap tablosu görülmektedir.

Çizelge 4.18. Klinker Üretiminde Fosil ve Alternatif Yakıt Tüketimleri

| Yakıt Türü                    | Kullanım Oranı | K.Kalori/<br>Kg | TL/M.Kalori | Tüketim Oranı (%) | K.Kalori/<br>Kg klinker | TL/M.Kalori | TL/Ton Klinker |
|-------------------------------|----------------|-----------------|-------------|-------------------|-------------------------|-------------|----------------|
| Petrokok                      | %              | 8,291           | 0.09275     | 7.95              | 74.23                   | 121.8       | 6.88           |
| Millileştirilmiş ithal        | %              | 6,763           | 0.08031     | 8.55              | 79.78                   |             | 6.41           |
| İthal Kömür                   | %              | 6,770           | 0.13093     | 62.43             | 582.59                  |             | 76.28          |
| Yerli                         | %              | 5,010           | 0.11847     | 0.02              | 0.14                    |             | 0.02           |
| Doğalgaz                      | %              | 8,563           | 0.22284     | 0.17              | 1.58                    |             | 0.35           |
| Plastik Kontamine Atık        | %              | 4,306           | 0.10040     | 0.17              | 1.60                    | 39.5        | 0.16           |
| Tehlikeli Endüstriyel Plastik | %              | 4,151           | 0.05044     | 2.00              | 18.71                   |             | 0.94           |
| Aritma Çamuru                 | %              | 2,066           | 0.01089     | 8.15              | 76.09                   |             | 0.83           |
| Atık Yağ                      | %              | 6,500           | 0.06223     | 4.55              | 42.47                   |             | 2.64           |
| Mobilya Atığı                 | %              | 3,536           | 0.04953     | 0.25              | 2.37                    |             | 0.12           |
| Atık Lastik                   | %              | 6,200           | 0.05595     | 5.75              | 53.65                   |             | 3.00           |
| Toplam                        |                |                 |             | 100.0             | 933.21                  | 104.62      | 97.64          |

Çizelge 4.19’da klinker üretiminde fosil ve alternatif yakıttan yapılan karlılık hesabı verilmiştir.

Çizelge 4.19. Klinker Üretiminde Fosil ve Alternatif Yakıttan Yapılan Karlılık Hesabı

|                                                  |                |                  |
|--------------------------------------------------|----------------|------------------|
| Plan Alternatif Yakıt Kullanım Oranı             | %              | 22,0%            |
| Gerçekleşen Alternatif Yakıt Kullanım Oranı      | %              | 20,9%            |
| Plan-Gerçekleşen Fark                            | %              | -1,1%            |
| Planlanan Klinker Yakıt Maliyeti                 | TL/Ton Klinker | 100,35           |
| Gerçekleşen Klinker Yakıt Maliyeti               | TL/Ton Klinker | 97,64            |
| Düşüş Miktarı                                    | TL/Ton Klinker | 2,71             |
| Klinker Üretimi                                  | Ton            | 98.000           |
| Karlılık                                         | TL             | <b>265.751</b>   |
| Alternatif Yakıt Yakma Kalori                    | Kcal/kg kl     | 195              |
| Kömür ve Alternatif Yakıt Maliyet Farkı          | TL/Mcal        | 82,3             |
| Alternatif Yakarak Yapılan tasarruf              | TL/Ton klinker | 16,0             |
| Alternatif yakıt Kullanımından Sağlanan Karlılık | TL             | <b>1.572.509</b> |

#### 4.6.Baca Gazı Emisyon Gösterge Durumu (Poliaromatik Hidrokarbonlar)

Yapılan tez çalışmasında baca gazlarında meydana gelen özellikle poliaromatik hidrokarbon gibi zehirli gazların yılda 2 kez yapılan ölçümler neticesinde, toplanan numune dönemlerine denk gelen sonuçlarında olumsuz bir duruma rastlanılmamıştır.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, çimento fabrikalarında yarı mamul olarak üretilen klinkerde pişirme esnasında tüketilen fosil yakıtlara (Petrokok, Linyit) ikame olan alternatif yakıt atıklarının (Ömrünü tamamlamış lastikler, endüstriyel plastikler vb.), klinker kalitesine olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla klinker üretiminde %100 olarak tüketilen fosil yakıtların kullanımı %75 oranına indirilmiş, %14 kırılmış ömrünü tamamlamış lastik ve %11 Endüstriyel Plastik Atık atıklar yakılarak klinker üretimi gerçekleştirilmiştir. Alternatif yakıtlı ile üretilen klinker ve %100 fosil yakıt ile üretilen klinkerler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Çalışma kapsamında üretilen alternatif yakıtlı ve alternatif yakıtsız klinkerler EN 197 kalite standardı kapsamında üretilmiştir.
2. Çalışma kapsamında alınan numunelerde (alternatif yakıtlı ve fosil yakıtlı) kükürt değeri birbirlerine yakın ( $<1$ ) çıkmıştır. Çok düşük olmadıklarından dolayı alkaliler ile olumlu bağ kurmuşlardır.
3. Klinker dayanımına etki eden bir diğer gösterge serbest kireç değeridir. %2 üzeri serbest kireçler dayanımı olumsuz etkilemektedir. Her iki numunede de çalışılabilir aralıkta gözlemlenmiştir.
4. Her iki numunenin  $C_3S$  değerlerinin klinker dayanımına olumsuz etkisi gözlemlenmemiştir.
5. Fosil ve alternatif yakıt kullanılan numunelerin incelemesinde ham karışım kaynaklı kübik kristal yapılı  $C_3A$  minerallerine rastlanılmıştır.  $C_3A$  yapısı ortorombik ve iyi kristallenmiş olarak gözlemlenmiştir.
6. Fosil ve alternatif yakıtlı numunelerin incelemesinde kümeli belit yapılarına rastlanmıştır. Bu da boşluklu yapının bir miktar fazla olmasını ifade eder ve pişmede bir miktar verimsizliğin olduğunu göstergesidir.
7. Her iki numunede soğutma hızı kaynaklı ikincil belit minerallerine rastlanmamıştır.
8. Her iki numune de soğutma hızı yüksek olması ile ara fazların ( $C_3A$  ve  $C_4AF$ ) iyi ayrıştığı ve fazlar daha belirgin hale ulaşmıştır. Alternatif yakıtlı klinkerde sıvı fazın daha iyi ayrıştığı gözlemlenmiştir.
9. Minerallerin optik mikroskop yardımı ile görsel incelenmesinde, klinker granüllerinde alit kristallerinin idealde 25-35  $\mu m$  arasında, belit kristallerinin ise idealde 15-20  $\mu m$  civarında olması beklenir. Fosil yakıtlı numune de bu durum alit için 20  $\mu m$ , belit için 13.12  $\mu m$ , alternatif yakıtlı numunede ise alit 24.29  $\mu m$ , belit 13.63  $\mu m$  tespit edilmiştir.
10. TGA/DTA analizlerinde Her iki numunede de 25-100°C aralığında yüzeye tutunan suyun buharlaşması ve ardında alçının (gypsum) içerdiği 2 mol suyun 0,5 molünün

dehidratasyonun başlangıcı tespit edilmiştir. Alçının bozunumu kademe kademe 200-250°C aralığına dek devam etmektedir. 100-150°C aralığında etrenjit fazının ve kalsiyum silikat hidratın (C-S-H) ve hemen ardından 150-200°C aralığında monosülfatın ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ :  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_{12}$ ) dekompozisyonları başlamaktadır.

11. Döner fırın klinker üretiminde alternatif yakıtlı üretimlerin alternatif yakıtsız üretimlere göre yaklaşık %10-15 arasında üretim kaybı yaşattığı gözlemlenmiştir.
12. Alternatif yakıtlı beslemelerde döner fırın spesifik enerjisini 1-1.5 kwh/ton artışına neden olmuştur.
13. Alternatif yakıt beslemelerinde siklon tepe sıcaklıklarında artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. Döner fırın çalışma prosesinde ortalama olarak siklon tepe çalışma sıcaklığı 300-350 °C'dir. Alternatif yakıtlı yapılan üretimlerde tepe sıcaklıkları zaman zaman 400 °C üzerine çıkmıştır.
14. Alternatif yakıtlı beslemelerde açığa çıkan yüksek ısı ile siklon tepesinde %CO değeri %0.1'den %0.4 değerine neden olarak tonajda düşüslere neden olmuştur.
15. Alternatif yakıtlı üretimde fırın çalışma kalorisi 10-15 kcal/ton artışa neden olmuştur.
16. Siklon tepe sıcaklıklarının artması ile soğutma kulesi giriş sıcaklığında yükselme ile torbalı filtre giriş sıcaklığını düşürmek için tüketilen soğutma suyu miktarının artışına neden olmuştur.
17. Yurt dışından ithal olarak alınan ömrünü tamamlamış kırılmış lastik ebatları fırın besleme şartlarında 10 mm 10-30 mm veya 30 mm arasında olması ideal yanma şartları için uygunluk göstermektedir. Tedarikçilerde zaman zaman yaşanan problemlerden dolayı yüksek ebatlı (tel oranı yüksek) lastikler döner fırına beslendiği esnada kauçuk olan kısmının yandığı, geriye kalan tellerin tam olarak yanmadığı gözlemlendi. Fırın siklon çalışma operasyonlarının zorlaşmasına neden olmuştur.
18. Alternatif yakıt ile üretilen klinker numunelerinde yaklaşık 1 Mpa dayanım kaybı tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Akan, İ. E., 2019. Çanakkale-Ayvacak bölgesinde bulunan volkanik tüfün katkılı çimento üretiminde kullanılabilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya, 68 s.
- Akkaş, M., 2009. Çimento Hammaddelerinin Yüzey Özelliklerinin Klinkerleşmeye Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya, 83 s.
- Als-Nielsen, J., McMorrow, D., 2011. Elements of modern X-ray physics. John Wiley & Sons.
- Asamany, E., Gibson, M. D., Barnett, T., Wilson, C., Patrick, E., Egg, M. J. (2015). Use Of Scrap Tires As An Alternative Fuel Source At The Lafarge Cement Kiln. Brookfield, Nova Scotia, Canada, in, Dalhousie University.
- Asil, S., 2007. Demir cevheri numunelerinde x-ışını floresans yöntemiyle molibden ve kalay tayini. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, İstanbul, 58syf.
- Ateş, M. Ş., 2018. Nanoparçacıkların ölçme ve inceleme teknikleri. Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi, 11(1): 63-69s.
- BATIÇİM. Klinker. <https://www.baticim.com.tr/urunler/klinker> [Son erişim tarihi: 02.06.2023].
- Behçet, Ö. F., 2022. Kalsine Kil ve Kireçtaşı İkameli Çimentonun Bağlayıcı Olarak Harç Üretiminde Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli 142 s.
- Bhatty, J.I., 2004. Influence of Raw Material Characteristics on the Quality of Cement Clinker," Cement and Concrete Research, 34(1): 117-126s.
- Bilen, S., Pala, M., 2021. Farklı tip ve oranlarda kalker tozu kullanılan çimento hamurlarında süperakışkanlaştırıcı dozajının kıvama ve priz sürelerine etkileri. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 8: 268-276 s.
- Birkholz, M., 2006. Thin film analysis by X-ray scattering. John Wiley & Sons.
- Borizan, D., 2023. Uçucu kül ve silis dumanı katkılı beton yol kaplamaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Van, 62 s.
- Boshoff, W.P.C. 2013. The Influence of Limestone Addition on the Hydration and Microstructure of Portland Cement Systems, Cement and Concrete Research, 53: 38-50.
- Cullity, B. D. ve Stock, S. R. (2001). Elements of X-ray diffraction. Prentice Hall.
- Çankaya, S., 2018. Çimento Üretiminde Çevresel Sürdürülebilirlik İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 148 s.



- Dağlı, S., 2012. Tehlikeli Atıkların Belirlenmesinde Uygulanacak Analizler. Tehlikeli Atık Yönetimi Eğitimi. [https://www.istac.istanbul/contents/188/tehlikeli-atik-yonetimi-egitimi-dr-sonmez-dagli\\_130985214993945217.pdf](https://www.istac.istanbul/contents/188/tehlikeli-atik-yonetimi-egitimi-dr-sonmez-dagli_130985214993945217.pdf) [Son erişim tarihi: 10.06.2023].
- Dehghanian, K., İnan, H., 2020. Kumlu kil-çimento karışım oranlarının dayanım özelliklerinin araştırılması. ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi, 2(1): 1-15s.
- Demiral, A., 2013. Killerin Elektrokinetik Özellikleri ve Flokülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 78 s.
- Devlet Planlama Teşkilatı, 1996. Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, Seramik-Refrakter-Cam Hammaddeleri Çalışma Grubu Raporu, Cilt, 2.
- Düğenci, M., Çelik, İ. B., 2016. Türkiye Çimento Sektöründe Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik Analizi. Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi, 15(58): 299-312s.
- Enerji verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı Çimento Sektörü Kıyaslama Raporu 2021. <https://enerjiverimliliği.enerji.gov.tr/template/dist/pdf/2021%20Y%C4%B1%C4%B1%20%C3%87imento%20Sekt%C3%B6r%C3%BC%20K%C4%B1yaslama%20Raporu%20Y%C3%B6netici%20%C3%96zeti.pdf> [Son erişim tarihi: 22.08.2023].
- Engin, Y., Tarhan, M., Kumbaracıbaşı, S. (2013). Çimento Endüstrisinde Sürdürülebilir Üretim. Hazır Beton Kongresi, İstanbul.
- Eren, F., 2022. Kalsiyum Alüminat Çimentolu Harçların Reolojik Davranışlarının ve Uzun Dönemli Dayanım-Dayanıklılık Özelliklerinin İncelenmesi Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemesi Programı, İzmir, 225 syf.
- Ergüçlü, M. E., 2016. Alternatif Yakıt Kullanılarak Üretilen Çimentodan Mamul Betonarme Su Yapılarında Eser Element Özütleme Karakteristiklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 90 syf.
- Erüst, C., 2015. Pirit Küllerinden Hidrometalurjik Yöntemlerle Metal Kazanımı. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 64 syf.
- Genç, G., 2013. Atıktan türetilmiş yakıtı uygulanabilecek ön işlemlerin piroliz ve yanma karakteristiğine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yalova, 110 syf.
- Giugliano, M., Cernuschi, S., Ghezzi, U., Grosso, M. (1999). Experimental evaluation of waste tires utilization in cement kilns. Journal of the Air & Waste Management Association, 49(12): 1405-1414s.
- Goodier, Chris (2010), Carbon footprint, (Eds. Cohen, N. and Robbins, P.), Green Cities: An A-to-Z Guide, London: SAGE Publications: 49 – 53s.

- Gül, T. 2019., Mangan cevherinin zenginleştirilebilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 100 s.
- Gülşen, S., 2016. Çimento Öğütme Prosesinin Modellenmesi Gözlemleyici ve Üst Denetleyici Tasarımı Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 90 s.
- Güner, Ş. S., 2023. Çimento Üretiminde Uçucu Kül Yerine Şist Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Kimya Mühendisliği Programı, İstanbul, 67 s.
- Güzel, E., 2011. Endüstriyel Atıkların Gazlaştırılması ve Gazlaştırma Prosesi Katı Çıktılarının (char, Siklon Tozu ve Klinker) Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 170 s.
- Heidelberg Cement Global AF Report, 2021  
<https://www.heidelbergmaterials.com/sites/default/files/2022-06/220529-HC-NB-2021-EN.pdf> [Son erişim tarihi: 22.08.2023].
- Huang, M., Ying, X., Shen, D., Feng, H., Li, N., Zhou, Y., Long., 2017. Evaluation of oil sludge as an alternative fuel in the production of Portland cement clinker. Construction and Building Materials, 152: 226-231s.
- Idris, M. S., Ismail, K. N., Jamaludin, S. B., Ghazali, C. M. R., Hussin, K., 2007. Comparative characterization of clinker's microstructure at different temperature zone during cement production. American Journal of Applied Sciences, 4(8): 543-546s.
- İslamoğulları, H., 2016. Dünya'nın Katmanları.
- İSTAÇ İstanbul. Endüstriyel Atık Yönetimi. <https://www.istac.istanbul/tr/temiz-istanbul/atik-yonetimi/endustriyel-atik-yonetimi> [Son erişim tarihi: 02.06.2023].
- Kaddatz, K. T., Rasul, M. G., Rahman, A. (2013). Alternative fuels for use in cement kilns: process impact modelling. Procedia Engineering, 56, 413syf.
- Kafalı, A., 2019. PLC ve SCADA tabanlı sıvı boya dozajlama sisteminin gerçekleştirilmesi ve performansının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 68s.
- Kaplan, G., 2018. Çimento Teknolojisinde Sürfaktanların Kullanımı ile Sürdürülebilir Çimento Üretimi. Doktora Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 328 s.
- Kaya, F. M., 2023. Bilyalı Değirmenlerde Çimento Üretim Kapasitesinin Artırılması ve Enerji Tüketiminin Azaltılmasına Yönelik Optimizasyon Çalışmaları ve Bunların Sürdürülebilir Ekolojiye Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, 99 s.
- Kaya, G., 2010. Farklı konsantrasyonlarda uçucu kül kullanımının çimento özellikleri üzerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziosmanpaşa, 75s.

- Kaya, Y., 2022. Farklı Tip Klinker Öğütme Kolaylaştırıcı Katkı Kullanımının Çimentolu Sistemlerin Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, 116 s.
- Kırgız, M. S., 2011. İkameli ve katkılı çimento pastalarının hidratasyon bileşiklerinin taramalı elektron mikroskobu kullanılarak belirlenmesine ilişkin literatür araştırmaları. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24(1): 72-90s.
- Koç, M., Şahin, H. (2015). Çimento Hammaddesinde Kükürt ve Organik Maddenin Tayini. Selçuk Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(2): 23-29s.
- Koçak, Y., 2008. Çimento–Puzolan Etkileşiminde Moleküler ve Elektrokinetik Davranışların Araştırılması.Y. Lisans Tezi, Gazi üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 161 s.
- Korkmaz, A. V., 2021. Hammadde Rutubetinin Çimento Üretim Prosesine Etkisinin Araştırılması. *MT Bilimsel*, (19): 33-49s.
- Korkmaz, A. V., Hacıfazlıoğlu, H., 2019. Çimento Üretiminde Kil Taşına Alternatif Bir Hammadde: Meta Şist. *Scientific Mining Journal*, 58(2): 95-110.
- Kökipek, B., 2010. Suni Alçının Çimento Üretiminde Kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 144 s.
- Kuleli, Ö., 2009. Çimento Mühendisliği El Kitabı. TÇMB/AR-GE Enstitüsü, Ankara. 286syf.
- Landreth, R. E., Rebers, P. A., 2020. Municipal solid wastes: Problems and solutions. CRC Press.
- Moses, P. M., 2011. Alternative Fuels in Cement Manufacturing. *Open access peer-reviewed chapter* <https://www.intechopen.com/books/alternative-fuel/alternative-fuels-incement-manufacturing>. [Son erişim tarihi: 30.05.2023].
- Obuz, H., 2018. Glisidil Metakrilat- Akrilonitril Kopolimerlerinin Sentezi, Karakterizasyonu ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak, 74s.
- Onat, L., 1997. Çimentonun Kimyası ve Üretimi. SET Çimento Balıkesir Fabrikası Aralık.
- Ordu, Ş., Öztürk, E., 2017. Çimento fabrikalarında alternatif hammadde ve yakıt kullanımı: örnek çalışma. Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 3(2):87-92s.
- Özel, A., 2011. Çimento Üretiminde ATY Kullanımı ve Çevresel Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Özger, H., 2019. Değerli Toz Metal Alaşımların Üretilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 71s.
- Öztürk, B., 2021. Çimento Üretiminde Alternatif Yakıt Kullanımının Baca Gazı Emisyonları Üzerine Etkileri. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, 320 s.

- Öztürk, E., 2016. Çimento Sektöründe Alternatif Hammadde ve Alternatif Yakıt Kullanımının Çevresel Yararlarının Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Tekirdağ, 26 s.
- Page.2021.<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.azom.com%2Fnews.aspx%3FnewsID%3D57561&psig=AOvVaw3DC-m3emRBQrYbF5G-VvsL&ust=1687876658881000&source=images&cd=vfe&ved=0CBMQjhxqFwoTCNiMr9qU4f8CFQAAAAAdAAAAABAI> [Son erişim tarihi: 01.06.2023].
- Papapari, S., 2015. The Effect of Alternative Fuels on Microstructure and Durability of Cement. Master Thesis, Technological Educational Institute of Sterea Ellada, Greece.
- Pedersen, M. N., 2018. Co-Firing Of Alternative Fuels in Cement Kiln Burners.
- Pehlivan, H., Ateş, A., Parlak, N. 2015. Çimento Endüstrisinde Alternatif Yakıt Olarak Kullanılan Belediye Çamuru ve Fındık Kabuğu Karışımlarının Kuruma Kinetiği. Isi Bilimi ve Tekniği Dergisi/Journal of Thermal Science & Technology, 35(2): 45-52s.
- Pipilikaki, P., Katsioti, M., Papageorgiou, D., Fragoulis, D., Chaniotakis, E. (2005). Use of tire derived fuel in clinker burning. Cement and Concrete Composites, 27(7-8): 843-847.
- Poole, A. B., Sims, I., 2016. Concrete petrography: a handbook of investigative techniques. Crc Press.
- Prasad, B., 2006. Role of Lime Saturation Factor and Silica Modulus in Clinker Grindability, Journal of the American Ceramic Society, 89(4):1171-1176.
- Rahhal, V., 2015, Influence of Clay Minerals on the Formation and Properties of Portland Cement Clinker, Industrial & Engineering Chemistry Research, 54(10): 2704-2713.
- Resmî Gazete. 2015. /2, İthal Katı Yakıtlar Genelgesi, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Sagastume A., Eras J.J.C., Gaviria C.A., Caneghem J.V, Vandecasteele C., 2017. Improved Selection of The Functional Unit in Environmental Impact Assessment of Cement, Journal of Cleaner Production., 168: 463-473s.
- Saltabaş, F., Soysal, Y., Yıldız, Ş., Balahorli, V., 2009. Evsel katı atık termal bertaraf yöntemleri ve İstanbul'a uygulanabilirliği. Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu’nda sunulan bildiri, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 15-17s.
- Savaş, A. F., 2023. Paralel akışlı ön kalsinasyonlu çimento fabrikasında döner fırın ünitesinde kütle ve enerji denkliklerinin matematiksel modellenmesi. In international conference on engineering, natural and social sciences (vol. 1, pp. 184-19).
- Sazcı H., 2001. Seramikte Kullanılan Killerin Tanımı. 4.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu İzmir, Türkiye, 118syf.
- Singhi, M. K. ve Bhargava, R., 2010. Sustainable Indian cement industry. In Workshop on International comparison of Industrial Energy efficiency (pp. 27-28).
- Söğüt M.Z., 2009. Çimento Sektöründe Döner Fırın Prosesinin Eksergoekonomik Optimizasyonu, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 240 s.

- Studylibtr. Mineraller. <https://studylibtr.com/doc/1080119/mi%CC%87neraller> [Son erişim tarihi: 27.05.2023].
- Şahin, H., 2017. Çimento Üretiminde Döner Fırın Prosesinin Enerji, Ekserji ve Eksergoekonomik Analizi. Y. Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, 115 s.
- Şanlı, G. E., Ünlü, H., 2020. İkincil Yakıtların Çimento Üretimine Etkisi Üzerine Bir Araştırma: Klinker Kompozisyonu, Çimentonun Mukavemeti ve Sızdırma Özellikleri. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 22(66): 851-859.
- Tan, D., 2010. Katkılı betonların donma-çözölmeye karşı Performanslarının incelemesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 64 s.
- Topçuoğlu, Ö., 2016.. Özelleştirmenin etkinlik ve verimliliğe yansıması: Çimento sektörü üzerine bir uygulama.
- Tosun, K., Felekoğlu, B., Baradan, B., Altun, İ. A., 2009. Portland Kalkerli Çimento Bölüm I-Çimentoların Hazırlanması. Teknik Dergi, 20(98): 4717-4736s.
- TS EN 196-2. 2014. Methods of testing cement-Part 2: Chemical analysis of cement. Ankara: Turkish Standards Institute
- TS EN 197., 2012. Çimento- Bölüm 2: Uygunluk değerlendirmesi.
- Türk Çimento., 2023. Çimento Mühendisliği El Kitabı Kalite Bölümü. 123s.
- Türkoğlu, M., 2023. Farklı C3S içeriğine sahip klinkerlerin hibrit alkalilerle aktive edilmiş çimento özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kastamonu, 116 s.
- Usanmaz, D. Köse, E. (2019). Karşılaştırmalı Risk Analizi Metotlarının Bir Araştırma Merkezi İçin Uygulanması ve Sonuçların Değerlendirilmesi. Akademik Araştırmalar Sosyal Bilimler, 11.
- Uson, A. A., López-Sabirón, A. M., Ferreira, G., Sastresa, E. L. (2013). Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23: 242-260s.
- Uz, V., Saltan, M. (2012). Granüler Yol Tabakalarının Yerinde Değerlendirme Yöntemleri: Dinamik Koni Penetrometre (Dcp) Testi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 4(2): 70-88s.
- Ünsal, A., Şen, H., 2008. Beton ve beton malzemeleri laboratuvar deneyleri. T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, 1-8s.
- Yazıcı, R., 2019. Evsel Katı Atıklardan Atıktan Türetilmiş Yakıt Elde Edilmesi ve Sanayi Tesislerinde Kullanımının Enerji Tasarrufuna Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı, Ordu, 34 s.
- Yılmaz, B., 2005. The comparative methods powder and glass done by XRF determine of main oxide components in cement clinker. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9s.
- Yılmaz, H., Bursa, C., Tanrıverdi, M., 2018. Madencilikte Görüntüleme ve Analiz Cihazları. Bilimsel Madencilik Dergisi, 57: 51-61s.

Zhang, J., 2013. Energy, environmental and greenhouse gas effects of using alternative fuels in cement production. Columbia University, USA.

<https://www.bddk.org.tr/KurumHakkinda/EkGetir/18?ekId=128>







## ÖZGEÇMİŞ

Alper Fatih İSLİ, İlk öğrenimini Erzincan, Gaziantep, orta öğrenimini Gaziantep, Ankara ve lise öğrenimini Aydın'da tamamladı. 2004 yılında başladığı Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü'nden 2008 yılında mezun oldu. 2010 yıl Wales Üniversitesi-Londra (University of Wales) İşletme bölümü MBA programında master eğitime başladı. 2011 yılında master eğitimini tamamladı. 2013 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora programına başladı. Evli ve bir kız çocuğu babasıdır.

