



## **Çimento Sanayinde Fosil ve Alternatif Yakıtların Pişme Sıcaklığının Klinker Mikro yapısı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması**

*The Change of the Effect of the Firing Temperature of Fossil And Alternative  
Fuels on the Clinker Microstructure in the Cement Industry*

**NİL YAPICI<sup>1</sup>** Orcid: 0000-0001-9761-9122

**ALPER FATİH İSLİ** Orcid: 0009-0004-7427-8926

<sup>1</sup> Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü/ Adana

<sup>2</sup> AkçanSA Çimento AŞ.

Geliş (received): 08/08/2024

Kabul (Accepted): 11/09/2024

### **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 çalışmanın amacı, alternatif yakıt olan ÖTL (Ömrünü tamamlamış lastik), RDF (Endüstriyel plastik) gibi çevresel tehdit unsuru içeren yüksek kalorifik ihtiva gösteren malzemeler ve kullanılan fosil yakıtlardan üretilen klinkerin pişme sıcaklığı değişimlerine göre mikro yapı değişimleri incelenmesidir.

Homojen olarak elde edilmiş alternatif ve fosil yakıtların pişirilmesi verimli gerçekleştiğinden dolayı mikro yapıda olumsuzluk gözlemlenmemiştir. Serbest kireç değerinin normal seviyelerde olması, numunede bulunan belit minerallerinin genel yapılarının homojen belit yapılanmasında olmasına yol açmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Klinker, Alternatif yakıtlar, Fosil yakıtlar

---

Nil YAPICI nyapici@cu.edu.tr

DOI: 10.70054/geosound.1529018

## **ABSTRACT**

*The wastes generated by the development of industry have begun to threaten sustainable environmental life in Türkiye and Europe. Cement plants are becoming not only cement production facilities, but also waste disposal facilities in order to solve the environmental and economic problems caused by waste. The aim of this study is to investigate the microstructure changes of clinker produced from alternative fuels such as waste tires (Tire End-of-Life), RDF (Industrial Plastic), sewage sludge, waste oil, which contain high calorific content and environmental threats, and fossil fuels used, depending on the heating temperature changes. Alternative and fossil fuels were obtained homogeneously and no negative effects were observed in the microstructure since efficient heating was achieved. The free lime value being at normal levels leads to the belite minerals present in the sample forming a homogeneous belite structure.*

**Keywords:** *Clinker, Alternative fuels, Fossil fuels*

## **GİRİŞ**

Çimentoğun 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 öğütölerek hazırlanmaktadır. Bu işlevi nedeniyle çimento, üretim sürecinin en kritik aşamalarından birini oluşturmaktadır (Gülşen, 2016). Çimento üretiminde temel ham madde olan kalsiyum silikat bileşiklerinin oluştuğu bir ara üründür. Klinkerdeki kalker ve kilin çimento kalitesine olan etkisi oldukça önemlidir. Çünkü çimento üretimi için temel ham madde olan klinker, kalker ve kilin yüksek sıcaklıkta kalsinasyonuyla elde edilir. Bu nedenle, klinkerdeki kalker ve kil içeriği, çimento kalitesini ve performansını belirleyen önemli faktörlerdir. Ayrıca kimyasal bileşimi, çimento reaktivitesini etkiler.

Çimento fabrikaları yüksek enerji tüketmesinin yanı sıra enerji de üreten bir tesistir. Böylelikle, buhar türbinleri ile elektrik üretimi sağlanarak sıcak su da fabrika bünyesinde kullanabilmektedir. Ayrıca, çimento fabrikalarında atıkların yakılması ile fosil yakıt tüketiminin düşürölmesine katkı sağlanmaktadır. Böylece yakılan atıklardan ortaya çıkan CO<sub>2</sub> salınım miktarı düşürölerek daha çevreci fabrikalar haline gelmesi sağlanmış olacaktır. Termal ve elektrik enerji verimliliğinin sağlanması, karbon ayak izinin azalması, atık ve toz

yayınımın azaltılması ve sürdürülebilirlik politikalarının oluşması ülke geleceği için önemli kriterlerdir.

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.

Ham madde karışımının kimyasal, fiziksel ve mineralojik davranışı; pişmeyi önemli ölçüde etkilemektedir. Bu durum, düzenli sıcaklık aralıklarında son derece karmaşık fizikokimyasal dönüşümler yoluyla katı, sıvı ve gazlı ortamların varlığında klinker oluşumunu açıklamaktadır. Ham madde karışımının karakterizasyonu ve değerlendirilmesi; ham karışımın uygun tasarımı, fırın ve soğutucunun sorunsuz çalışması ve daha iyi klinker kalitesi elde edilmesi için esas teşkil etmektedir. Ham madde karışımının sinterleme sırasındaki reaksiyon dizisi, sırasıyla C<sub>3</sub>S (alit), C<sub>2</sub>S (belit), C<sub>3</sub>A (aluminat) ve C<sub>4</sub>AF (ferrit) gibi ana klinker fazlarına dönüşen düzenli ara bileşiklerin oluşumu ve ayrışmasıyla hem katı hem de likit faz mekanizmalarını kapsamaktadır (Chatterjee,1983).

Bu çalışmada bir döner fırın prosesi klinker üretiminde %100 fosil yakıt kullanılıyor iken, alternatif yakıtlar ile bu tüketim oranı %75 Petrokok, %14 ömrünü tamamlamış lastik (ÖTL), %11 endüstriyel plastik atığı (RDF) şeklinde gerçekleştirilerek klinker mikro yapısındaki değişimler, özellikle pişme sıcaklığının mikro yapı üzerindeki etkisi irdelenmiştir.

## **MATERYAL, METOD VE BULGULAR**

### **Materyal**

Bu çalışma için kullanılan materyaller Çizelge 1'de verilmiştir. Alternatif yakıt ve katkı maddesi olarak, endüstriyel plastik atık, ÖTL (ömrünü tamamlamış lastik) kullanılmıştır.

Çizelge 1. Çimento üretim için kullanılan materyaller ve bölgeler

*Table 1. Materials and regions used for cement production*

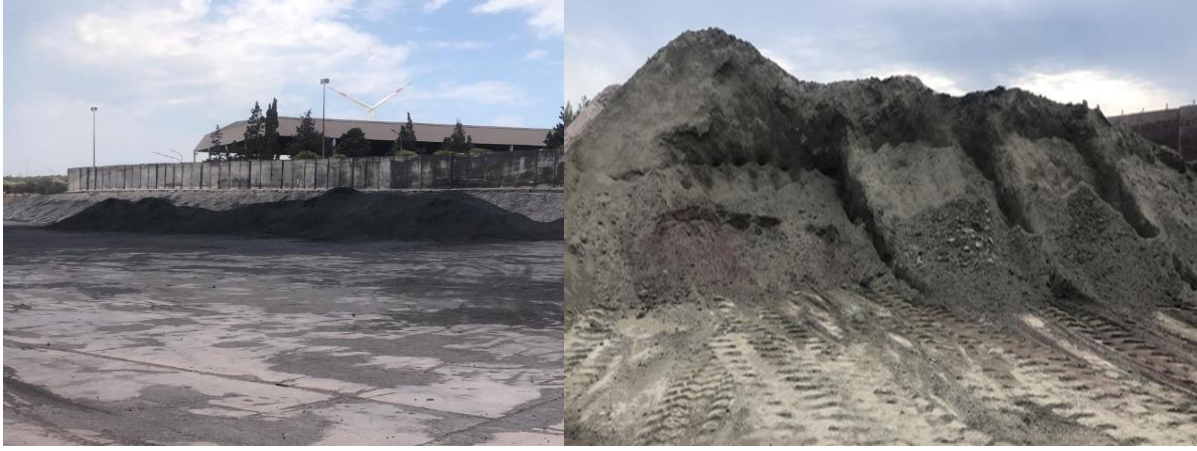
Kalker	Çanakkale Bozalan Mevki Kalker
Kil	Çanakkale Taştepe Mevki Kili
Pirit Külü	Bandırma Eti Maden
Fosil yakıtlar	Yurt Dışı
Alternatif Yakıtlar (Endüstriyel Plastik Atık/RDF)	İSTAÇ Endüstriyel Plastik Atıkları (İstanbul Büyükşehir Belediyesi)
Atık Lastik (ÖTL)	Yurt Dışı ve yerli kömür

Kullanılan fosil yakıt ve alternatif yakıt analiz değer sonuçları Çizelge 2 ve Çizelge 3’de verilmiştir. Kömür döküm sahası Şekil 1’de verilmiştir.

Çizelge 2. Fosil yakıt analizleri (Akçansa A.Ş., 2023)

*Table 2. Fossil fuel analysis (Akçansa A.Ş., 2023)*

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 1. Kömür döküm sahası

Figure 2. Coal dump

Çizelge 3. Alternatif yakıt analizleri (Akçansa A.Ş., 2023)

Table 3. Alternative fuel analysis (Akçansa 2023)

Yakıt Türü	Ortalama Isıl Değerler (Kcal/Kg)	Rutubet (%)	Kül (%)	Uçucu Madde (%)	Toplam Kükürt (%)	Klor (%)
Endüstriyel Plastik Atık	3500-4500	8-25	10-15	78-80	0.1-0.4	0.5-0.65
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

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 yakıtta yakın olmasıdır.

## **Metod**

Analizler kimyasal, mineralojik, optik çalışmalar kapsamında ele alınmıştır. XRF kimyasal analizi Maden Mühendisliği laboratuvarında PANalytical marka X-Ray Fluoresence (XRF) cihazı ile, XRD mineral analizi Ç.Ü. merkez laboratuvarında PANalytical EMPYREAN XRD cihazı ile tespit edilmiştir. Kömür ve alternatif yakıt analizleri Türk Çimento laboratuvarlarında yapılmıştır. Mineralojik analizler Türk Çimento laboratuvarlarında Optik Polarize Mikroskop (OPM) ile yapılmıştır. Mikro yapı incelemesinde, 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 polyster içerisine gömülerek dondurulmuştur. Donma sonrasında yüzey düzeltme amaçlı olarak zımparalanmış, ardından parlatma işlemi ile minerallerin görünür hale gelmeleri sağlanmıştır.

## **BULGULAR**

Bu çalışma, farklı yakıt kompozisyonu ile her iki yakma sonucu klinker karakteri ve mikro yapı analizi karşılaştırılmasıdır. Yanma verimi, spesifik enerji ve klinker dayanımına doğrudan etki eden en önemli parametredir.

Yakma sonucu oluşan klinker üretiminde kullanılan endüstriyel plastik atık ve kırılmış ömrünü tamamlamış lastiklerin kısa analizleri yapılmış ve Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. Rutubet, kül, kükürt ve uçucu madde analizleri (İslı, 2024)

Table 4. Moisture, ash, sulfur and volatile matter analyzes (İslı, 2024)

Yakıtlar	Kaba Rutubet (%)	Bünye Rutubeti (%)	Toplam Rutubet (%)	Kuru Kömürde Kül (%)	Kuru Kömürde Uçucu Madde (%)	Kuru Kömürde Kükürt (%)	C (%)	Klor (%)
Endüstriyel Plastik Atık	12.56	1.79	14.13	5.93	88.21	0.41		0.49
Ömrünü Tamamlamış Lastik (ÖTL)	-	3.00		8.40	-	-	24.1	

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 (ömrünü tamamlamış lastik) 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 fırınlarda, hammaddenin, pişirilmesi sırasında likid fazın tuğla yüzeyine yapışarak bir koruyucu tabaka oluşturması olayına anzast denir. Döner fırın ön ısıtıcı siklonetlerinde yakıt kaynaklı kükürt fazlalığı anzast sarmal yapıları oluşturarak siklonetleri blokajlayarak tıkanmalara sebep olmaktadır. Üretim kaybı ve İSG (işçi 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.

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 hapsoldüğü için sistemi ciddi anlamda blokaja maruz bırakmaktadır. Bu çalışmada aşamasında kullanılan endüstriyel plastik atıkların 'Cl' değeri (%0.49) düşüktür. Atıktan türetilmiş yakıt, ek yakıt ve alternatif hammadde tebliği 2014, Ek-3 Tablo 4'e göre < %1 olması gerekmektedir.

Karbon da klor gibi çalışma şartlarını zorlayıcı etmenler arasında gelmektedir. Siklon tepesindeki Oksijen ve karbon değerleri çalışma proses takibi açısından oldukça önemlidir. Alternatif yakıtların karbon yüzdelerinin fosil yakıtlara göre düşük olması beklenir ve bu çalışmada tükettiğimiz endüstriyel plastik atıkların karbon 'C' değeri % fosil yakıt (fosil yakıt: %24.1) göre eser miktarda çıkmıştır ve kullanımını uygundur.

### **Fosil ve Alternatif Yakıt Kullanılan Klinker Analizleri**

Fosil yakıt ve alternatif yakıt kullanılarak elde edilen klinkerlerin kimyasal ve mineral analiz sonuçları elde edilmiş ve yorumlanmıştır.

**Fosil yakıt için:** 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 uğratarak yaklaşık 150-200 °C'ye kadar soğutularak stoklama sahasına yönlendirilir.

Klinkere ait kimyasal ve mineralojik analizler Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6'a göre kristal yapılarına göre oluşan mineral analiz sonuçları; %Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> ;67.0, %Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>; 10.5, %Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> ;6.7, % Ca<sub>2</sub> Fe<sub>1.5</sub> Al<sub>0.5</sub>O<sub>5</sub> ; 10.6, % MgO; 2.0, % CaO; 1.0, % Ca(OH)<sub>2</sub> ;0.2, % K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 1.0 , K<sub>3</sub> Na (SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> ; 0.0 olarak tespit edilmiştir.

### **Alternatif yakıt için:**

Alternatif yakıt kullanılarak elde edilen klinkerin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 7'de verilmiştir. Klinkerin minerallerine göre kimyasal analiz sonuçları Çizelge 8'de verilmiştir.



Çizelge 5. Klinkerlerin özelliklerine göre yapılan kimyasal analiz sonuçları (İslı, 2024)  
 Table 5. Chemical analysis results according to the properties of clinkers (İslı, 2024)

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

Çizelge 6. Klinkler mineral analiz sonucu (İsli, 2024)

Table 6. Klinkler mineral analysis result (İsli, 2024)

Mineraller		Birim (Unit)	Klinker
C <sub>3</sub> S - M3	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	%	15.0
C <sub>3</sub> S - M1		%	52.0
C <sub>3</sub> S - Toplam		%	67.0
C <sub>2</sub> S	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	%	10.5
C <sub>3</sub> A - Kübik	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	%	1.2
C <sub>3</sub> A - Ortorombik		%	5.5
C <sub>3</sub> A - Toplam		%	6.7
C <sub>4</sub> AF	Ca <sub>2</sub> Fe <sub>1.5</sub> Al <sub>0.5</sub> O <sub>5</sub>	%	10.6
Periklaz	MgO	%	2.0
Serbest Kireç	CaO	%	1.0
Portlandit	Ca(OH) <sub>2</sub>	%	0.2
Arkanit	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	%	1.0
Aftitalit	K <sub>3</sub> Na(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	%	0.0

Çizelge 7. Klinker kimyasal analiz sonuçları (İslı, 2024)

Table 7. Clinker chemical analysis results (İslı, 2024)

Özellik	Birim	Klinker 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 (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> 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 8' e 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 8. Klinkerin minerallerine göre kimyasal analiz sonuçları (İslı, 2024).

Table 8. Chemical analysis results according to the minerals of clinker (İslı, 2024).

Mineraller		Birim	Miktar
C <sub>3</sub> S-M3	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	%	41.00
C <sub>3</sub> S-M1		%	15.60
C <sub>3</sub> S-Toplam		%	56.60
C <sub>2</sub> S	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	%	10.60
C <sub>3</sub> A - Kübik	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	%	3.20
C <sub>3</sub> A - Ortorombik		%	0.30
C <sub>3</sub> A- Toplam		%	3.50
C <sub>4</sub> AF	Ca <sub>2</sub> Fe <sub>1.5</sub> Al <sub>0.5</sub> O <sub>5</sub>	%	14.20
Periklaz	Mgo	%	0.90
Serbest Kireç	CaO	%	1.70
Portlandit	Ca(OH) <sub>2</sub>	%	7.00
Langbeinit	K <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> (SO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	%	2.10
Aftitalit	K <sub>3</sub> Na(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	%	4.00

Çizelge 4.9'da 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.

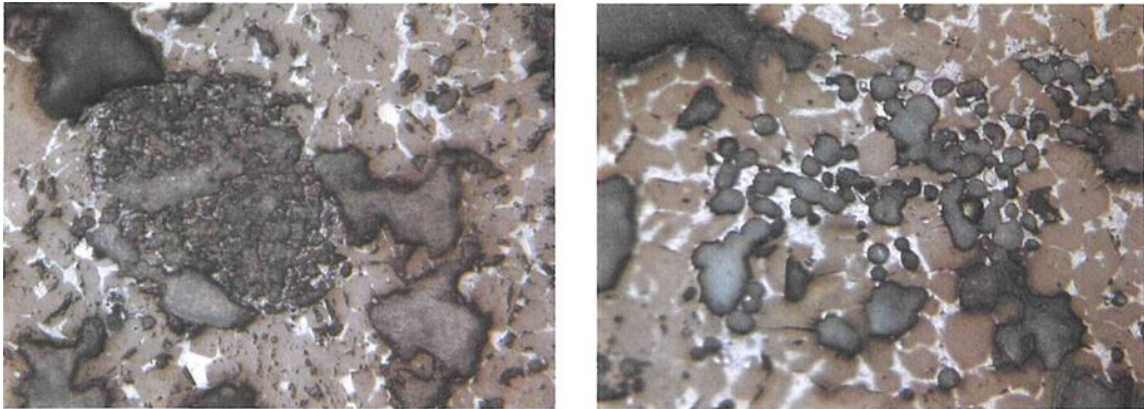
Klinkerdeki SO<sub>3</sub> miktarı pişme esnasında alkaliler (Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O) ile bağ yaptığının göstergesidir. Bu çalışma esnasında alınan numunelerde alternatif yakıtlı ve yakıtsız klinkerlerde kükürt değeri birbirine yakındır. Çok düşük olmadıkları için (<1%) alkaliler ile de

bağ yaptığının göstergesidir. Yani proste verimli yanma şartının da olduğu izlenmiştir. Eğer 1'in altında SO<sub>3</sub> değeri, kükürt sistem içerisinde bir yerde biriktiğini ve proste CO miktarı yüksek olduğunu göstermektedir. Bir diğer önemli parametre ise serbest kireç değeridir. Serbest kirecin 1.5% < Serbest Kireç (CaO) < 2% olması gerekir. Serbest kireç yükseldikçe dayanım düşmektedir. İncelenen numunelerde serbest kireç değerleri kullanılabilir aralıkta gelmiştir.

### Fosil ve Alternatif Yakıt Kullanılan Klinker Mikro yapı İncelemesi

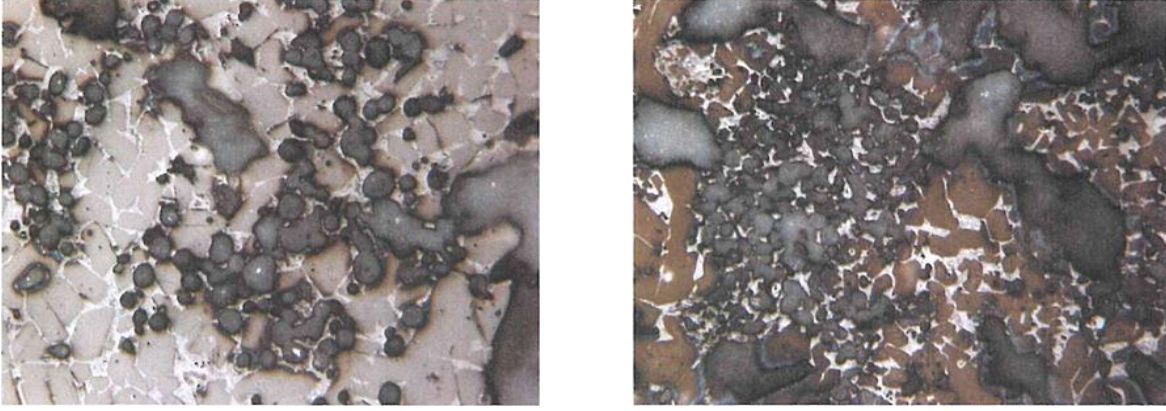
Optik polarize ışık mikroskopunda incelenen klinker granülleri hidroflorik asit buharına tutularak mineraller renklendirilmiştir. Klinker granüllerinin kesitleri incelendiğinde, koyu gri granüller iyi pişme sonucu oluşmuştur.

İyi pişmemiş klinkerlerde yüksek miktarda boşluklu yapının yanı sıra belit ve serbest kireç kümelenmeleri gözlenir. Örneklerde klinker numunesinin genel yapısının kümeli belit olduğu gözlemlenmiştir. Serbest kireç değerleri incelendiğinde ise normal seviyelerde olduğu görülmüştür. Serbest kireç değerinin normal seviyelerde olması, numunede bulunan belit minerallerinin genel yapılarının homojen belit yapılanmasında olmasına yol açmaktadır. Siyah yuvarlak kümeli yapılar serbest kireç mineralleridir. Fosil yakıt kullanılarak elde edilmiş klinkerin mikro yapı görünümü Şekil 2'de, alternatif kullanılarak elde edilen klinkerin mikro yapı görünüm Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 2. Klinker 100x büyütme; serbest kireç görünümü

Figure 2. Clinker 100x magnification; free lime appearance



Şekil 3. 200x büyütme, siyah yuvarlak kümeli yapılar serbest kireç mineralleri  
*Figure 3. 200x magnification, black round cluster structures free lime minerals*

Homojen olarak elde edilmiş alternatif ve fosil yakıtların yanma işlemi verimli gerçekleştiğinden dolayı mikro yapıda olumsuzluk gözlemlenmemiştir. Gerek fosil gerekse alternatif yakıt kullanılarak elde edilen klinker numunelerinden elde edilen parlak kesitlerde pişme sıcaklığına kaynaklı etkiler sonucu elde edilen bulgular hemen hemen aynı olarak gerçekleşmiştir.

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışmada, 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.), mikroyapı özellikleri ve klinker kalitesine olan etkisi araştırılmıştır. Klinker üretiminde %100 olarak tüketilen fosil yakıtların kullanımını %75 oranına indirilmiş, %14 kırılmış ömrünü tamamlamış lastik ve %11 Endüstriyel Plastik Atık atıklar yakılarak klinker üretimi gerçekleştirilmiştir.

-Çalışma kapsamında üretilen alternatif yakıtlı ve alternatif yakıtsız klinkerler EN 197 kalite standardı kapsamında üretilmiştir.

-Numunelerde (alternatif yakıtlı ve fosil yakıtlı) kükürt değeri birbirlerine yakın (<%1) çıkmıştır. Çok düşük olmadıklarından dolayı alkaliler ile olumlu bağ kurmuşlardır.

-%2 üzeri serbest kireç oranı dayanım düşürdüğü için istenmemektedir. Alternatif yakıtlı ve fosil yakıtlı numunelerde de çalışılabilir aralıkta gözlemlenmiştir.

-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 göstermektedir.

-Gerek fosil gerekse alternatif yakıt kullanılarak elde edilen klinker numunelerinden elde edilen parlak kesitlerde serbest kireç değerinin normal seviyelerde olması, belit minerallerinin genel yapılarının homojen belit yapılanmasında olmasına yol açmıştır.

## **KATKI BELİRTME**

Çalışma, Alper Fatih İSLİ'nin, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Müh. Ana Bilim Dalı, Tez No: 856580, 'Fosil ve Alternatif Yakıtların Klinker Mikro yapısına Etkisi' konulu doktora tez çalışmasının bir bölümünü içermektedir.

## **KAYNAKLAR**

Chatterjee, T.K., 1983. Burnability and Clinkerization of Cement Raw Mixes, Advances in Cement Technology Critical Reviews and Case Studies on Manufacturing, Quality Control, Optimization and Use, 69-113. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-028670-9.50009-0>.

Gülşen, S., 2016. 'Çimento Öğütme Prosesinin Modellenmesi Gözlemleyici ve Üst Denetleyici Tasarımı', Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 90 s.

İslı A.F., 2024. 'Fosil ve Alternatif Yakıtların Klinker Mikroyapısına Etkisi', Doktora Tezi, Ç.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 121 sayfa.

TS EN 197., 2012. Çimento-Bölüm 2: Uygunluk değerlendirmesi.

TS EN 196-2. 2014. Methods of Testing Cement-Part 2: Chemical Analysis of Cement.  
Ankara: Turkish Standards Institute.