

T.C.  
Niğde Üniversitesi  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇİMENTO MİNERALOGİSİNİN VE PETROGRAFİSİNİN  
ÇİMENTO TEKNOLOJİSİNE KATKISI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Niğde Üniversitesi  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALPARSLAN ŞAFK

Haziran 2014

T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇİMENTO MİNERALOGİSİNİN VE PETROGRAFİSİNİN  
ÇİMENTO TEKNOLOJİSİNE KATKISI

ALPARSLAN ŞAFAK

Yüksek Lisans Tezi

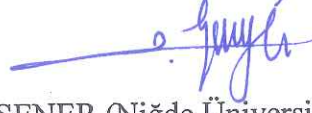
Danışman

Prof. Dr. İbrahim ÇOPUROĞLU

Haziran 2014

Alparslan ŞAFK tarafından Prof. Dr. İbrahim ÇOPUROĞLU danışmanlığında hazırlanan “Çimento Mineralojisinin ve Petrografisinin Çimento Teknolojisine Katkısı” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. İbrahim ÇOPUROĞLU ( Niğde Üniversitesi, Danışman)



Üye : Prof. Dr. Mehmet ŞENER (Niğde Üniversitesi)



Üye : Doç. Dr. Fatih ÖZCAN (Niğde Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Müh.,  
Yapı ABD)



**ONAY:**

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından .... / .... / 20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun .... / .... / 20.... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

..... / ..... / 20...

**Doç. Dr. Murat BARUT**

**MÜDÜR**

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

  
Alparslan ŞAFAK

## ÖZET

### ÇİMENTO MİNERALOGİSİNİN VE PETROGRAFİSİNİN

#### ÇİMENTO TEKNOLOJİSİNE KATKISI

ŞAFAK, Alparslan

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. İbrahim ÇOPUROĞLU

Haziran 2014, 89 sayfa

Bu yüksek lisans çalışmasında, Niğde ÇİMSA Çimento Fabrikası'ndan alınan farklı zamanlarda üretilmiş ve farklı özelliklere sahip klinker örneklerinin mineralojik ve petrografik özellikleri belirlenmiş, bu özellikler Ono metoduna ve Campbell'a, (1999) göre değerlendirilerek, klinkerlerin pişirilme koşulları incelenmiştir.

Ayrıca, genel olarak çimentonun tarihçesi, tanımı, Niğde ÇİMSA çimento fabrikasında çimento üretiminde kullanılan hammaddelerin mineralojik petrografik özellikleri incelenerek, diğer teknik özellikler hakkında bilgiler verilmiştir.

Çimentolu malzemelerin, özellikle de betonun kalite kontrolünde geleneksel olarak pek çok tahribatlı ve tahribatsız yöntemler uygulanmaktadır. Örneğin orijinal beton karışım oranlarının ve genel özelliklerin belirlenmesi, sertleşmiş betonda kullanılmış çimento tipinin tayini, betonun mikro yapı kalitesi ve ikincil reaksiyon ürünlerinin incelenmesi v.s gösterilebilir. Bu yöntemler betonun genel kalitesi hakkında fikir vermeleri açısından oldukça yararlıdır ve yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Buna ilave olarak, betonda oluşan çatlak ve diğer hasarların kaynağının tespiti, betonu oluşturan malzemelerin kalite kontrolünün yapılması ve çimentolu malzemelerin durabilite potansiyellerinin araştırılmasında geleneksel kullanılan yöntemlerden farklı metod ve tekniklerin kullanılma zorunluluğu da vardır.

Niğde ÇİMSA çimento fabrikasından alınan örnekler incelenmesi için parlak kesit ve ince kesit olarak hazırlanmıştır. Klinkerleri oluşturan mineraller (alit, belit, trikalsiyum alüminat, ferrit) mikroskop yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Ono yönteminde alit minerali boyutunun ısınma hızına, belit minerali boyutunun yanma süresine, alit çift kırma indisinin maksimum sıcaklığa, belit renginin soğutma hızına etki ettiğini belirtmiştir. Buna göre, alit minerali boyutu 3, belit minerali boyutu 2, alit çift kırma indisi 3, belit rengi 2 oranları tespit edilmiştir. Klinkerden alınan numuneler ile polarize ve cevher mikroskobuyla yapılan çalışmalarda elde edilen özelliklere göre klinker kalitesinin (yanma koşullarının) an ve an takip edilebileceği sonucuna varılmıştır.

*Anahtar Sözcükler:* Niğde OYSA Çimento, klinker, çimento mineralojisi, Ono yöntemi, fırın yanma koşullarının tespiti

## SUMMARY

### CEMENT AND PETROGRAPHY of MINERALOGY CONTRIBUTIONS TO CEMENT TECHNOLOGY

ŞAFAK, Alparslan

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Geological Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. İbrahim ÇOPUROĞLU

June, 2014, 89 pages

In this postgraduate thesis, the mineralogical and petrographic features of different clinker samples produced in different times and taken from Nigde ÇİMSA Cement Factory were identified and these features were evaluated according to Ono method and Campbell (1999 ) and the firing conditions of clinkers were investigated.

Also, the history and description of cement ,the mineralogical and petrographic features of raw materials used in cement production in the Nigde ÇİMSA Cement Factory are examined and the information was given about other technical features .

In quality control of cementitious materials and especially concrete, many destructive and nondestructive methods are applied traditionally. The determination of original concrete's mixing proportions and general characteristics, cement's type used in hardened concrete , the microstructure quality of concrete and the examination of secondary reaction products , etc. can be shown as an examples. These methods are very useful in terms of giving an idea about the overall quality of the concrete and they are widespread. In addition, there is obligation for using different methods from conventional ones to identify the concrete cracks and other damage's source , to make quality control of materials forming concrete and to detect the durability potential of cementitious materials.

The samples taken from Nigde ÇİMSA Cement Factory was prepared as radiant section and slender section . Minerals forming clinkers ( alite , belite tricalcium aluminate, ferrite) was determined by using a microscope method .In Ono method, it is stated that the size of alite mineral affects to the heating rate, the size of the axioms mineral affects to the burning time , alit double refractive index affects to the the maximum temperature and the color of the axiom affects to the refrigeration rate . Accordingly , the ratio of alite mineral size were determined as 3, the ratio of belite mineral size was determined as 2 , the ratio of alite double refractive index was determined as 3 , the ratio of belite color was determined as 2. According to the samples from clinker and studies done with polarized and ore microscope,the quality of clinker ( combustion conditions ) can be followed ceaselessly.

*Keywords* : Nigde OYSA Cement , clinker, cement mineralogy, Ono method, determination of the furnace combustion conditions

## ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans çalışmasında, Niğde ÇİMSA Çimento Fabrikası'ndan alınan farklı zamanlarda üretilmiş ve farklı özelliklere sahip klinker numunesinin mineralojik ve petrografik özellikleri belirlenmiş. Bu özellikler Ono metoduna göre değerlendirilerek, klinkerlerin pişirilme koşulları incelenmiştir.

Çimento üretim teknolojisine Japon bilim adamı Yoshio Ono'nun en önemli katkısı; polarize ışık mikroskobu kullanarak çimento kalitesinin belirlenmesi olmuştur. Bu yöntem polarize ışık mikroskobu ile birlikte diğer test ve cihazlardan elde edilen verilerin fırın koşullarının kontrol edilmesi esasına dayanır. Böylece medeniyetlerin ihtişamını temsil eden yapıların temel taşı olan çimentonun kalitesi yükseltilmeye çalışılmıştır.

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. İbrahim ÇOPUROĞLU' na sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Mikroskop incelemelerinde ve bu verilerin değerlendirilmesinde yardımını esirgemeyen Doç. Dr. Oğuzhan ÇOPUROĞLU' na (Delft University of Technology-Hollanda), sık sık yardımına başvurduğum kıymetli meslektaşım Alperen ŞAHİNOĞLU' na, bu projede maddi olarak destek sağlayan Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'ne, numune temininde göstermiş oldukları kolaylıktan dolayı Niğde ÇİMSA Çimento Fabrikası yöneticilerine sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bütün eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteğini esirgemeyen aileme, çalışmam sırasında sabırla yardımcı olan eşime, desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
SUMMARY.....	vi
ÖN SÖZ .....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiii
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ .....	xiv
SİMGE VE KISALTMALAR .....	xv
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç ve Kapsam .....	1
BÖLÜM II ÇİMENTO İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Çimento Tarihi ve Tanımı .....	3
2.2 Çimento Çeşitleri .....	4
2.3 Çimentonun Kullanım Alanları .....	6
2.4 Çimento Hammaddeleri ve Katkı Maddeleri .....	9
2.4.1 Çimentonun hammaddeleri .....	9
2.4.1.1 Kalker.....	10
2.4.1.2 Kıltaşı .....	11
2.4.1.3 Marn.....	12
2.4.2 Çimento Katkı Maddeleri .....	13
2.4.2.1 Puzolanik maddeler.....	13
2.4.2.2 Uçucu küller.....	13
2.4.2.3 Granüle yüksek fırın cürufu .....	14
2.4.2.4 Alçıtaşı .....	14

2.4.2.5 Demir cevheri .....	15
2.5 Çimento Üretimi.....	15
2.5.1 Farin hazırlanması .....	15
2.5.1.1 Yaş sistem .....	15
2.5.1.2 Kuru sistem .....	16
2.5.2 Hammaddelerin harmanlanması ve homojenleştirilmesi .....	17
2.5.4 Çimento hammadde karışımının( Farinin) pişirilmesi .....	18
2.5.4.1 Ön ısıtıcılar .....	19
2.5.4.2 Döner fırında pişirme.....	20
2.5.4.2.1 Döner fırın.....	20
2.5.4.4 Klinkerin çimentoya dönüştürülmesi.....	21
BÖLÜM III MATERYAL VE METODLAR .....	23
BÖLÜM IV ARAŞTIRMA BULGULARI .....	25
4.1 Giriş.....	25
4.1.1 Klinker oluşumu .....	26
4.1.1.1 Klinkerin soğutulması.....	30
4.1.2 Klinker minerallerinin analiz yöntemleri .....	30
4.1.2.1 Polarizan Mikroskopisi .....	31
4.1.2.2 Floresan (UV) ışık mikroskopisi.....	33
4.1.2.3 X-Işınları kırınımı analizi (XRD) .....	34
4.1.2.4 Elektron mikroskobu.....	35
4.1.2.5 Görüntü analizi .....	35
4.2 Klinkerlerin Mineralojik ve Kimyasal Özellikleri .....	35
4.2.1 Klinker mineralleri .....	37
4.2.1.1 Alit (3CaO.SiO <sub>2</sub> ).....	38
4.2.1.2 Belit (2CaO.SiO <sub>2</sub> -C <sub>2</sub> S).....	39

4.2.1.3 Trikalsiyum alüminat ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}_3\text{S}$ ) .....	40
4.2.1.4 Ferrit ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{C}_4\text{AF}$ ) .....	41
4.2.1.5 Serbest kireç.....	41
4.2.1.6 Periklas.....	42
4.3 Ono Yöntemi ve Uygulamaları .....	46
4.3.1 Alit boyutu (AS) .....	51
4.3.2 Alit çift kırma indisi (AB) .....	53
4.3.3 Belit boyutu (BS).....	55
4.3.4 Belit Rengi (BC).....	56
4.4 28 günlük harç kübü dayanımının Ono yöntemiyle belirlenmesi .....	58
4.5 Çimentonun Kimyasal Bileşimi .....	60
4.5.1 Çimento modülleri.....	61
4.5.1.1 Silikat modülü.....	62
4.5.1.2 Hidrolik modül .....	62
4.5.1.3 Alümina modülü (kil modülü).....	62
4.5.1.4 Kireç doygunluk faktörü (LSF) .....	63
BÖLÜM V SONUÇLAR.....	65
KAYNAKLAR .....	67
ÖZGEÇMİŞ .....	73

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Gerekli mekanik ve fiziksel özellikler için karakteristik değerler.....	6
Çizelge 2.2. Çimento çeşitlerinin kullanım alanları .....	7
Çizelge 2.3. CaCO <sub>3</sub> içeriğine göre kalkerlerin sınıflandırılması .....	11
Çizelge 2.4. Kayaçların CaCO <sub>3</sub> oranları .....	12
Çizelge 4.1. Klinker minerallerin inceleme yöntemleri.....	38
Çizelge 4.2. Alit ve belitin yanma koşullarında mikroskobik karakterleri.....	51
Çizelge 4.3. İncelenen klinkerin kimyasal bileşimi.....	61
Çizelge 4.4. Portland çimentosuna ait klinkerin kimyasal bileşimi.....	61
Çizelge 4.5. Çimentoyu oluşturan oksitlerin yaklaşık oranları.....	64

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kuru sistemde çimento üretim akış şeması .....	16
Şekil 4.1. Klinker oluşumunun şematik görünümü .....	28
Şekil 4.2. Minerallerin oluşum sıcaklığını gösteren diyagram .....	28
Şekil 4.3. Sıcaklık artışına göre döner fırın içerisindeki kimyasal reaksiyonlar .....	29
Şekil 4.4. Şematik sıcaklık-zaman ilişkisi .....	50
Şekil 4.5. Çiftkırılma ölçmek için kullanılan “Michel Levy Tablosu” .....	54

## FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Çimento ana hammaddeleri .....	10
Fotoğraf 2.2. Ön Isıtıcı Sistemi .....	19
Fotoğraf 2.3. Çimento farin pişirme fırını ..	21
Fotoğraf 2.4. Döner fırında tuğla değişimi ..	21
Fotoğraf 2.5. Bilyeli değirmen.....	22
Fotoğraf 3.1 Klinkerlere ait parlak kesitler.....	23
Fotoğraf 3.2. Klinkerlere ait ince kesitler .....	24
Fotoğraf 3.3. İncelemelerin yapıldığı bilgisayarlı polarizan mikroskop düzeneği .....	24
Fotoğraf 4.1. Niğde ÇİMSA'ya ait marn ocağı. ....	25
Fotoğraf 4.2. Döner fırın içinden görünüm .....	27
Fotoğraf 4.3. Klinker kristallerinin mikro görüntüleri.....	43
Fotoğraf 4.4. Klinker kristallerinin mikro görüntüleri.....	44
Fotoğraf 4.5. Klinker kristallerinin mikro görüntüleri.....	45
Fotoğraf 4.6. Trikalsiyum alüminat .....	46
Fotoğraf 4.7. İnce kesit 14/7 50X, alit kristalinin boyutu .....	52
Fotoğraf 4.8. İnce Kesit 14/7 50X Belit kristalinin boyutu .....	56
Fotoğraf 4.9. Amber sarısı belit kristalleri düşük sıcaklıkta uzun yanma süresi, yavaş ısıtma hızı ve klinkerin yavaş yavaş soğuması sonucunda oluşur .....	57

## SİMGE VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\mu\text{m}$

### Kısaltmalar

ISIC

SITC

TSEN

DPT

TOC

ICMA

PCA

### Açıklama

Mikrometre

### Açıklama

Uluslar Arası Standart Sanayi Tasnifi

Uluslar Arası Standart Anlaşma Tasnifi

Türk Standartları Enstitüsü

Devlet Planlama Teşkilatı

Toplam Organik Karbon

Dallas Uluslar Arası Çimento Mikroskopi Derneği

Portland Çimento Birliği

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

### 1.1 Amaç ve Kapsam

Bu çalışma, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalında “Çimento mineralojisi ve petrografisinin çimento teknolojisine katkısı” konulu yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Çimentolu malzemelerin, özellikle de betonun kalite kontrolünde geleneksel olarak pek çok tahribatlı ve tahribatsız yöntemler uygulanmaktadır. Örneğin; orijinal beton karışım oranlarının ve genel özelliklerin belirlenmesi, sertleşmiş betonda kullanılmış çimento tipinin tayini, betonun mikro yapı kalitesi ve ikincil reaksiyon ürünlerinin incelenmesi v.s gösterilebilir. Bu yöntemler betonun genel kalitesi hakkında fikir vermeleri açısından oldukça yararlıdır ve yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Buna ilave olarak, betonda oluşan çatlak ve diğer hasarların kaynağının tespiti, betonu oluşturan malzemelerin kalite kontrolünün yapılması ve çimentolu malzemelerin potansiyellerinin araştırılmasında geleneksel kullanılan yöntemlerden farklı metot ve tekniklerin kullanılma zorunluluğunu ortaya koymuştur. Ayrıca zaman zaman karşılaşılan işveren ile yüklenici firma arasındaki malzeme kalitesine yönelik oluşabilecek anlaşmazlıkların çözümünde de bu özel yöntemler büyük önem arz etmektedir. Bu teknikler arasında en önemlilerinden bazıları mikroskopi ve mikroskopi ile ilintili tamamlayıcı yöntemlerdir.

Yakın zamanlara kadar petrografinin çalışma kapsamına tabii kayaçların incelenmesi konuları girmekteydi. Bu beyanda tabii kayaçların ne miktarda, hangi minerallerden meydana geldikleri, özellikleri, kimyasal bileşimleri, tekstür ve strüktürleri, bulunuş nedenleri petrograflar tarafından incelenerek gerektiğinde petrolojik interpretasyonlara geçiliyordu ve geçilmektedir. Endüstri alanındaki gelişmeler başka dallarda olduğu gibi çimento teknolojisinde de mineralog ve petrograflardan faydalanılmasını gerektirmiş, başka bir ifadeyle yeni koşullar petrografların tabii kayaçlardan sunî kayaçlara yönelmesini de gerektirmiştir. Bu bir yandan petrografların yeni çalışma sahaları bulmasına yardım ettiği gibi, diğer yönden özellikle çimento sanayiinde kalitenin

kontrolü ve düzeltilmesi gibi çok önemli görevlerde büyük başarı sağlamıştır. Günlük yaşantılarda oldukça kenara itilmiş veya kenarda kalmış gibi görülen bu konunun az tanınmasının nedenleri çok basittir: İlk hatıra gelenler, bu konudaki yayınların azlığı, akademik kuruluşlarda bu sahada çalışanların fazla bulunmayışları ve özellikle yapılan araştırmaların özel kuruluşlar içinde rekabet yüzünden rapor olarak saklanılmalarıdır. Bugün teknolojik bir ilerleme çabasında bulunan Türkiye'de, özellikle çimento sanayindeki ilerlemelere rağmen, klinkerlerin petrografisi çok az bilinmektedir. Bu çalışma ile teknolojik ve ekonomik yönlerden büyük önem taşıyan klinkerlerin petrografisini ve mineralojisini, sunî bir kayaç olan çimentonun ne olduğunu ve neden meydana geldiğini tanıtılması gerekmektedir (Ayrancı, 1971; Campbell, 1999).

Bu kapsamda, Niğde ÇİMSA fabrikasının ürettiği çimentoya ait farklı zamanlarda ve farklı özellikler taşıyan klinkerlerden örnekler derlenmiş ve bunlar optik mikroskop incelemelerine tabi tutulmuştur. Bu incelemeler için Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Nikon marka E400 model, 500 kata kadar büyütme yapabilen bir polarizan mikroskop (ince ve parlakkesit inceleme özellikli) kullanılmıştır. Mikro fotoğraflar, optik mikroskop üzerine monte edilmiş dijital fotoğraf makinesi ile çekilmiştir. Bu incelemede alit ve belit minerallerinin boyutları ile belit mineralinin rengi ve alit mineralinin çift kırma indisi tespit edilmiştir.

## BÖLÜM II

### ÇİMENTO İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

#### 2.1 Çimento Tarihi ve Tanımı

Gelişmekte olan ülkeler arasında olan ülkemiz, henüz sanayileşme çabası içerisinde. Buna paralel olarak ihtiyaç duyulan en önemli sanayi kolundan biri çimento sektörüdür. Çimento üretimi ve kullanımı ülkelerin gelişmişlik düzeyi hakkında genel bilgiler veren bir parametredir. Bir yapı malzemesi olması bunun önemli bir nedenidir. Dünyadaki üretim gelişmelerine karşın ülkemizdeki üretim girdilerindeki yüksek fiyata rağmen Avrupa'daki en büyük çimento üreticisidir.

Çimento su ile karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonları ve prosesler nedeniyle priz alan ve sertleşen bir hamur oluşturan ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanım ve kararlılığını koruyan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır. Bu bağlayıcının hammaddesi olan pişirilmiş klinkerler, polarizan mikroskobu ve buna takılan "Opakilminatör" adı verilen ilave parça ile bütünleşen cevher mikroskopisi ile incelenmektedir.

Çimento kullanımı çok eskilere kadar uzanan, insanlık tarihinde en çok kullanılan bağlayıcı bir malzemedir. Bu insanların barınma, korunma ve daha sonra çeşitli amaçlarda kullandığı bir malzemedir. M.Ö 6700 yılında çatal höyükte inşa edilen evlerin duvarlarında kurutulmuş killerin bulunduğu, mısırlıların piramitleri birleştirmekte kullandıkları alçıtaşının pişirilmesiyle bağlayıcı alçının kullanıldığı belirlenmiştir. Eski Romalılar, Vezüv Yanardağı yakınlarındaki Pozzuoli kasabasında volkanik malzemeleri ince öğüterek, dayanımı ve bağlayıcılığı olan malzeme geliştirmişler ve daha sonra kireçtaşıyla karıştırmışlardır. Bu bağlayıcı özelliği olmayıp kireçle karışık bağlayıcı özellik kazanan hidrolik malzemelerde puzolan (pozzuoli'den gelen ) ismi verilmiştir. İlk portland çimentosunun 1824 yılında İngiliz duvar işçisi Joseph Aspdin tarafından keşfedildiği kabul edilir. Aspdin, doğal kili kalkerler yerine 3 birim kalker ve 1 birim kil ekleyip pişirmesi sonucu yeşilimsi gri renkli malzeme elde etmiştir. Bu renk güney İngiltere' de Portland yarım adasındaki killi kalkerleri andırıldığından dolayı Portland çimentosu ismini tescil ettirmiştir (Yeğinobalı, 2003).

Çimento, Uluslararası Standart Sanayi Tasnifinde (ISIC) 369 ana grup ve 3592 kod numarası, Uluslararası Standart Anlaşma Tasnifinde (SITC) 661.2 kod numarası, Türk Standartları Enstitüsüne (TS EN) göre 197 kod numarası ile sanayide kullanılan esas kimyasal maddeler grubunda yer almaktadır (D.P.T., 2008).

Çimento kelimesi almanca "ZEMENT" e karşılık gelirken, fransızca "CEMENT" olarak kullanılmakta, latincedeki karşılığı "COMENTUM" olup Türkçeye İtalyancadan geçmiş olduğunu otoriteler tarafından kabul edilmiş olup bağlamak veya bağ anlamına gelen "ÇİMENTO" olarak adlandırılmaktadır ( Kökipek, 2010).

Çimento, silisyum ( $SiO_2$ ), alüminyum ( $Al_2O_3$ ), kalsiyum ( $CaO$ ) ve demir oksitleri ( $Fe_2O_3$ ) içeren hammaddelerin, teknolojik yöntem ve metotlarla sinterleşme derecelerine kadar pişirilmesi ve elde edilen yan mamul madde olan klinkerin, tek veya daha fazla katkı maddesi katılarak öğütülmesi ile üretilen hidrolik bağlayıcı madde olarak tanımlanmaktadır. Genel anlamda çimento havada ve suda sertleşebilen bağlayıcı özellik ihtiva eden maddelerdir. Sertleştikten sonra su ve hava koşullarına karşı dayanıklı olup, ana bileşeni silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitlerin bileşiklerinden ve istenilen özelliğe göre eklenebilen katkı maddeleri ile meydana gelen dayanım ve hacim sabitliği bakımından belirli değerlere sahip uygun malzemelerdir. Çimento su ile birleştiğinde kimyasal tepkime gerçekleşir, ısı açığa çıkar ve bağlayıcı özellik kazanır. Çimento; % 65-85 aralığında kalker içeren killi kalkerden meydana gelen homojen karışımın, 1400 °C ile 1500 °C ye kadar pişirilmesi, öğütülmesi ve katkı maddeleri eklenmesiyle oluşturulur. Çimentoda; kireç taşı  $CaO$ , kil ise  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  kaynağı olarak kullanılır.

## **2.2 Çimento Çeşitleri**

Türk standartları enstitüsü 197-1 standardı genel amaçlı çimentoları CEM çimentoları olarak adlandırır. Klinkerin sabit bir standardı olmadığı için, klinkerlerde aranan özelliklerde, çimento standartları içerisinde belirtilmiştir. Bunlar 5 ana tip içerisinde toplanmaktadır. CEM I portland çimentosu, CEM II portland kompoze çimento, CEM III portland yüksek fırın cürüflu çimento, CEM IV puzolonik çimento, CEM V kompoze çimentodur. Bu çimentolar ana bileşimler ve minör bileşim ilave edilerek elde edilir.

Klinker içine ilave edilen malzeme kütlece %5 den fazla ise ana bileşen mineral katkıları kabul edilir. Eğer % 0-5 arasında bir katkı maddesi ilave edilmiş ise minör bileşim denir. Çimento bileşimlerinin belirlenmesi için TS EN 197-1 tablosunda aşağıdaki semboller kullanılmıştır.

- A: Çimentonun en az mineral katkı içeren tipi
  - B: Çimentonun A tipinden daha fazla mineral katkı içeren tipi
  - C: Çimentonun B tipinden daha fazla mineral katkı içeren tipi
  - K: Klinker
  - S: Granüle yüksek fırın cürufu
  - D: Silis dumanı
  - P: Doğal puzolan
  - Q: Doğal kalsine edilmiş puzolan
  - V: Silissi uçucu kül
  - W: Kalkersi uçucu kül
  - T: Pişmiş şist
  - L: Kalker (TOC < % 0.5)
  - LL: Kalker (TOC < %0.2)
- ( TOC: Toplam organik karbon)

Çimentoların dayanımı için 32.5, 42.5 ve 52.5 olmak üzere 3 dayanım sınıfı belirlenmiştir. Bu değerler TS EN 196-1'e göre tayin edilen ve MPa olarak ifade edilen 28 günlük basınç dayanımları ile ilişkilidir. TS EN 197-1'de karakteristik değerler olarak belirtilmişlerdir (izelge 2.1).

**Çizelge 2.1.** Gerekli mekanik ve fiziksel özellikler için karakteristik değerler (TS EN, 2002)

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)			Priz Başlama Süresi (dakika)	Genleşme (mm)	
	Erken Dayanım		Standard Dayanım			
	2 Günlük	7 Günlük	28 Günlük			
32.5N		≥16.0	≥32.5	≤52.5	≥75	≤10.0
32.5R	≥10.0					
42.5N	≥10.0		≥42.5	≤62.5	≥60	
42.5R	≥20.0					
52.5N	≥20.0		≥52.5		≥45	
52.5R	≥30.0					
	TSEN 196-1			TSEN 196-3		

N: Normal erken dayanım sınıfı

R: Yüksek erken dayanım sınıfı

L: Düşük erken dayanım sınıfı

Tabloda sembollerle okunan çimentonun hangi özellikleri ifade ettiği örneklerle aşağıda açıklanmıştır;

TS EN 197-1 CEM II/ B-M 42,5 R: Toplam olarak kütlece % 21-35 arası uçucu kül silis içeren dayanım sınıfı 42,5 olan yüksek erken dayanımlı portland kompoze çimento.

TS EN 197-1 CEM III/ A 32,5 R: Toplam olarak kütlece % 36–65 arasında Granüle Yüksek Fırın Cürufu içeren dayanım sınıfı 32,5 olan yüksek erken dayanımlı yüksek fırın cürufu çimento (Yeğınobalı ve Ertün, 2009).

### 2.3 Çimentonun Kullanım Alanları

Gelişen teknoloji çimentonun yerine, bağlayıcı özelliği olan, ekonomik, kullanımı yaygın şuan kadar başka bir malzeme koyamamıştır. Durum böyle olunca çimentonun kullanım alanları, uygulama sırasında ortamın koşulları, kimyasal bozunmalara karşı çimento

çeşitleri belirlenmiştir. Ayrıca firmalar işin durumuna, kullanım isteğine göre özel çimentolarda üretmektedirler. Aşağıdaki tabloda çimentoların kullanım alanları kabaca gösterilmiştir (Çizelge 2.2).

**Çizelge 2.2.** Çimento çeşitlerinin kullanım alanları (ÇİMSA).

Standart	Çimento Tipi		Kullanım Alanı	Özellikleri
TS EN 197-1	Portland Çimento	CEM I 42,5 R	Genel kullanıma uygundur. Erken kalıp alınması gerektiği durumlarda kullanılması uygundur (prefabrik uygulamalar). Soğuk havada beton dökümünde tercih edilir.	Yüksek erken ve nihai mukavemet sağlar.
TS EN 197-1	Portland Kompoze Çimento	CEM II / B-M (V-L) 42,5 R	İlk dayanımı yüksek olduğundan dolayı genel kullanıma uygundur. Sıcak havada beton dökümünde tercih edilir. Orta derecede sülfat içeren endüstriyel zeminlerde uygulanır. Alkali Agrega reaksiyon riskinin fazla olduğu yapılarda da kullanılabilir.	Betonda oluşan su ihtiyacını azaltır. İçerdiği ince dolgu malzemeleri, beton içindeki mikro gözenekleri sıkılaştırır ve geçirimsizliğini artırır. Kendi sınıfı içinde erken ve nihai dayanımı yüksek çimento grubunda yer alır.
		CEM II / A-M (P-L) 42,5 R	Geniş uygulama alanına sahiptir. Özellikle sıcak havada beton dökümünde tercih edilir. Orta derecede sülfat içeren endüstriyel zeminlerde uygulanır. Alkali agregası reaksiyon riskinin fazla olduğu yapılarda da kullanılır.	İçerdiği ince dolgu malzemeleri, beton içindeki mikro gözenekleri sıkılaştırır ve geçirimsizliğini artırır. Kendi sınıfı içinde erken ve nihai dayanımı yüksek çimento grubunda yer alır.
		CEM II / A-M (P-L) 42,5 N	Yapı kimyasalı sektöründe kullanılır (sıva ve şap uygulamalarında). Özellikle düşük hidratasyon ısı ile sıcak hava ve kütle betonu uygulamalarında tercih edilir (baraj yapımında). Orta derecede sülfat içeren endüstriyel zeminlerde uygulanır. Alkali agregası reaksiyon riskinin fazla olduğu yapılarda da kullanılır.	İçerdiği ince dolgu malzemeleri, beton içindeki mikro gözenekleri sıkılaştırır ve geçirimsizliğini artırır. Kendi sınıfı içinde nihai dayanımı yüksek çimento grubunda yer alır.
		CEM II / B-M (P-L) 32,5 R	Sıva, şap ve harç gibi uygulamalarda tercih edilir.	Standart nitelikte betonlarda ve yapılarda tercih edilen çimentodur.

## Çizelge 2.2. Devamı

Standart	Çimento Tipi		Kullanım Alanı	Özellikleri
TS EN 197-1	Portland Kalkerli Çimento	CEM II / B-L 42,5 R	Karo, yapı kimyasalı ve prekast alanında geniş kullanım imkânı bulunur.	Türkiye'nin en yüksek beyazlığına sahip çimentosudur. Yüksek ve nihai dayanıma sahiptir.
		CEM II / A-L 42,5 R	Özellikle bims üretiminde kullanılır. Bims üreticilerine özel olarak dizayn edilmiştir.	Erken priz alma, erken yüksek dayanım, düşük kürlenme süresiyle, şeritleme ve sevkiyatta yüksek performans sağlar.
TS EN 197-1	Puzolanik Çimento	CEM IV / B (P) 32,5 R	Sıva, şap ve harç gibi uygulamalarda tercih edilir.	Standart nitelikte betonlarda ve yapılarda tercih edilen çimentodur.
EN 197-1 TS 21 ASTM C 150	Beyaz Portland Çimento	CEM I 52,5 R BPÇ 52,5R/85 Tip I	Yapı kimyasalı, karo üretimi, prekast (öngermeli travers ve gre beton uygulamaları) sektörlerinde kullanılır.	Türkiye'de ilk kez Çimsa tarafından üretilmiş olup, sahip olduğu min. 85 beyazlık ile yüksek dayanım sağlar.
TS EN 197-1	Yüksek Fırın Cürüflü Çimento	CEM III / A 32,5 R	Düşük hidratasyon ısısı özelliği ile özellikle büyük yapı elemanlarının imalatında ve yüksek sıcaklıkta beton dökümü uygulamalarında kullanıma uygundur. Sıva, şap ve harç imalatlarında tercih edilir.	Düşük hidratasyon ısısı sağlar. Yüksek oranda cüruf içerir.
TS EN 10157	Sülfatlara Dayanıklı Çimento	SDÇ 42,5 R	Deniz suyu, kanalizasyon gibi yüksek sülfata maruz kalan ortamlarda kullanılması tavsiye edilir.	Düşük C3A miktarına sahiptir. Bu durum sülfata dayanıklı olmasını sağlar.
TS EN 14647	Kalsiyum Alüminat Çimentosu	CAC ( ISIDAÇ-40 )	Refrakter, yapı kimyasalları ve prekast alanlarında kullanılır.	Türkiye'de sadece Çimsa tarafından üretilmekte olup özel çimento sınıfındadır. 6 ve 24 saatlik yüksek mukavemet değerleri ile Portland Çimentosu'ndan çok daha yüksek dayanıma sahiptir. Isıl direnci ve sülfat dayanımı çok yüksektir.

## 2.4 Çimento Hammaddeleri ve Katkı Maddeleri

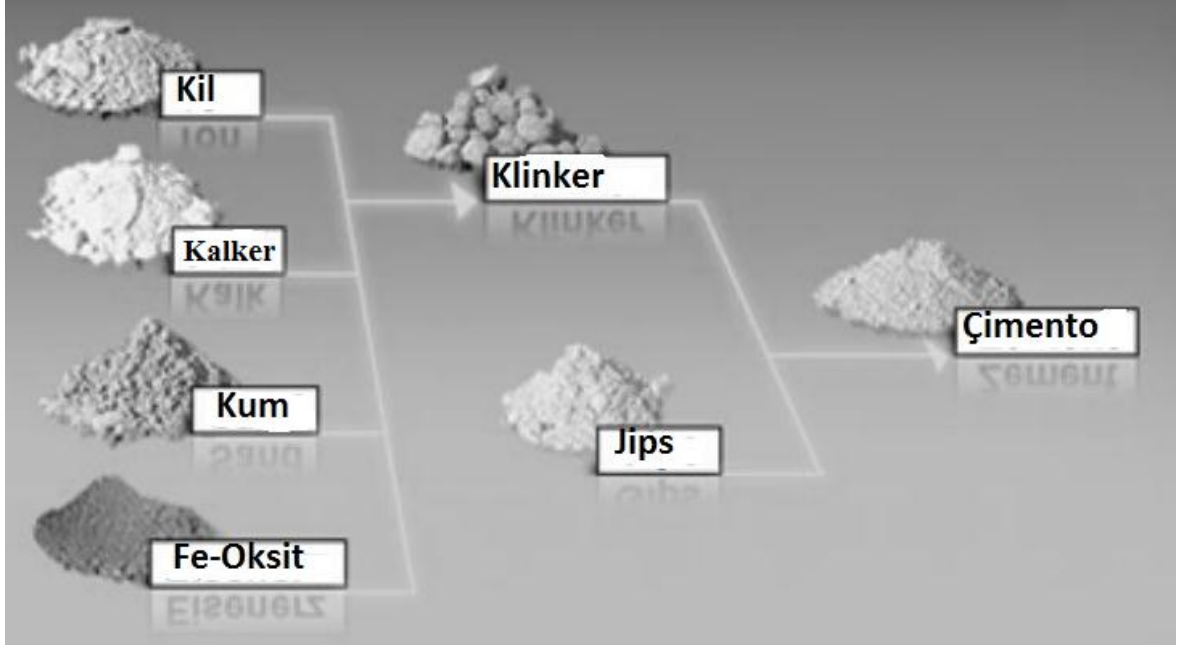
Çimento; CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi bileşenlerin uygun sıcaklıkta pişirilip isteğe göre katkı maddelerinin eklenip öğütülmesi sonucu meydana gelir. Bu mineralleri oluşturan hammaddeler; kalker, kil ve ayrıca bunların doğal orantılanmış hali olan marndır. Kireç taşından veya kalkerden çimento için gerekli olan kalsiyum karbonat elde edilir. Kilden ise silisyum oksit, alüminyum oksit ve demir oksit gereksinimleri karşılanır. Eğer kilden alüminyum ve demir oksit ihtiyacı karşılanamıyorsa hammadde karışımı olan farine yeterli oranlarda kuvars ve demir mineralleri eklenir. Sedimanter oluşumlu bu kayaçlar doğada rahatça bulunabilirler. Ayrıca bunların yanında istenilen özelliğe ve niteliğe göre çimentoya çeşitli hammaddeler ilave edilir. Bunlar puzolonik maddeler, demir ve alüminyum cevheri, doğal alçı ve yapay alçı olarak sıralayabiliriz. Örneğin portland çimentosuna priz ayarlayıcı olarak öğütme aşamasında yaklaşık %3-5 oranında anhidrit (CaSO<sub>4</sub>, alçıtaşı) ilave edilir.

Çimento hammaddeleri klinker mineralojisini doğrudan etkilediği için belli oranlarda hazırlanması gerekir. Bu çimento kalitesini etkileyen temel sebeptir. Doğadan çıkarılan hammaddeler saf halde bulunmadığından farin hazırlanması esnasında belli oranlar aralığında kalması istenir. Örneğin CaO oranının istenilen değerler dışında olması klinker mineralleri olan alit ve belitin düşük ve yüksek olması anlamına gelir ki buda çimento mukavemetinin değişmesine yol açar.

2006 yılında araştırmalar sonucunda dünyada klinker üretiminde kullanılan hammaddenin yaklaşık %5'inin alternatif hammadde olduğu belirlenmiştir. Kanalizasyon çamuru, kullanılmış araç lastikleri, kontamine olmuş toprak bunlara örnektir (T.Ç.M.B., 2011).

### 2.4.1 Çimentonun hammaddeler

Tereci (2003), tamamladığı yüksek lisans tezi kapsamında Niğde ÇİMSA fabrikasının ürettiği çimentoya ait hammaddeleri inceleyerek bunların jeolojik, mineralojik ve petrografik özelliklerini açıklamıştır.



**Fotoğraf 2.1.** Çimento ana hammaddeleri

#### 2.4.1.1 Kalker

Kimyasal olarak % 90 dan fazla  $\text{CaCO}_3$  bulunan kayalara kalker yada kireç taşı denilir. Mineralojik olarak incelendiğinde saf halde kalsit az miktarda aragonit içerdiği görülür. Kalsit ve aragonit; kalsiyum karbonatın iki ayrı kristal şekli olup, teorik olarak % 56 CaO ve % 44  $\text{CO}_2$  içerir. Ancak doğada hiçbir zaman saf olarak bulunmaz. Sertlik derecesi 3, özgül ağırlığı 2,5- 2,7  $\text{gr/cm}^3$  dür. Oluşum süreçlerine bakıldığında kalker iki ana grupta toplanabilmektedir. Sedimanter kayaç grubunda olan bu kayalar detritik veya kimyasal oluşumludurlar. Kireçtaşlarının içerdikleri  $\text{CaCO}_3$  oranları onun saflıklarını bildirir (Çizelge 2.3).

Kalkerler hangi yolla oluşurlarsa oluşsunlar, doğada buldukları durumları ile bileşimlerinde; kalsiyum karbonatın yanı sıra, magnezyum karbonat, kil mineralleri, demir silikat oksit ve sülfürleri, silisyumdioksit ( $\text{SiO}_2$ ) gibi bileşikler içerirler. Bu bileşiklerin bir kısmı kalker oluşumu esnasında ve oluşum ortamının koşullarına bağlı olarak meydana gelebildiği gibi bir kısmı da diyajenez esnasında da meydana gelebilir. Bu durumda kökene bağlı olarak içerdikleri primer safsızlıkları oluştururlar (Kökipek, 2010).

**Çizelge 2.3.** CaCO<sub>3</sub> içeriğine göre kalkerlerin sınıflandırılması ( D.P.T., 2001)

Adlandırma	% CaCO <sub>3</sub>	% CaO
Çok fazla Saf kalker	>98.5	>55.2
Çok saf kalker	97-98.5	54.3-55.2
Orta saf kalker	93.5-97.5	52.4-54.3
Az saf kalker	85-93.5	47.6-52.4
Saf olmayan kalker	<85	<47.6

#### 2.4.1.2 Kilitaşı

Çimentonun ikinci derecede temel hammaddesi kildir. Kil terimi genel bir kavram olup, kimyasal bileşimi esas alınarak kesin sınırlar içinde tanımı yapılamamaktadır. Mineralojik olarak bileşiminde % 90 oranında kil minerali içeren kayalara denmektedir. Kil mineralinin esas unsuru kimyasal bileşiminde alüminyum oksit bulunması ve alüminyum silikat hidratlarından meydana gelmiş olmasıdır. Demir, alkaliler ve toprak alkaliler değişik oranda bulunurlar. Çıplak gözle görülmezler boyutları 2 mikrondan küçüktür. Bunlardan en önemli olanları, kaolinit grubu kil mineralleri (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O) ve montmorillonit grubu kil mineralleridir (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.4SiO<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O+nH<sub>2</sub>O). Kil mineralleri esas olarak alüminyum silikatlardan oluşur, geriye kalan az miktarda magnezyum, kalsiyum, potasyum, ve sodyum elementleri içerirler. Kil mineralleri ender bir biçimde saf olarak doğada bulunur. Mineralojik analizlerde kil mineralinin dışında bulunan safsızlıkları oluşturan unsurlar ve bunların yüzde miktarları hesaplanır. Çimento yapımında kullanılan kilin kimyasal bileşimi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı 2/1 civarında olmalıdır. Kuvars veya kalsedon halinde serbest silis bulunan killerde SiO<sub>2</sub> yüzdesi yüksektir. Bu killeri üretim sırasında güçlükler çıkarır. Alkali metal oksitlerin miktarının kil içinde % 0.5 in altında olması istenir (Tereci, 2003; Yalçın ve Gürü, 2006).

### 2.4.1.3 Marn

Niğde ÇİMSA çimento fabrikasının marn ocağı, fabrika yakınında geniş bir alana yayılmış yamaç molozu konisidir (Foto 4.1).

Kalker ve kilin doğada, % 50-70 oranında kalker ve %30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayaca marn denilmektedir. Oluşum bakımından tamamı ile sedimanter olup, diyajenez geçirmiş genellikle düzenli tabakalı olarak bulunur. Marn oluşumu için, daha çok tektonik ve orojenik hareketlerin durulduğu, sakin ortamlar daha uygundur. Jeolojik bakımdan marn,  $\text{CaCO}_3$  'ün ve killi maddelerin aynı zamanda çökelti sonucunda oluşmuş bir tortul kayadır (Çizelge 2.4). Marn çökelleri genellikle çok geniş ve devamlı çökeller olup, çökel havzasının çevresindeki ortam ve kayaç yapısının etkisi bulunmaktadır.

**Çizelge 2.4.** Kayaçların  $\text{CaCO}_3$  oranları (D.P.T., 2001)

<b>%<math>\text{CaCO}_3</math> Oranı</b>	<b>Hammadde Adı</b>
99-100	Mermer
90-98	Kalker
75-89	Kalkerli Marn
40-74	Marn
10-39	Killi Marn
2-9	Marnlı Kil
0	Kil

Çimento klinkeri ortalama % 70 kalker ve % 30 kil içeren hammadde karışımının öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile elde edilmektedir. Marn, doğal olarak bu bileşimi taşıdığından veya bu bileşime çok yakın özellikte bulunduğu için ideal çimento hammaddesidir. Ayrıca kalkere göre daha yumuşak olması nedeniyle kolay öğütülebilmekte, kırma-öğütme işlemleri sırasında enerji tüketimi düşük olmaktadır.

## 2.4.2 Çimento Katkı Maddeleri

### 2.4.2.1 Puzolanik maddeler

Puzolanik maddeler, kendi başlarına hidrolik bağlayıcı özelliğine sahip olmadıkları halde ince olarak öğütüldüklerinde nemli ortamda ve normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksitle tepkimeye girerek bağlayıcı özellikte bileşikler oluşturan doğal veya yapay maddelerdir. Genellikle volkanik kökenlidir. P sembolü ile ifade edilir ve Türkiye' de tras olarak adlandırılır. TS EN 197-1'e doğal puzolanlarda reaktif silis miktarı en az % 25 olmalıdır. Puzolanik maddelerin özelliği; yüksek miktarda  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içermeleridir. Bu nedenle  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile tepkimeleri kolaydır ve bu özellikleri nedeniyle bağlayıcı özellik gösterirler. Ülkemizde çimento sanayinde doğal puzolanik katkı maddesi olarak, tras ve bazik nitelikli volkanik işlevlerin bir ürünü olarak oluşan doğal cüruflar yaygın olarak kullanılmaktadır (D.P.T.,2001).

Çimento maliyetlerinin düşürülmesi açısından katkı maddelerinin yüksek oranda katılabilir kalitede olmaları önemlidir. Puzolanik aktivite değerleriyle çözünmüş kalıntı oranları katılabilirlik oranını belirleyen faktörler olup, katılım oranları genelde % 10 – 30 arasında değişmektedir (Kökipek, 2010).

### 2.4.2.2 Uçucu küller

Uçucu küller ya da pulverize yakıt külleri, özellikle elektrik üretim tesislerinin pulverize kömür ile işleyen fırınlarının toz tutma ünitelerinden sağlanan materyallerdir. Küresel biçimde olup,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içerirler. Diğer puzolanik maddeler gibi,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile tepkimelerinde hidrolik bağlayıcı nitelik kazanırlar. Diğer taraftan yanmış karbon kalıntılarını da içermesi olasıdır. Bu da çimento ve beton mukavemetlerine olumsuz yönde etki yapar. Uçucu küllerin spesifik yüzeyi ne kadar büyükse reaktivitesi de o kadar yüksektir. Kül partiküllerin tane boyu ise 0.5-200 mikron arasındadır. İri taneli uçucu küllerden istenen çimentoyu üretmek için jips ve klinker ile öğütmeye tabi tutulması gerekmektedir ( D.P.T., 2001).

### 2.4.2.3 Granüle yüksek fırın cürufu

Cüruflar çeşitli metalürji tesislerinden elde edilen artık madde gruplarından biridir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ürettiği ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak birbirinden çok farklılık gösterir. Örneğin yüksek fırın cüruflarının kendi başına bağlayıcı özelliği olmasına karşın nikel ve bakır cüruflarının yalnızca puzolanik özellikleri vardır (Kökipek, 2010).

Yüksek fırında pik demir elde edilirken demir cevheri içindeki  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeren gayri saflıklar yumuşatıcı olarak katılan kalkerdeki CaO tarafından bağlanır. Bu şekilde oluşan cürufun bileşimi portland çimentosuna büyük benzerlik gösterir. Fırın çıkışında hızla soğutulması ve en az 2/3 oranında camsı faz içermesi gerekir. Ayrıca içindeki CaO, MgO ve  $\text{SiO}_2$  miktarları gene en az 2/3 oranında olmalıdır.  $\text{CaO}+\text{MgO}/\text{SiO}_2$  orantısının ise birden fazla olması istenmektedir (Yeğınobalı ve Ertün, 2009).

### 2.4.2.4 Alçıtaşı

Niğde ÇİMSA alçı taşı ihtiyacını Niğde ili, Ulukışla ilçesi yakınlarında yer alan açık işletmeden sağlamaktadır (Tereci 2003).

Alçıtaşı, kimyasal bileşimi kalsiyum sülfat olan bir mineraldir. Bileşiminde iki molekül kristalizasyon suyu bulunan türüne jips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) denir. Susuz kalsiyum sülfat ise, anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ ) olarak adlandırılır. Kalsiyum sülfat mineralleri evaporit oluşumlu yatakların tipik mineralleri olup, her birinin ayrı ayrı bulunduğu yataklar olmasına rağmen genellikle bu iki hammadde birlikte incelenmektedir. Anhidrit jipse oranla daha az ekonomik önemi olan bir mineraldir ve daha az kullanma alanı vardır. Çimento sanayi alanında da genellikle jips kullanılmaktadır.

Jips ve anhidrit hiçbir zaman saf halde bulunamazlar. Bu iki mineralden her biri yarı dengeli olup, biri diğerine dönüşebilmektedir. Ayrıca alçıtaşı yataklarına oluşum sırasında veya sonradan yabancı maddeler karışmış olabilir. Bu yabancı maddelerin başlıca olanları; kalker, dolomit, manyezit, tuzlar, kil mineralleri, diğer sülfatlar ve metal oksitli bileşiklerdir. Alçıtaşı çimento sanayinde genellikle maden ocağından çıktığı kalitesi ile hiçbir işleme tabi tutulmaksızın kullanılmaktadır.

#### **2.4.2.5 Demir cevheri**

Sanayinin en önemli hammaddelerinden birini oluşturan demir, saf halde gümüş parlaklığında olup kolayca oksitlendiğinden doğada nabit (serbest) halde ender olarak bulunur. Demir cevherleri oksitler, sülfürler, sülfatlar ve karbonatlar olmak üzere dört grupta toplanırlar. Demir cevheri farinin döner fırında sinterleşme sıcaklığını ayarlayan bir katkı maddesidir. Çimento sanayinde kullanılanlar ise; hematit, götit ve limonittir.

### **2.5 Çimento Üretimi**

#### **2.5.1 Farin hazırlanması**

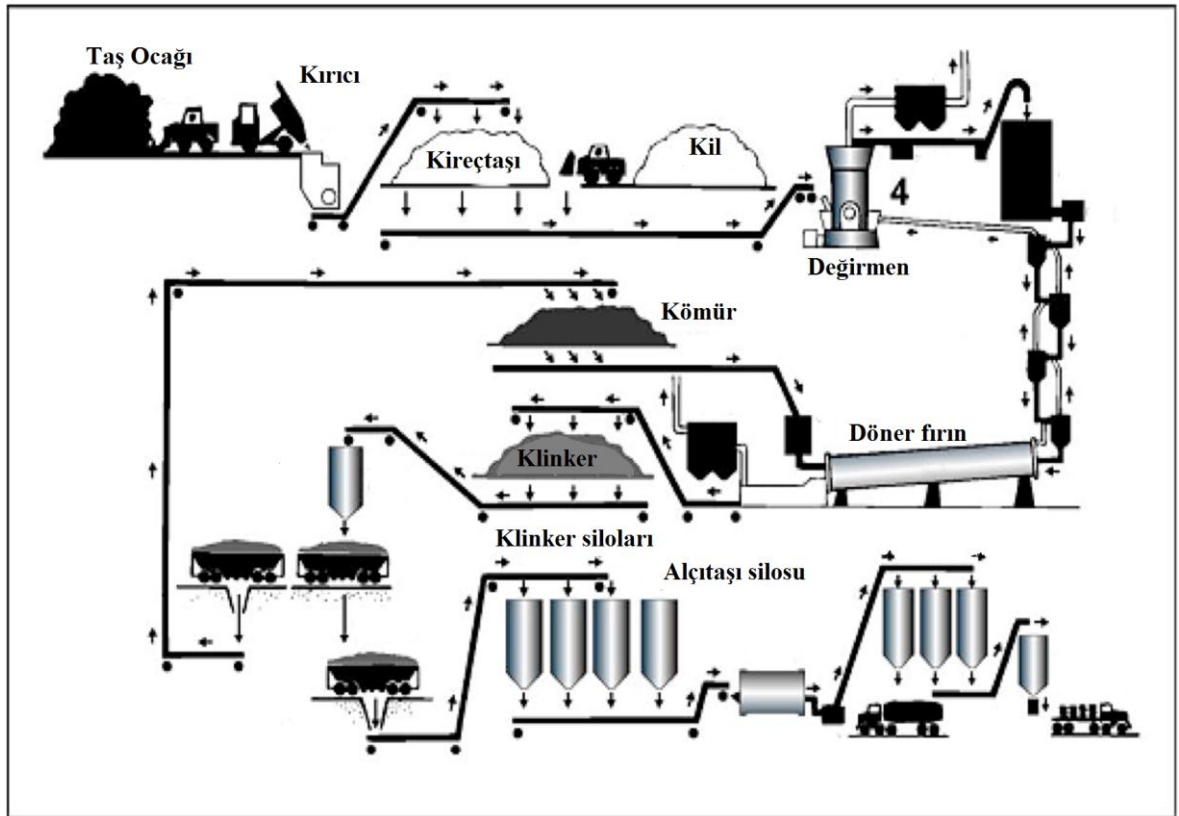
Çimentonun hammaddesi olan kil ve kalkerin belirli oranlarda homojen bir karışımını elde etmek için iki yöntem kullanılır. Bunlar yaş ve kuru yöntemdir. Günümüzde hammadde hazırlanmasında teknolojik gelişmelerden dolayı hammadde durumu ne olursa olsun, doğrudan doğruya kuru yöntemin uygulanması daha doğru bulunmuştur. Bugün bütün modern çimento fabrikaları, daha az yakıt sarfiyatından dolayı kuru yöntemi kullanmaktadır. Dünya çimento üretiminin % 90' ı kuru yöntemle sağlanmaktadır.

##### **2.5.1.1 Yaş sistem**

İlkel malzemenin yumuşak ve nem oranının % 20' den fazla olması halinde bu yöntem uygulanır. Bileşim kontrolü daha kolay sağlanmakta ancak kuru yönteme göre daha fazla enerji ve yakıt sarfiyatı olmaktadır. Yakıt sarfiyatının artması nedeniyle bugün dünyadaki çimento üretiminin ancak % 10' u yaş yöntemle yapılmaktadır. Kuru yöntemden farklı olarak analizler sonucunda birbirine karıştırılacak miktarları tespit edilmiş olan ilkel maddelerden kil önce büyük havuzlara gönderilip su içinde dağılması sağlanır. Daha sonra kalkerle birlikte yaş olarak değirmende öğütülmekte ve buradan tekrar havuzlara gönderilmektedir. Bu havuzlarda karışım homojen hale getirilmektedir. Bundan sonraki işlemler kuru yöntemdeki gibidir (Kökipek, 2010).

### 2.5.1.2 Kuru sistem

Bu yöntem Almanların geliştirdikleri Waermeaustauscher (ısı değiştirgeçli) sistemine göre uygulanmaktadır. Bu yöntemde, kalsinasyon işlemi siklonlarda olmakta ve bunun için dört adet siklon kullanılmaktadır (şekil. 2.1). Titrasyonu istenilen orana getirilmiş farin, bu siklonlardan yukarıdan aşağı inerken, aşağıdan ve ters istikametten gelen sıcak gazla karışır ve H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> kaybederek fırına gelir (Kökipek, 2010).



Şekil 2.1. Kuru sistemde çimento üretim akış şeması

Çimento hammaddeleri olan kireç ve silis doğada; kireç taşından, mermerden, kilden, marndan elde edilir. Bu hammaddeler tesislere getirilerek işlemlere tabi tutulurlar. Hammaddeler madencilik metotlarına göre açık işletmeler şeklinde olur. Kireç taşları patlatma veya kırma metotlarıyla fazla iri olamayacak şekilde çıkartılması sağlanır. Fazla büyük olması gereksiz enerji sarfiyatına neden olmaktadır. Araziden getirilen hammadde tesislerde çeşitli kırıcılardan geçirilir. Bu kırıcılar tesisin çalışma pozisyonuna göre belirlenir. Hammaddeleri kırmak için darbeli (çekiçli) kırıcılar, valsli

kırıcılar, çeneli kırıcılar ve jiroskobik kırıcılar tercih edilir. Diğer bir hammadde olan kil ise araziden eksavatörler ile çıkarılır.

### **2.5.2 Hammaddelerin harmanlanması ve homojenleştirilmesi**

Klinker oluşumunda reaksiyonlar katı fazda gerçekleştiği için, ilkel malzemelerin çok iyi karıştırılması ve çok ince bir dağılım haline getirilerek temas yüzeylerinin mümkün olduğu kadar artırılması gereklidir. Bu nedenle çimento üretiminde ilkel malzemenin ufalanması ve öğütülmesi işlemleri çok önemli yer tutar ( Yalçın ve Gürü, 2006).

Üretilen hammaddenin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin değişmeden sürekli bir akış göstererek yapılan karıştırma ve yüzdeler oranlarını ayarlama sistemine homojenizasyon sistemi denilmektedir. Homojenlik değişik malzemelerin aşağı yukarı aynı tane iriliklerine indirilmesi karışımın herhangi bir yerinde aynı oranda dağılmış olması ve öğütme tane iriliklerinin mikron boyutlarına kadar indirilmesidir. Hammadde uygun bir şekilde öğütülemezse reaksiyon süresi uzar ve sinterleşmemiş bir klinker meydana gelir (Kökipek, 2010).

Hammadde homojenizasyonu için çimento üretiminde dört ana prosesleme alanı bulunmaktadır. Bunlar;

- Ocak
- Kırılmış malzeme stok yığını
- Öğütme sistemi
- Toz halindeki malın depolama- harmanlama sistemidir.

Ocak işletme yöntemleri, saha hakkında edinilen bilgilere dayanılarak seçildiğinden ocakta çıkarılan malın kalite değişimlerini asgariye indirecek bir ön homojenizasyona imkân vermektedir. Stok yığını homojenizasyonu ya da harmanlama yatağı bir haftalık bir üretim kapasitesinde yapılmakta olup, hem değişik üretim hızlarını tamponlayıcı bir işlevi görür hem de malzemenin genellikle uzunluğuna tabakalar halinde yayılmasının ve tabaka yönüne dik açılarda, yığından alınıp kullanılmasını sağlamakla, hammaddenin kimyasal değişikliğine dar sınırlar içinde tutmaya yardım etmektedir. Böyle bir

harmanlama yatağı adeta kalite değişkenliğine karşı bir filtre görevini yerine getirmektedir.

Minerallerin homojenizasyonunda üçüncü aşama farin değirmenleridir. Bu sistem hem malın daha ince öğütülmesini, değişimlerin büyük sınırlar içerisinde oynamamasını ve fırın içinde daha iyi kalsinasyon geçirmesini sağlar. Kısa zaman sürecinde kimyasal değişimleri ortadan kaldırır.

Endüstride çok yaygın olarak kullanılan stok yığına homojenizasyonu çalışması ise iki grup adı altında özetlenebilir.

- Birbirine karışmış hammadde komponentlerinin homojenizasyonu.
- Orantılı bir karışım hazırlamadan önce hammaddelerin tek tek homojenizasyonu

Birçok geometrik yığma şekli mevcuttur. Yığmada kullanılacak geometrik şeklin seçiminde, yer imkânı, depolanacak mal miktarı, ocak ve fabrika arasındaki coğrafik ilişki, yığma ve yığın kullanma hızları arasındaki ilişki kullanılan istifleyici ve toparlayıcıların tipleri önem taşımaktadır. İstifleyici ve toparlayıcı tipleri yapılacak harmanlamanın mertebesine ve çalışacak malın durumuna göre seçilir (Kökipek, 2010).

#### **2.5.4 Çimento hammadde karışımının (Farinin) pişirilmesi**

Çimento üretiminde, hammaddelerin klinker haline yani çimentodan bir adım önceki ara malzemeye dönüştürülmesi üretimin temel ünitesini oluşturur. Çimento fabrikalarına karakteristik görüntüsünü veren kuleler ve döner fırınlar bu aşamada kullanılır. Klinker üretiminde hammaddeler üç ana işlemde geçerler.

- Ham maddelerin ön ısıtıcılardan geçmesi
- Döner fırında pişirilmesi
- Klinkerin soğutulması

#### 2.5.4.1 Ön ısıtıcılar

Kimyasal içeriği tespit edilmiş silolardan istenilen uygun oranlarda harmanlanıp istenilen inceliğe kadar öğütülmüş hammadde karışımı döner fırında pişirilmeden önce ön bir ısıtmaya tabi tutulur. Bu işlem iki şekilde gerçekleştirilir. Bunlardan birincisi ızgaralı bir sistem olup fırın ağzında ızgaralarla taşınan malzemenin sıcak gazlara maruz kalarak ısıtılması işlemidir. En çok kullanılan diğer bir yöntem olan siklonlu ön ısıtıcıdır (Foto 2.2.).



**Fotoğraf 2.2.** Ön Isıtıcı Sistemi (Niğde ÇİMSA).

Fırından gelen sıcak gazlar yüksekliği 60 m geçen ön ısıtma kulelerinde seri halindeki siklonlardan geçerek farinle buluşur ve ön ısıtma gerçekleşir. Ön ısıtmaya giren malzeme yaklaşık 600 °C de döner fırın için hazırlanmış olur. Ön ısıtma pişirilmeden önce ciddi bir enerji tasarrufu sağlar. Çünkü burada amaç hammaddenin ısınması olsa da aynı zamanda malzeme kalsinasyona başlamıştır. Siklonlar içinde ilk olarak farinin kaba suyu nemi buharlaşır ve içine karışmış organik maddeler yanar. Yaklaşık 600 °C de kil içinde bulunan su ayrışır. Daha sonra  $\text{CaCO}_3$  ve  $\text{MgCO}_3$  bileşiklerinden  $\text{CO}_2$

büyük ölçüde ayrışır. Fırın girişinde hammaddelerin kuru ağırlığının yaklaşık üçte biri kaybolur.

#### **2.5.4.2 Döner fırında pişirme**

##### **2.5.4.2.1 Döner fırın**

Klinkerin pişirilme işlemi döner fırında gerçekleştirilir. Döner fırın dünyada endüstri tesislerinde bulunan en büyük proses elemanı olarak kabul edilir. Çapı 3-7 m, uzunluğu 50-75 m kadar olup 50mm kalınlığında çelik saçtan yapılmış, refrakter tuğla astarlı dev bir borudur. Yaklaşık % 3-4 eğimli olarak monte edilen fırın dakikada 1,5- 4 devir yaparak döner (Foto. 2.3). Fırında yakıt olarak doğal gaz, toz kömür veya sıvı yakıtlar kullanılır. Fırının alt ağzında bulunan yanma borusundan çıkan beyaz kor haldeki alevin sıcaklığı 1870 °C ye kadar çıkar. Fırın içi sıcaklığı yaklaşık 1450 °C olur ve en sıcak bölgede fırın içindeki malzeme ergir ve sıvılaşmaya başlar . Böylece küçük taneler birleşerek büyük parçalar halinde klinker malzemesini meydana getirir. Döner fırın yüksek sıcaklığa maruz kaldığı için belli dönemlerde periyodik bakımları vardır. Ayrıca refrakter tuğlalar zamanla aşınır ve değiştirilir (Foto. 2.4). Fırına örülen tuğlalar her yerde aynı olmaz. Alevin konumuna göre değişik bölgelere değişik tip ve özellikte tuğlalar kullanılır. Ateşten en çok etkilenen alev borusuna yakın olan bölgede krom magnezit içerikli diğer bölgeler ise alüminyum içerikli tuğlalar kullanılır.



**Fotoğraf 2.3.** Çimento farin pişirme fırını (Niğde ÇİMSA).



**Fotoğraf 2.4.** Döner fırında tuğla değişimi (Niğde ÇİMSA).

#### **2.5.4.4 Klinkerin çimentoya dönüştürülmesi**

Döner fırında pişirilen malzeme ani bir soğutmaya maruz kalarak klinker meydana gelir. Klinker çimento sanayisinde ara ürün olarak kabul edilir. Bu ara malzeme içine belli oranlarda alçıtaşı eklenerek çimento meydana gelmiş olur. Klinker ara mamul ihraç malzemesi olarak kullanılabildiği gibi başka bir fabrikaya da transfer edilebilir.

Klinker fırından çıktığında yaklaşık 2cm lik parçalar halinde bulunur. Bunun çimento inceliğine kadar öğütülmesi gerekir. Çimento 40 mikronun altında bir inceliğe sahip olup ortalama 15–20 mikrondur.

Çimento fabrikalarında klinkerin ve alçıtaşının öğütülme işlemi genelde bilyeli değirmenlerde gerçekleştirilir (Foto. 2.5). Teknolojinin gelişmesiyle değirmenler çeşitli değişimler geçirmiştir. Başlarda bilyeli borular şeklinde kullanılırken günümüz değirmenlerin içleri iki ya da üç kamaralı şekilde imal edilmektedir. Değirmenlerin içleri istenilen inceliğe göre bilyelerin boyutları değişir ve yaklaşık üçte biri kadar bilyeyle doldurularak klinkerin öğütülmesi gerçekleştirilir. Klinker doğrudan soğutuculardan değirmene geldiği için öğütme sırasında basınçlı su verilerek sıcaklığın daha da artmasının önüne geçilmeye çalışılır.

Klinkerin öğütülmesi çimentodan bir adım önceki işlemdir. Çimento; klinker içerisine ağırlıkça %3–5 oranında alçıtaşı öğütülmesiyle portland çimento üretilmiş olur. Alçıtaşı çimento içerisindeki rolü priz süresini geciktirmektir. Ayrıca son yıllarda gelişen sektör ile istenilen çimento tipine göre katkı maddeleri eklenir.



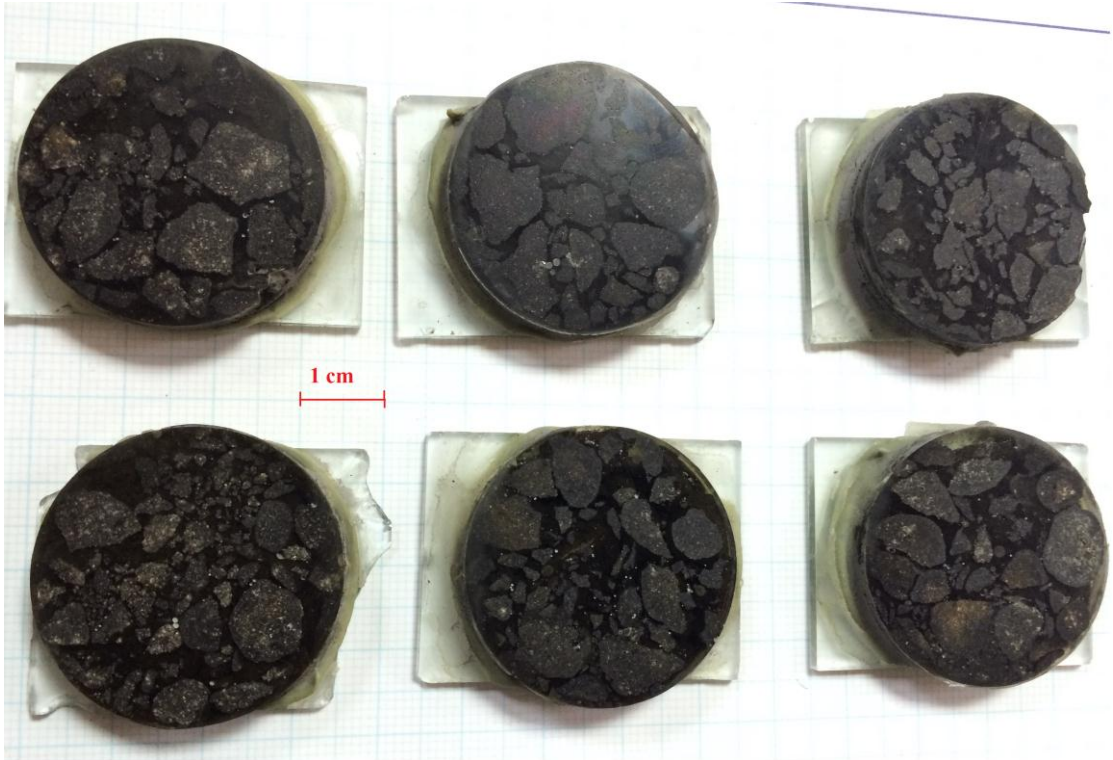
**Fotoğraf 2.5.** Bilyeli değirmen (Niğde ÇİMSA).

## BÖLÜM III

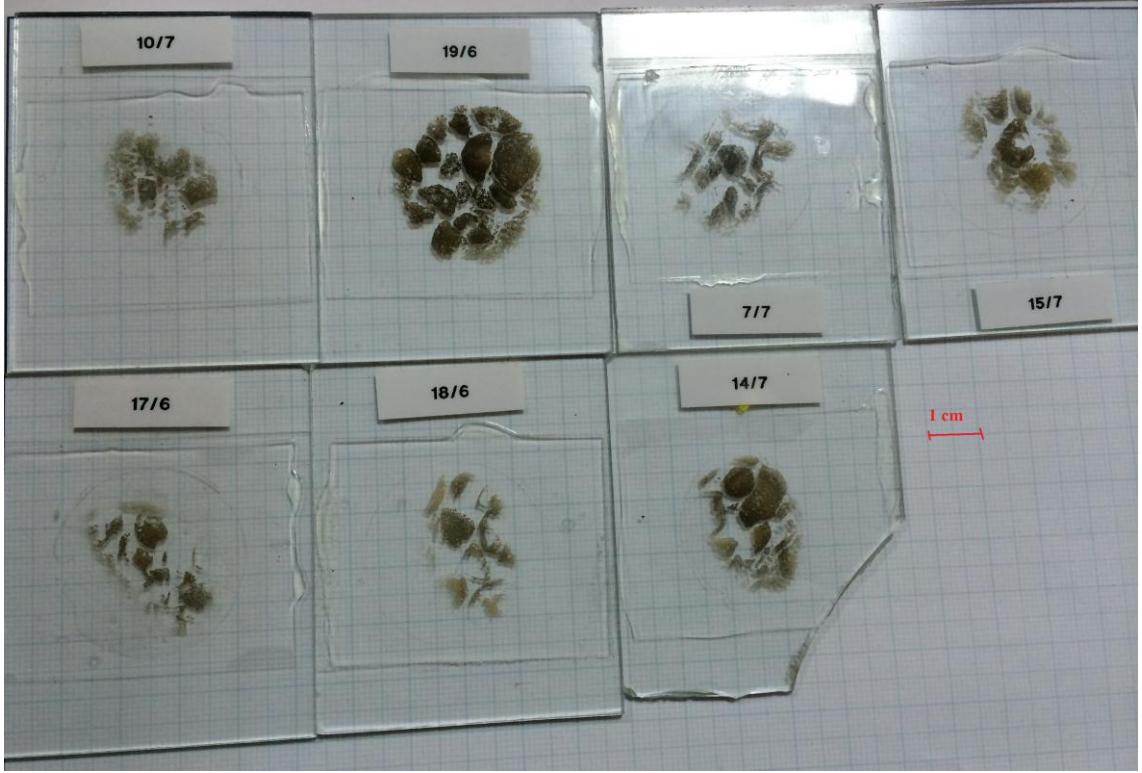
### MATERYAL VE METODLAR

Niğde ÇİMSA fabrikası yetkili teknik elemanlar tarafından sunulan teknik bilgiler doğrultusunda tez kapsamında, fabrikada üretilen klinker örnekleri derlenmiş olup, bunlardan laboratuvar ortamında 8 adet (10/7, 14/7, 7/7, 15/7, 19/6, 18/6, 17/6, 19/06) parlak kesitler ve ince kesiler hazırlanmıştır (Foto. 3.1 ve 3.2).

Hazırlanan ince ve parlak kesitler Niğde Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Optik Laboratuvarı'nda Nikon marka E 400 model 500 kata kadar büyültme özelliği olan polarizan ve buna opak ilminatör takılı cevher mikroskopu ile klinker mineralojisi incelemeleri (Campbell'e, 1999) göre Ono (1980) metodu uygulanarak gerçekleştirilmiştir (Foto. 3.3.).



**Fotoğraf 3.1** Klinkerlere ait parlak kesitler



**Fotoğraf 3.2.** Klinkerlere ait ince kesitler



**Fotoğraf 3.3.** İncelemelerin yapıldığı bilgisayarlı polarizan mikroskop düzeneği

## BÖLÜM IV

### ARAŞTIRMA BULGULARI

#### 4.1 Giriş

Niğde ÇİMSA çimento fabrikasında üretilen klinkerlerden örnekler derlenerek bunların polarizan mikroskopuyla (incekesit-parlakkesit) mineralojik ve petrografik incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Fabrika, hammadde ihtiyacını Niğde ve çevresinde bulunan bölgelerden temin etmektedir. Doğusunda bulunan Niğde metamorfiteğine ait mermerlerden çakıl, kum, şist, az miktarda kil boyutundaki malzemeden oluşur. Sahanın doğusunda KD- GB yönlü uzanan ve 1923 kotlu İtulumaz tepeye kadar yükselen mermer kütlesi kireç taşı veya marn kaynağı olarak kullanılır (Foto. 4.1). Kil ihtiyacını fabrikaya ait Ulukışla ilçesine ait Kolsuz köyündeki kil sahasından yada Dikilitaş kasabasına ait kil sahasından temin eder. Fabrika alçıtaşını Ulukışla ilçesinden, tras ihtiyacını Niğde merkez ilçeye bağlı İnli kasabasından karşılar. Demir ihtiyacını ise Kayseri iline bağlı Yahyalı ilçesinden temin etmektedir.

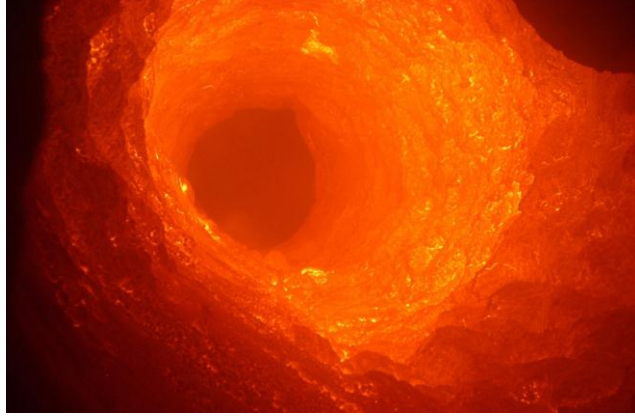


**Fotoğraf 4.1.** Niğde ÇİMSA 'ya ait marn ocağı (bakış yönü güney). Karşıda görülen sıradağların tamamı mermerdir.

#### 4.1.1 Klinker oluşumu

Klinkerin pişirilmesi hammadde içinde bulunan kireç, silis, alüminyum, demir oksitlerin sıcaklık artmasıyla önce serbest hale geçerler daha sonra kendi aralarında birleşerek yeni bir malzeme oluştururlar. Öncelikle serbest haldeki suyun buharlaşmasıyla başlar ve 100 °C serbest su bünyeden atılır. Kil minerallerinde suyun ayrışması için sıcaklık 500 °C gelmesi gereklidir ve bu işlem ön ısıtıcıda tamamlanmış olur.

MgCO<sub>3</sub> yaklaşık 600 °C de ayrışmaya başlar, bunu CaCO<sub>3</sub> izler. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşenleri, kalsiyum ve magnezyum karbonatların daha düşük sıcaklıkta ayrışmasına yol açar. 900 °C de bütün karbonatların ayrışması tamamlanır. Ancak farin içindeki iri taneler ön ısıtma sırasında tam olarak ayrılamaz. Böylece döner fırına giren malzeme içinde bir miktar karbonat bileşikleri kalabilir. Ön ısıtma işlemi sırasında dehidre olarak suyunu kaybeden kil mineralleri fırın içinde 900-1000 °C sıcaklıklar arasında bozularak yüksek reaktivitede oksitler meydana getirir. Klinkerin ayrışması sonucu açığa çıkan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiO<sub>2</sub>, karbonatlardan karbondioksitin ayrışmasını kolaylaştırırlar. Böylece katı faz içinde dikalsiyum silikat, mono kalsiyum alüminat ve kalsiyum alümina ferritler meydana gelir. Bu aşamada karbonatların ayrışması sonucu açığa çıkan CaO diğer bileşenlere bağlanmış olduğu için, henüz serbest kireç bulunmaz. Klinker içinde serbest kireç önemli miktarda 900 °C yi geçtiği zaman meydana gelir. 1000-1100 °C arasında C<sub>2</sub>AS gibi geçici bileşikler oluşurken, C<sub>3</sub>A ve C<sub>4</sub>AF nin oluşumu 1100-1200 °C de büyük ölçüde tamamlanır. Katı fazın bu aşamasında oldukça fazla miktarda serbest kireç oluşur. 1200-1250 °C de katı faz reaksiyonu biter (Foto 4.2), (Şekil 4.1; 4.2; 4.3).

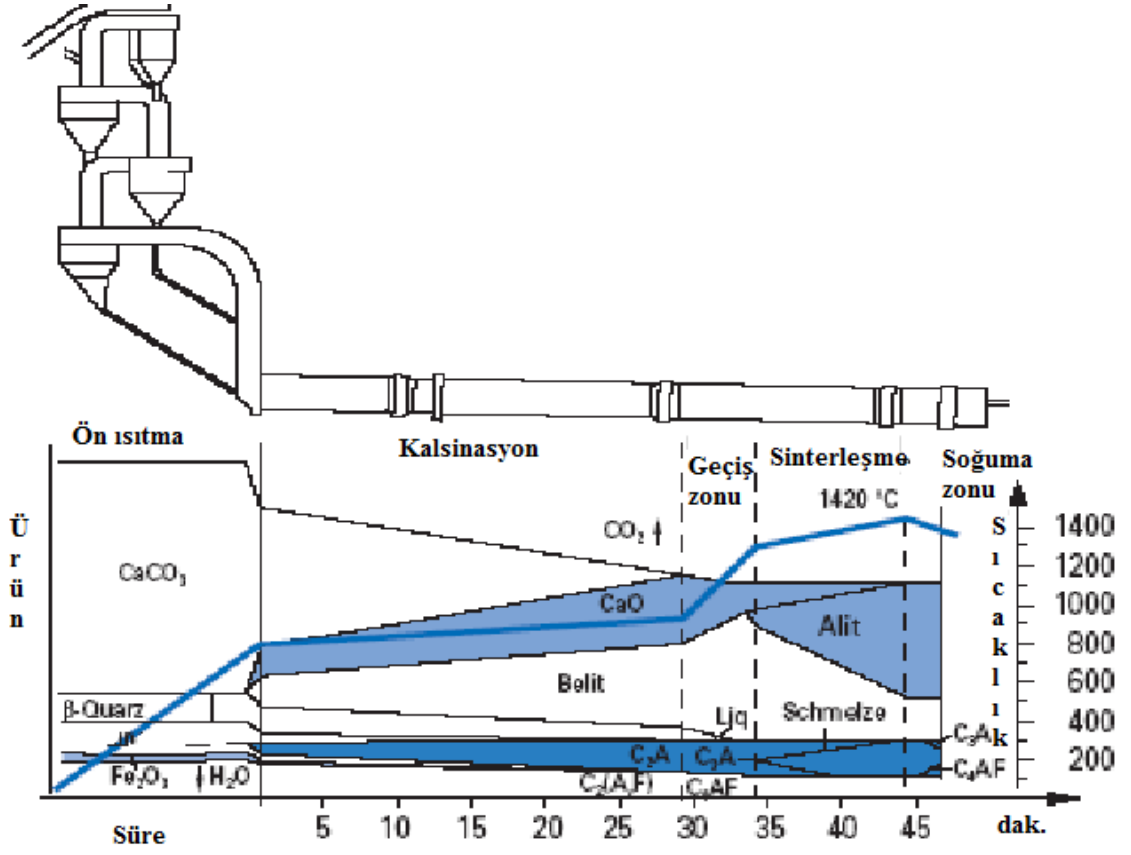


**Fotoğraf 4.2.** Döner fırın içinden görünüm (Niğde ÇİMSA).

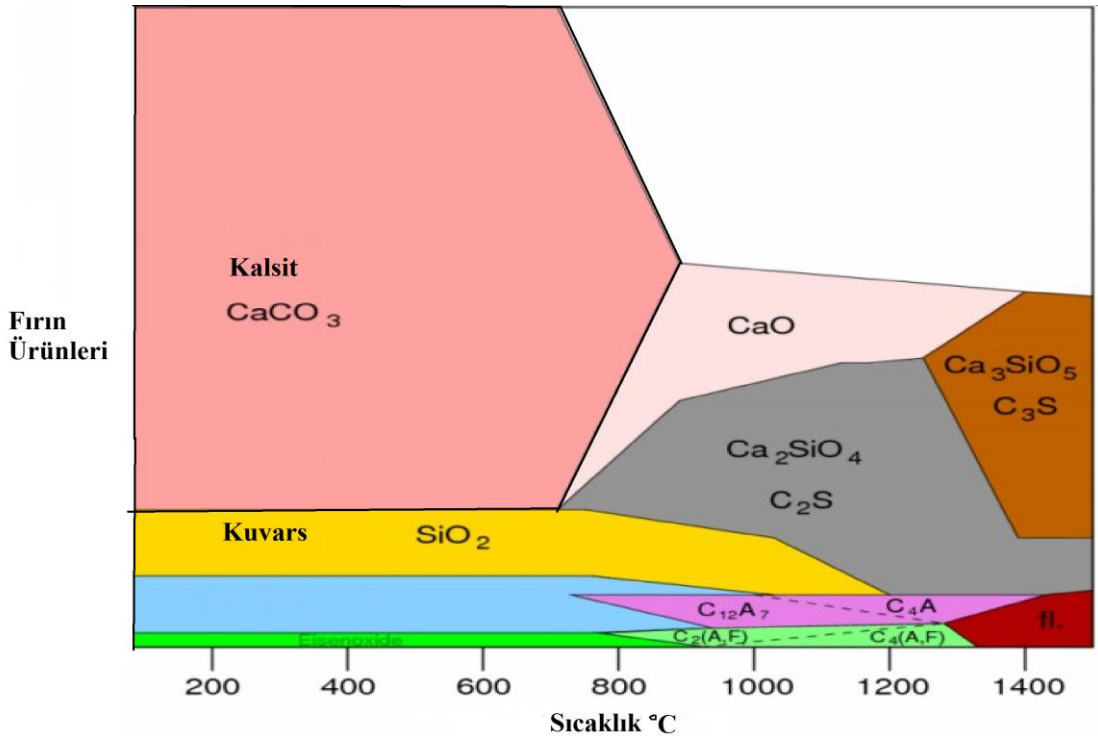
Katı fazın 1250 °C sıcaklığa ulaşmasıyla malzemenin %20-30 u sıvı hale gelir. Sıvı fazda CaO ile C<sub>2</sub>S birleşerek C<sub>3</sub>S'i meydana getiri. C<sub>3</sub>S oluşumu 1450 °C de tamamlanır. Reaksiyon ürünleri olarak C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF ve reaksiyonlara girmemiş olan serbest kireç bulunur (Yalçın ve Gürü, 2006).

Hammaddelerin farklı sıcaklık bölgelerinde gerçekleşen tepkimeler sonucu oluşan bileşiklerde karma oksitler kısaltma kullanılarak tanımlanmaktadır (C: CaO, A: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S: SiO<sub>2</sub>, F: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Ono (1980), klinker oluşumunu 5000 ton/gün ve 100 m uzunluğunda döner fırın içinde ısı dağılımına göre fırın içindeki klinkerin mikroskobik karşılaştırmalarına göre üç bölgeye ayırmıştır. Bunlar: dekarbonatlaşma zonu, geçiş zonu, yanma zonu olarak isimlendirmiştir. Geçiş ve yanma zonunda malzeme akış hızı 2 m/dk.'dır. Bu zonlarda malzeme sırasıyla 3,5 ve 10 dakika bekletilirler. 1000–1500 0C ye kadarki sıcaklık aralığında CaCO<sub>3</sub> ün CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>S ve C<sub>3</sub>S dönüşümü tarif edilmektedir. 1450 °C üzeri sıcaklıkta 10 metrelik mesafede klinkeri tutma süresi yaklaşık 5 dakikadır. Bu gözlemlerde dikkat çeken özellikler alit mineralinin kristalleşmesi (10–15 µm) ve ilk alit kristalinin büyüme (30–60µm) sıcaklık aralığı 1400–1500 °C gerçekleştiği ve gene aynı sıcaklıkta belit yığışımalarında çözülme ve dağılma ile C<sub>2</sub>S kristallerinin 20–30 µm boyutlarında büyümesidir. Sonuç olarak yüksek ısıda tutma zamanı alitin kristal boyutu ve belitin dağılma aralığındaki ilişki belirlenmiştir. Büyük döner fırınların hareketi sırasında malzemeye basınç ve fiziksel darbe uygulanması fırında kaba hammaddelerin yanmasını kolaylaştırır (Şekil 4.1; 4.2; 4.3).



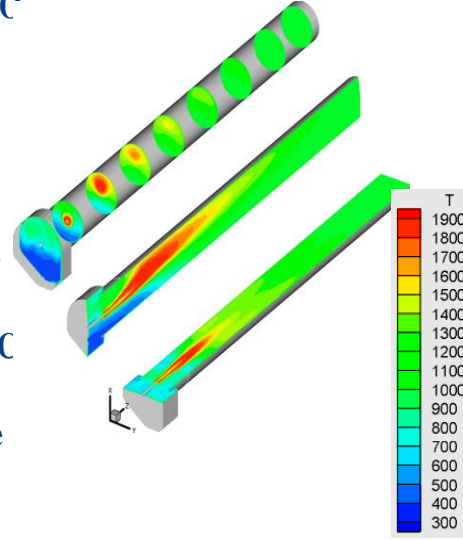
Şekil 4.1. Klinker oluşumunun şematik görünümü (Feret, 1999; Stutzman ve Leigh, 2002; Yeğınobalı, 2003)



Şekil 4.2. Minerallerin oluşum sıcaklığını gösteren diyagram (Feret, 1999; Stutzman ve Leigh, 2002; Yeğınobalı, 2003)

# FIRIN İÇİNDEKİ KİMYASAL REAKSİYONLAR

1. kısım: 800-1100°C  
dekarbonatlaşma. 900°C üstünde  
C<sub>3</sub>A ve C<sub>4</sub>AF oluşur. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Al<sub>2</sub>C  
erimeyi hızlandırır.
2. kısım: 35-45 dak, 1100-  
1300°C C<sub>2</sub>S (belit) oluşur.
3. kısım: 40-50 dak, 1100-1450-  
1300°C sinterleşme gerçekleşir.  
C<sub>3</sub>S ve C<sub>4</sub>AF oluşur.
- 4 kısım: 50-60 dak, 1300-1000°C  
Fırında oluşan çeşitli  
minerallerin kristalizasyonu ve  
soğutulması.



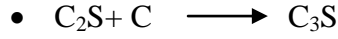
Şekil 4.3. Sıcaklık artışına göre döner fırın içerisindeki kimyasal reaksiyonlar (Feret, 1999; Stutzman ve Leigh, 2002; Yeğınobalı, 2003)

## ✓ 650-1050 °C

- $Al_2O_3 + SiO_2 + 2H_2O + 5CaCO_3 \longrightarrow CA + 2C_2S + 2H_2O + 5CO_2$
- $Fe_2O_3 + 2CaCO_3 \longrightarrow C_2F + 2CO_2$
- $C + O_2 \longrightarrow CO_2$
- $SiO_2 + 2CaCO_3 \longrightarrow C_2S + 2CO_2$
- $CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$

## ✓ 1250-1450 °C

- $C_2F + Ca + C \longrightarrow C_4AF$
- $CA + 2C \longrightarrow C_3A$
- $C_2F + Ca + C \longrightarrow C_4AF$



#### 4.1.1.1 Klinkerin soğutulması

Döner fırında pişirilen klinker yaklaşık 1400 °C sıcaklıkta fırından ayrılır. Bundan sonra soğutma işlemi başlar ve ortamdaki sıcak havanın kazanılıp tekrar ön ısıtıcılara gönderilmesi çalışmaları başlar. Burada en sık kullanılan yöntem ızgara plakalar üzerinde yavaşça ilerleyen klinker tanelerine basınçlı dış hava verilmesidir.

Çimento üretiminde klinkerin soğutulmasının ciddi bir önemi vardır. Klinker sıcaklığı 1250 °C altına düştüğü zaman C<sub>3</sub>S tersinir bir reaksiyon gösterir böylece C<sub>2</sub>S ve CaO de ayrışır.



Bu yüzden klinker; sinterleşme sıcaklığında öyle bir hızla soğutulmalıdır ki tersinir reaksiyon işlememeli ve C<sub>3</sub>S miktarı korunabilmelidir. Korunamadığı durumda çimentoda ciddi mukavemet düşüşleri ve açığa çıkan serbest kirecinde betonda genleşmelere sebebiyet vermesine neden olur.

#### 4.1.2 Klinker minerallerinin analiz yöntemleri

Klinker mineral fazlarının belirlenmesi pek çok analiz yöntemiyle yapılabilmekte, bunların bazıları nicel, bazıları ise sadece nitel anlamda veri sağlamaktadır. Kimyasal ve fiziksel analiz yöntemlerinin kullanılabilirlikleri, uygulama hızları ve güvenilirlikleri birbirlerine göre farklılık göstermektedir. Yaş kimyasal analiz, Bogue yöntemi, klasik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu, XRD ve görüntü analiz yöntemleri kimyasal ve fiziksel yöntemlere örnek verilebilir. Bu yöntemler arasında en kolay ve ucuz olanı Bogue yöntemidir; kimyasal bileşenler ile potansiyel fazlar hesaplanır. Ancak, Bogue yöntemi klinkerleşme süreci sırasında kristalleşmenin denge koşulunda gerçekleştiği ve mineral fazlarının saf halde oluştuğu varsayımına dayanır. Pratikte bu doğru değildir; yabancı iyonlar faz bileşiminde yer alabilirler, dolayısıyla tamamen

Bogue yöntemine güvenmek yanlıştır (Taylor, 1964). Günümüzde matematiksel modeller kullanılarak yazılan özel algoritmalar ve ticari programlarla da ana ve tali fazların nicel analizi yapılabilmektedir (Feret, 1999).

#### **4.1.2.1 Polarizan Mikroskopisi**

Çimentolu malzemelerde, kaynağı ne olursa olsun hasar söz konusu olduğunda temel olarak çatlak oluşumu ve/veya malzeme bileşenlerinin bozuşması/alterasyonu (bozuşma) düşünülmektedir. Bu hasarların derecelerinin incelenmesi amaçlandığında da florosan (ya da UV ışık) mikroskopisi ve polarize ışık mikroskopisi en kayda değer metotlardır. Bu iki metodun sıklıkla birlikte kullanılmasından dolayı literatürde PFM şeklinde kısaltıldığı görülür.

Genel olarak PFM, alttan aydınlatmalı polarizan mikroskoplarla, yaklaşık 0.30 mm kalınlığında hazırlanmış beton veya diğer malzeme ince kesitlerinin incelenmesidir (Foto 3.3). Işığı geçirmeyen cevher minerallerinin (opak) incelenmesinde ya da elektron mikroskop kullanımının gerektiği durumlarda ise, parlak kesitler tercih edilir. İnce ve parlak kesitler hazırlanırken kayaç ve mineral ince kesitlerinin hazırlanmasına benzer bir protokol izlenmektedir. Ancak beton numuneleri hazırlanırken, betonun gevrek yapısından dolayı, çeşitli çatlama ve kopmalar oluşabilir. Bu istenmeyen durumların oluşmasını engellemek amacıyla ince ve parlak kesit üretimine geçilmeden önce malzemeye düşük viskoziteli epoksi emdirilmesi genel kabul görmüş bir yöntemdir. Epoksi kürlendikten sonra SiC, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (korund) veya endüstriyel elmas bazlı aşındırıcılar ve parlatıcılar ile numuneler mikroskobik çalışmalarda kullanıma hazır hale getirilmektedir (Foto 3.1 ve 3.2).

Polarize ışık mikroskopisini diğer optik mikroskop yöntemlerinden ayıran en önemli özelliği, ışığın, polarizasyon sonucu malzemedeki kristal ve amorf fazlarla olan etkileşimini incelemeye imkan vermesidir. Bu yöntem, mineraloji-petrografi bilimi için yaşamsal öneme sahip olup, mineral tayini ve kayaç sınıflandırması gibi amaçlarla kullanılmaktadır (Müller und Raith,1988). Betonun hacimce %70 in üzerinde jeolojik bir malzeme olan agregayı içeriyor olması, bu yöntemi beton karakterizasyonu için uygun kılmaktadır. Çimentoyu oluşturan malzemelerin de sentetik mineraller/kristaller

oldukları gözönüne alındığında, bu yöntemin kullanım alanları ve değeri daha da iyi anlaşılmaktadır.

Polarize ışık mikroskopisinde kullanılan mikroskop ekipmanı, diğer mikroskoplardan farklıdır. Mikroskopun herhangi bir iç gerilme emaresi içermeyen optik elemanları, 360° derecelendirilmiş döner tabla ve birbirine dik polarizasyon yönü bulunan iki adet polarizasyon filtresi en önemli farklılıklarıdır. Mikroskopun polarizasyon özelliklerinden yararlanarak; incelenen malzemedeki izotrop ve anizotrop kristal yapılar ile amorf özellik gösteren fazlar ayırt edilip; kalitatif ve kantitatif değerlendirmeler yapılabilmektedir. Bu değerlendirmeler yapılırken betonda bulunan kristal ve diğer katı fazların renk, özşekil, pleokroizma, rölyef ve çift kırılım gibi çeşitli optik özellikleri incelenir. Kullanılan objektifler x1.25 den x100'e kadar, okülerler ise X5 veya X10 büyültmeli olarak değişebilmekte, bu da çok düşük ve çok yüksek büyütme imkanının tek bir ekipmanda toplanabilmesini sağlamaktadır (Foto 3.3).

Düşük büyütme faktörlü objektif kullanımıyla betonun genel yapısı, homojenliği, agrega boyut, şekil ve dağılımı hakkında fikir edinilebilmektedir. Yine düşük büyültmelerde, floresan ışık modu kullanılarak çatlak dağılımı, betonun sıkıştırılma efektifliği ve sürüklenmiş hava ile ilgili parametreleri elde etmek mümkün olmaktadır. Polarize ışık mikroskopisi ile gerçekleştirilebilecek beton mikro yapı analizleri iki ana grupta incelenebilir. Bunlar;

- 1) Betonun servis süresince gösterebileceği performansın kestirilmesi; örn: malzemeyi oluşturan komponentlerin kalite kontrolü, tayini ve/veya sınıflandırılması.
- 2) Betonun geçmişe yönelik özellikleri; örn: betonda oluşan hasarların kökenlerinin ortaya çıkarılması veya betonun orjinal komponentlerinin ve bunların karışım oranlarının tespiti.

Kullanılmış olan çimento tipinin belirlenmesi veya çimento hammaddelerinin incelenmesi amaçlandığında polarizasyon mikroskopisi sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Mikroskop yardımıyla çimento tipi belirlenmek istendiğinde özellikle alit, belit gibi klinker mineralleri belirlenmeli, daha sonra varsa puzolanik katkıları incelenmelidir. Özellikle klinkeri oluşturan alit ve belit kristalleri, anizotrop yapılarda olup, çapraz polarizasyon yardımıyla ince kesitte kolaylıkla tayin edilebilmektedir.

Ancak, diğ er önemli klinker kristalleri olan  $C_3A$  ve  $(C_4AF)$  incelenmesi istendiğ inde, alttan aydınlatmalı polarizasyon mikroskobu yerine üstten aydınlatmalı cevher mikroskobu kullanmak gerekmektedir. Genellikle optik özelliklerin ince kesite oranla daha kolay belirlenebildiğ i parlak kesit örneklerinde dağ lama iş lemi yapıldıktan sonra faz ayırımı yapılabilir. Endüstride klinker kalite kontrolünde problemlerin ç özümüne tam olması amacıyla kullanılmaktadır. Örneğ in faz dağ ılımının heterojenliğ i, porozite, kristal şek li ve büyüklüğ ünde meydana gelen herhangi bir olumsuzluğ u belirleyebilmek oldukça değ erlidir. Ç ok sık rastlanmasa da nicel faz analizi nokta sayım yöntemiyle yapılabilir (Bye, 1999). Optik mikroskopi ayrıca, hammadde içeriğindeki bileş enlerin incelenmesi, döner fırında yanma problemlerinin tanımlanması, betonun kırılma analizi ile betondaki hava boş luklarının belirlenmesinde sıkça kullanılmaktadır

Mikroskopta incelenecek malzeme uygun boyutlarda küre şek linde kesilir ve etüvde kurutulur. Numunenin bir yüzü açıkta kalacak şek ilde bakalitle dondurulup sertleş mesi sağ lanır. Yüzeysel zımparalama iş lemi sırasıyla karpit kaplı 220, 400, 600, 800, 1000 numaralı zımpara kâğıtlarından geç irilir. Numune yüzeyleri 15 mikrona kadar parlatılarak mikroskopta incelenecek hale getirilir. Bu iş lem sırasından geç irilen klinker parlak kesit numuneleri etil alkol içinde % 1  $HNO_3$  ç özeltisi kullanılarak dağ lama iş lemine tabi tutulur. Dağ lama iş lemiyle alit ve belit fazlarının renk ve şek illerinin belirginleş mesi sağ lanmıştır. Nitrik asit ç özeltisinde dağ lama yapıldığ ında alit ve belit fazları belirginleş mekte, ayrıca ara fazlar bir bütün olarak ortaya çıkmaktadır, ancak ara fazların kendi arasındaki dağ ılımı nitrik asit dağ laması ile net olarak belirlenmemektedir (Gille, 1955; Kramer, 1960; Stutzman ve Leigh, 2002).

#### **4.1.2.2 Floresan (UV) ış ık mikroskopisi**

Beton teknolojisinde geleneksel olarak floresan mikroskopisi kullanımı mikro ç atlakların dokusu, sıklığ ı ve tipi üzerine yapılan ç alış malarda sıklıkla kullanılmaktadır. Flüoresan mikroskopisi, katı fazlarla boş luk arasındaki kontrastı artırdığ ı için, kapiler boş luk, hava boş lukları ve hidrasyon ürünlerinde bulunan ç atlakların ayırt edilmesinde son derece etkili bir yöntemdir. Bu teknik ilk olarak moleküler ve hücre biyolojisi biliminin asli yöntemlerinden biri olarak ortaya çıkıp geliş miştir ve beton teknolojisinde seksenlerden bu yana yaygın olarak kullanılmaktadır.

Floresan mikroskopisi, floresan özellik gösteren pigmentlerin küçük dalga boylu ve yüksek enerjili ışık hüzmesi yardımıyla tahrikine ve böylece ışık yaymalarına dayanır. Mikroskopta özel filtre setleri kullanılarak, boşluklu malzemelerde istenen bölgeler seçici biçimde izole edilebilmektedir. Beton söz konusu olduğunda, Hudson sarısı yaygın biçimde florofor olarak kullanılmakta ve düşük viskoziteli epoksi ile karıştırılarak betona emdirilmektedir. Karışım oranları laboratuvarlar arasında farklılık gösterse de, epoksi içerisinde ağırlıkça %1 pigment kullanımı oldukça yaygındır. Hudson sarısı için uygun tahrik ve emisyon filtreleri sırasıyla SWP450-490 nm ve LP515 nm olarak verilebilir. Ancak unutulmamalıdır ki; uygun filtreler, kullanılan pigment özelliklerine göre değişiklik gösterebilir. Bu nedenle pigment üreticisi firma tarafından sağlanan absorpsiyon ve emisyon spektrumlarının göz önüne alınması önerilir (Ailen, 1981).

#### **4.1.2.3 X-Işınları kırınımı analizi (XRD)**

Klinkerin XRD yöntemi ile analizi yaklaşık 60 yıldır çimento çalışmalarında kullanılmakta, son 40 yıldır ise, faz analizi yapılabilmektedir. Klinker fazlarının XRD ile tanımlanması, optik mikroskop yöntemini tamamlayıcı nitelikte olup, özellikle fazların farklı polimorflarının optik mikroskop ile belirlenemediği durumlarda oldukça yararlıdır. XRD verisi genellikle optik mikroskop verileri ile alüminat fazı dışında uyumludur, bunun da nedeni ince boyutlu alüminat fazının optik mikroskop ile kolay ayırt edilememesidir. XRD yönteminde karşılaşılan en büyük sorun, bir kaç fazın piklerinin çakışıp büyük tek bir pik gibi görülmesidir. Bunun dışında XRD yöntemi çimentodan çok klinker örneklerine uygulanmaktadır, çünkü çimento örneklerinde, öğütme sırasında klinkere katılan alçıtaşındaki kalsiyum sülfat ve hidratlarının pikleri XRD desenini daha karmaşık hale getirmektedir. Eğer çimento nemli hava ile temas etmiş, kalsiyum hidroksit ve kalsiyum karbonat bileşikleri oluşmuşsa bu bileşiklerin, alçıtaşının içinde bulunan olası safsızlıkları, kalsit, kil ve kuvars minerallerinin de küçük pikleri desen üzerinde görülebilmekte, bu durum analizi zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla XRD yöntemi genellikle klinker üzerinde uygulanmakta, eğer çimento kullanılacaksa örneğin 500°C' ye ısıtılması gerekmektedir (Kirschner, 1974; Bye, 1999).

#### **4.1.2.4 Elektron mikroskobu**

Transmisyon (TEM), tarama (SEM) ve x-ışınları mikro analiz yöntemleri başlıca elektron mikroskop yöntemlerindedir. Floresan bir ekran üzerinde elektron demeti yardımı ile görüntünün oluşturulduğu TEM yöntemi, alit kristali içindeki kusurların ya da belitteki ikizlenmelerin belirlenmesinde kullanılmıştır.

SEM yönteminde, orta dereceli enerjiye sahip (5–50 keV) ince elektron demeti bir dizi paralel hatlar halinde örneği taramakta ve örnekle etkileşen bu elektronlar, ikincil elektron emisyonları, geriye saçılmış elektronlar ve x-ışınları oluşturmaktadır. SEM, TEM yöntemine göre daha hızlı ve üç boyutta daha detaylı bilgi vermektedir (Ailen, 1981).

#### **4.1.2.5 Görüntü analizi**

Görüntü analizinin çimento yerine genellikle klinker örnekleri üzerinde uygulanmasının nedeni işlemin daha kolay yapılabilir olmasıdır. Toz halindeki çimento örneğinin kimyasal karmaşıklığı ve ince tane boyunda olmasına bağlı olarak görüntü analizi ile mineral fazlarını belirlemek oldukça zordur. Çimento örnekleri ile yapılan çalışmalarda genellikle tane boyu dağılımı, şekil faktörü, tane çap ve çevre ölçümleri, gözeneklilik gibi morfolojik ölçümler yapılmıştır (Chermant vd., 2001).

#### **4.2 Klinkerlerin mineralojik ve kimyasal özellikleri**

Petrografi, doğada var olan kayaçların minerallerini, kimyasal bileşimlerini, yapı ve dokularını ve doğada bulunuş şekillerini ortaya koyarak, kayaçları tanımayı, sınıflamayı hedefleyen bir bilim dalıdır. Tanımdan da anlaşıldığı gibi petrografinin inceleme alanı doğal kayaçları içermektedir. Kayacın mineral içeriği ve dokusal yapısı ayrıntılı bir şekilde incelenir. Petrografik tanımlar sahada makro boyutlarda başlar ve mikroskobun inceleyeceği ölçeklere kadar ufarır. Minerallerin optik mineraloji ile detaylı incelenip mikro dokuları ve yapılarının anlaşılması hangi minerallerden hangi oranlarda oluştuğu tespit edilir.

Gelişen endüstri koşullarında, doğal olmayan yani suni kayaçlar içinde petrografik inceleme yapılması zaruri hale gelmiştir. Bu olay çimento kalitesinin iyileştirilmesi yanında, endüstride kullanılan suni kayaçlarında petrografinin konusu içine dâhil edilmesini sağlamıştır.

Çimento üretiminde kullanılan hammaddeler ile üretim sürecine yönelik işlem parametreleri çimentonun kimyasal ve mineralojik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Klinkerin kimyasal bileşimi ve içyapısının öğütülebilirliğe, pişme sürecine ve çimento dayanımına etkileri temel alınarak "klinker kalitesi" terimi geliştirilmiş, bu konuda çok sayıda çalışma yapılmıştır (Brüggemann ve Bentrup, 1990).

Portland çimento klinker üretiminde kristal gelişim Sarkar (1989) ve Imlach ve Hofmänner (1974), Moore, (1982), Ono (1981), Chromy (1982), Klinker fazlarının aşağıdaki optik tanımlamaları üzerine Insley (1936), Taylor (1964), tarafından başlayarak günümüze kadar çok sayıda çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şunlardır; Ono vd. (1968) Hofmänner (1973); Sansoni ve Zybelle (1974); Chromy ve Carin (1980/81); Maki (1973, 1974, 1982 ) ve Maki ve Kato (1982).

Çimento klinkeri üretiminde klinker porozitesi, karma oksitlerinin kompozisyonu ve yapısı pek çok faktöre bağlıdır. Meydana gelen klinker özellikleri, ham karışımın homojenliğine, tane boyut dağılımına, içerdiği safsızlıklara, üretimde kullanılan ön ısıtma sistemine, döner fırının teknik özelliklerine, ısıtma ve soğutma rejimine bağlı olarak değişir. Bu derece çok faktörün etkili olduğu klinker üretiminde, yüksek performanslı veya kullanım amacına uygun çimento üretebilmek için gerekli klinkerin özellikleri sürekli kontrol altında tutulmalıdır. Hammadde optimizasyonu açısından, silikat ve alüminat modülleri veya kireç doygunluk faktörü uygulamada sıkça kullanılmaktadır. Bu modüller belli sınırlar arasında tutularak hammadde kaynaklı klinker problemleri en aza indirilmekte ve döner fırında hammaddenin refrakterle herhangi bir şekilde reaksiyona girmesi engellenmektedir. Böylece döner fırın refrakter kaplamasının da ekonomik ömrünün uzaması sağlanmaktadır (Felekoğlu vd., 2005).

Döner fırında pişme sonucu oluşan klinkerin kimyasal bileşimini bilmek kadar mineralojisini bilmek de çimento kalitesi açısından önemlidir. Endüstride, bazı durumlarda mineralojik parametreler, işlem koşullarının yeniden düzenlenmesi

açısından belirleyici olabilmektedir. Örneğin; belirli bir hammadde yatağının kimyasal bileşiminin değişmediği durumda döner fırının bakım onarım işlemi sırasında olası mineralojik değişimler göz önünde bulundurulmalıdır (Brüggemann ve Bentrup,1990).

Klinkerin mineralojisi ve içyapısı diğer bir deyişle mineral fazlarının ve gözeneklerin oluşumu ve dağılımı; hammadde karışımının tane boyutu ve dağılımına, en büyük taneye, homojenliğe, sinterleşme sıcaklığı ve süresine, klinker soğutma hızına, kimyasal bileşimine ve diğer üretim koşullarına bağlıdır. Dolayısıyla klinkerin kalitesinden döner fırın koşulları, sinterleşme derecesi, hammadde karışımının fiziksel ve mineralojik özellikleri yorumlanabilir, son ürün beton hakkında ön fikir elde edilebilir. Klinkerin kalite kontrolünde fiziksel ve kimyasal testlerin yanı sıra klinkerin içyapısının mikroskop yöntemleri ile incelenmesi oldukça önemlidir. Çünkü kimyasal ve fiziksel testleri olumlu olan bir klinkerin, mineral fazlarının kristal boyutu ve dağılımına bağlı olarak öğütülebilirlik ve dayanım gelişmesi açısından olumsuz sonuçlar verebildiği görülmüştür (Altın, 2000).

#### **4.2.1 Klinker mineralleri**

Klinker mineral fazları, kalkerli ve killi hammadde karışımının döner fırında sinterleşme sıcaklığında pişirilmesi ve bu süreçte gerçekleşen bir dizi tepkime sonucunda oluşur. Isı alan ve ısıveren tepkimeler genellikle katı karışımları arasında meydana gelmekte, pişme sürecinin son aşamalarında oluşan sıvı faz ile mineral bileşimlerinin oluşumu tamamlanmaktadır (Şekil 4.1,2, 3).

Tepkimeler sonucu meydana gelen mineraller 3 grup altında toplanmışlardır. Bunlar;

- ✓ Esas grup mineralleri: alit, belit, alüminat, ferrit
- ✓ Yardımcı grup mineralleri: periklas (MgO), serbest kireç
- ✓ Aksesuarlar: alkali sülfat, vüstit (FeO), metalik demir, kalsiyum sülfat, demir sülfat.

Normal bir portland çimento klinkeri bileşiminde %90 dan fazlası 4 ana bileşenden oluşur. Bunlar; alit, belit, alüminat, ferrit mineralleridir. Kimyasal tepkimelerin uzunluğundan dolayı formüller kısaltılmıştır.

CaO=C, SiO<sub>2</sub>=S, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>= A, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=F, H<sub>2</sub>O= H

- ✓ C<sub>2</sub>S olarak kısaltılan Belit minerali: (CaO)<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub> (dikalsiyum silikat)
- ✓ C<sub>3</sub>S olarak kısaltılan Alit minerali: (CaO)<sub>3</sub>SiO<sub>2</sub> (trikalsiyum silikat)
- ✓ C<sub>3</sub>A olarak kısaltılan trikalsiyum alüminat: (CaO)<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (trikalsiyum alüminat)
- ✓ C<sub>4</sub>AF olarak kısaltılan Ferrit minerali: (CaO)<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (tetrakalsiyum alümino ferrit)

Altan aydınlatmalı polarizan mikroskoplarla, yaklaşık 0.30 mm kalınlığında hazırlanmış incekesit klinker numunelerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Üstten aydınlatmalı polarizan mikroskopuyla ışığı geçirmeyen cevher minerallerinin (opak) incelenmesinde parlak kesitler tercih edilir (Çizelge4.1).

**Çizelge 4.1.** Klinker minerallerin inceleme yöntemleri

<b>Klinker Mineralleri</b>	<b>İncekesit</b>	<b>Parlakkesit</b>
Alit	++	++
Belit	++	++
C <sub>3</sub> AF	-	++
C <sub>4</sub> AF	+	++
Portlandit	++	++
Porositet	++	+
Serbestkalk	-	++
Periklas	-	++
Ca-Sülfat	+	-
Hammaddeler	++	-
Puzolan malzemeler	++	++

#### 4.2.1.1 Alit (3CaO.SiO<sub>2</sub>- C<sub>3</sub>S)

Alit kristali trigonal, monoklinik bir katı eriyik serisi, ve genellikle çimento sektöründe C<sub>3</sub>S olarak adlandırılmaktadır. Alit yaklaşık yüzde 4 e kadar safsızlık içerebilir Normal portland çimentosu klinkerinin % 40 ila yüzde % 70 kadarını alit bulunmaktadır. Alitin yoğunluğu 3,13-3,22 gr/cm<sup>3</sup> (Ghosh, 1983).

İnce kesitte renksiz ve zayıf polarizasyon gösterir, tek eksenli olanı optik pozitifdir, kırma indisi 1.720 civarında bulunmaktadır. Zon yapısı ve basit ikizleri bulunur. Alitin soğumasında polimorf dönüşmeden dolayı lamelleşme meydana gelir. Bunlar mızrak veya iğne şekillerinde monoklin fazdan triklin faza geçişi işaret ederler. Belitlerden ayrılışı, ekseriya görülen idiomorf taneler ve aşındırma anizotropisi ile kolaylıkla olur. Ayrıca, belit mantolu alitlere bilhassa kalkerce fakir eriyiklerden teşekkül edenlerde rastlanır. Resorpsiyon gibi belit mantoları, klinkerin yavaş soğutulduğunu işaret eder. Burada özellikle iri alit kristalleri görülür. Alit bir taraftan da, çok yüksek yanma derecesini gösterebilmesi itibariyle, fırın sıcaklığı hakkında bilgi verir. 1200°C nin üzerinde stabil olan alit, soğurken belit ve serbest kirece ayrılır. Alitin bozulmasında alkalilerin yüksek oluşunun etkisi vardır (Campbell, 1999).

Klinker içindeki minerallerin birbirlerinden farklı kendilerine has özellikleri vardır. Alit mineralinin mekanik dayanım kazandırma özelliği vardır ve klinker içerisinde %50–70 oranı ile en fazla bulunan mineraldir. Genelde saf halde bulunmaz, kristalleşme sırasında  $Mg_2^+$ ,  $Al_3^+$ ,  $Fe_3^+$  gibi yabancı iyonları bünyesine alır. Eğer kristalleşme hızlı gerçekleşmişse belitten alite dönüşüm sırasında küçük belit kristalleri alit içinde gözlemlenir.

Klinkerlerde bir monoklin ve bir de triklin faz bulunmaktadır ve klinkerin bağlantı özelliğini tayin eder. İnce kesitte renksiz ve zayıf polarizasyon gösterir, tek akslı olanı pozitifdir, kırma indisi 1.720 civarında bulunmaktadır. Zon yapısı ve basit ikizleri bulunur. Alitin soğumasında polimorf dönüşmeden dolayı lamelleşme meydana gelir. Bunlar mızrak veya iğne şekillerinde monoklin fazdan triklin faza geçişi işaret ederler. Belitlerden ayrılışı, ekseriya görülen idiomorf taneler ve aşındırma anizotropisi ile kolaylıkla olur. Resorpsiyona, yavaş soğuyan klinkerlerde rastlanır. Ayrıca belit mantolu alitlere bilhassa kalkerce fakir eriyiklerden teşekkül edenlerde rastlanır (Ayrancı, 1971).

#### **4.2.1.2 Belit ( $2CaO.SiO_2-C_2S$ )**

Hidrolik aktivitesi alit kadar yüksek olmayan, fakat geç yaştaki dayanımın gelişmesinde önemli bir rolü üstlenen kalsiyum silikattır. Klinker içinde bulunma oranı % 15-30

arasında belirtilse de işlem koşullarına göre belit daha az miktarda da oluşabilir. Döner fırında 800°C'den sonra oluşmaya başlar, 1250°C'den sonra ortamdaki fazla CaO ile birleşerek aliti meydana getirir.  $\alpha$ ,  $\alpha_H$ ,  $\alpha_L$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  gibi beş farklı polimorfa sahiptir. Genellikle endüstriyel klinkerde  $\alpha$  formlarına göre daha stabil olan  $\beta$ -C<sub>2</sub>S formu bulunmaktadır. Belit polimorflarının birbirlerine göre alit polimorflarına oranla hidrolik aktiviteleri, dolayısıyla dayanım değerleri daha değişkendir. Alite oranla bünyesinde daha fazla yabancı iyon barındırabilir. K, Na, Fe, Ba, Mg, [PO<sub>3</sub>]<sub>3</sub><sup>-</sup>, [SO<sub>4</sub>]<sub>2</sub><sup>-</sup>, [FeO<sub>4</sub>]<sub>5</sub><sup>-</sup> gibi birçok iyon, Ca<sub>2</sub><sup>+</sup> ve [SiO<sub>4</sub>]<sub>4</sub><sup>-</sup> iyonlarıyla yer değiştirebilir.  $\beta$ -C<sub>2</sub>S genellikle lamelli yapıda olup ikizlenme gösterir. Kristaller yuvarlak şekilli, 20–40 µm boyutundadır. Belit klinker içinde çoğunlukla kümeler halinde bulunur. Böyle belit birikimleri hammadde karışımının iyi homojenize edilmemesinden ve içindeki iri tanelerden kaynaklanabilir. Bu iri taneler ve homojensizlik, CaO ve SiO<sub>2</sub> tanelerinin yeteri miktarda tepkimeye girememesine, dolayısıyla bir tarafta belit birikimlenmesine yol açarken serbest kireç miktarının da artmasına neden olur (Altun, 1998; Kurdowski,1991; Taylor, 1997).

Belit kümelenmesinin klinkerin öğütülebilirliği üzerinde etkileri olduğu bilinmekte, eğer belit küresel ve homojen bir dağılım gösteriyorsa klinkerin öğütülebilirliği daha kolay, kümelenme gösterdiği durumda ise öğütülebilirliğin daha zor olduğu ifade edilmektedir. Hatta bu belit kümelerinin öğütülebilirlik üzerinde klinkerdeki gözeneklerden daha önemli etkileri olduğu belirtilmektedir (Maki et.al, 1982).

Soluk sarı, parlak polarizasyon gösteren taneleri ekseriyetle ksenomorf, nispeten az olarak hipidiyomorf olarak görülür. Polisentetik ikizlere rastlanır, iki eksenli negatiftir, tipik lamelleri fazından alçak ısıda meydana gelen 3 fazına geçişi gösterir. Polisentetik ikizlerine bol rastlanır; P fazından Y fazına geçiş hacmin artması nedeniyle klinkerin ufalanmasını doğurur. Kıırma indisi  $n_z = 1.717$   $n_x = 1.736$  dır. Belit çevresinde de duruma göre alit gelişmelerine rastlanılır. Belit tabii mineraller arasında rastlamak mümkündür: Meselâ, bredigt, larnit veya şanonit gibi (Ayrancı, 1971).

#### **4.2.1.3 Trikalsiyum alüminat (3CaO. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - C<sub>3</sub>A)**

Klinker bileşiminde en çok bu alüminat bulunur ve çimento priz olayında önemli rol oynar. Trikalsiyum alüminat taşımış olduğu büyük kimyasal enerji nedeniyle su ile hızlı bir şekilde reaksiyona girerek çözeltili haline geçer. Çözeltiye geçen trikalsiyum alüminat

priz süresi ayarlamak amacıyla çimento içine katılmış bulunan kalsiyum sülfat ile reaksiyona girerek klinker tanecikleri yüzeyinde bir kabuk oluşturur ve böylece klinker taneciklerinin su içinde çözünme hızını kontrol eder. Bu nedenle trikalsiyum alüminat çimento bileşiminde mutlaka bulunması gereken bir bileşendir. Ancak bu bileşiğin çimentonun mekanik mukavemeti üzerinde fazla etkisi yoktur. Ayrıca sülfat korozyonuna yol açması nedeniyle çimento bileşiminde fazla miktarda  $C_3A$  bulunması istenilmez (Yalçın ve Gürü, 2006).

Hidrotasyon ısı en yüksek olan klinker mineralidir. Ferrit fazı ile birlikte ara faz veya matris fazı olarak adlandırılır. Kristal yapısı kübik, ortorombik veya monoklinik olabilir. Klinkerde alkali bileşenler bulunuyorsa saf  $C_3A$  yerine alkali alüminat oluşur. Kristaller lamelli ve ince levha şeklinde olduğu için, kesitte genellikle uzun çıtalar halinde görülür (Altun, 1998).

#### **4.2.1.4 Ferrit ( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 - C_4AF$ )**

Ferrit en yüksek refleksiyon gösteren mineral olup, polarizasyon mikroskopta sarı ve açık pleokroizması ile tanınır alüminat ile matrikste bulunduğu gibi, çok defa da kapantı olarak bulunur. Çimentonun rengini etkileyen bir bileşiktir. Belirli bir kimyasal bileşimi yoktur,  $Ca_2(Al_xFe_x)2O_5$  kristal dizisinde çoğunlukla  $C_4AF$  formunda rastlanır. Prizmatik ve dentritik kristal yapıdadır. Mikroskop altında yansımaları çok kuvvetli olup, dağlama işlemi yapılmadan diğer klinker minerallerinden kolaylıkla ayırt edilebilir. Oldukça kısa zamanda kendi dayanımı maksimum seviyeye çıkmasına rağmen beton dayanımı üzerinde çok küçük bir etkisi olmaktadır (Patton, 1986). Optimum  $C_4AF$  miktarı %10-13'tür, ancak bunu aşan değerlerde çimentonun dayanımını azalttığı bilinir (Öney, 1998).

#### **4.2.1.5 Serbest kireç**

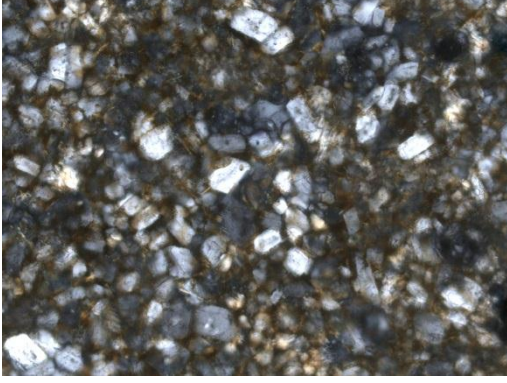
Serbest kireç, pişme sırasında, silis, alüminyum ve demir okside bağlanmamış olan kireçtir. Pişme gücünü gösteren hammadde karışımı, farinin iri öğütülmesi, hammadde karışımında serbest silisin fazla bulunması, fazla miktarda kalsiyumlu bileşikler kullanılmış olması veya yavaş soğutmada tersinir tepkime ile alitin belite ve  $CaO$ 'e dönüşmesiyle ortaya çıkabilir. Klinkerde % 2,5'dan daha fazla miktarda bulunması,

beton yapımında kullanılan çimentonun katılaşma veya sertleşme olayından sonra hacim değişikliğine sebep olabileceği için istenmez (Altun, 1998; Öney, 1998). Öte yandan serbest kirecin klinkerin öğütülebilirliğini kolaylaştırdığı belirtilmektedir (Hills, 1995).

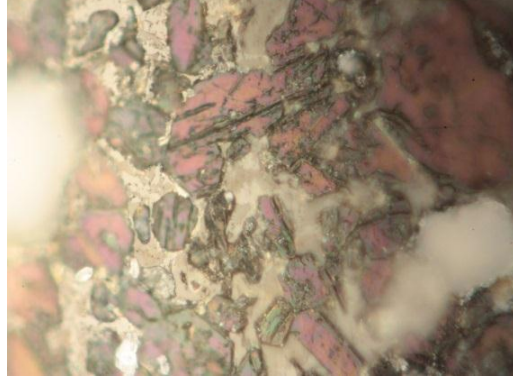
#### **4.2.1.6 Periklas**

Klinkerdeki MgO konsantrasyonu % 2'yi aştığı durumda gözlenmektedir. Yüksek yansımaya sahip karakteristik kübik kristaller halinde oluşur. Periklasın sertliğinden dolayı parlatma sırasında kabartma oluşur; mikroskop altında çevresinde beliren çizgilerden dolayı belirlenmesi kolaylaşır. Diğer klinker fazlarına göre daha karardır ve tek bir modifikasyonu vardır. Periklas kristalleri yaklaşık 1-16 µm boyutunda olup büyük kristaller ve kümeler halinde bulduklarında betonda uzun vadede ortaya çıkabilecek tehlikeli magnezyum oksit genişmesine sebep olabilirler (Kurdowski, 1991; Altun, 1998)

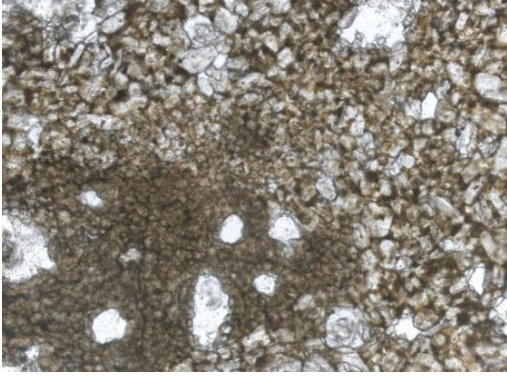
D-15/7 20X ince kesit



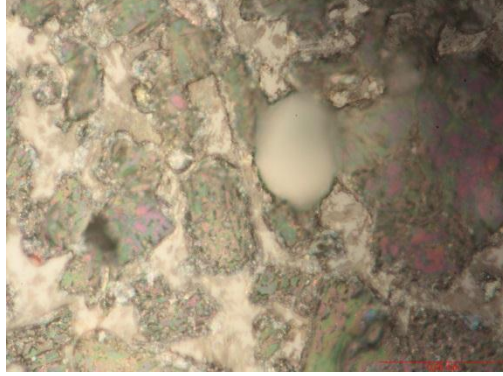
15/7 20X parlak kesit



E-17/6 20X ince kesit



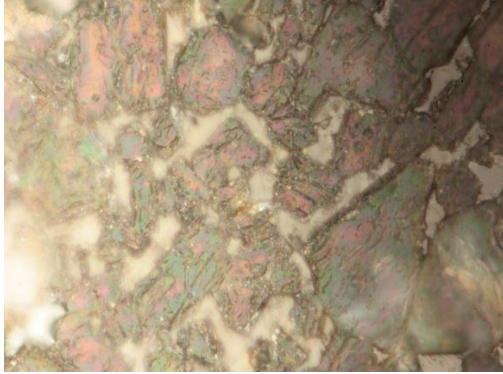
17/6 20X parlak kesit



F-18/6 20X ince kesit

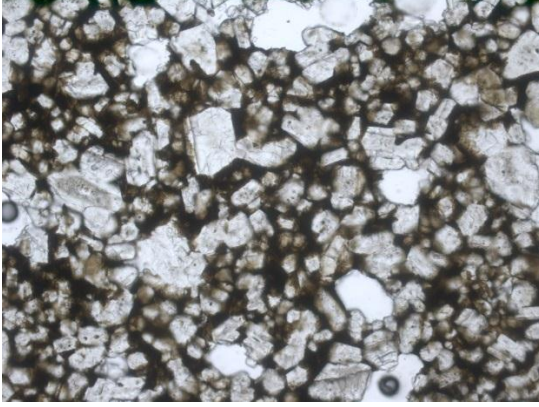


18/6 20X parlak kesit

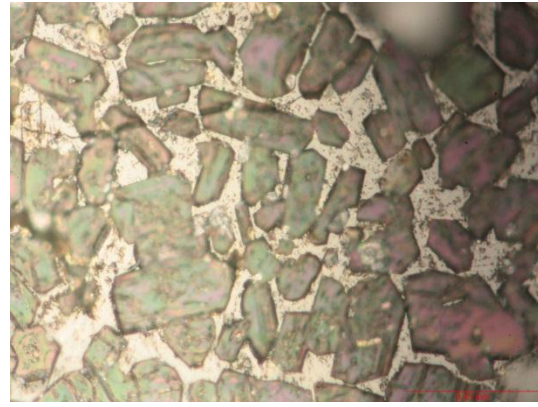


**Fotoğraf 4.3.** Klinker kristallerinin mikro görüntüleri (sol: İnce kesit, +N; sağ: Parlak kesit, //N).

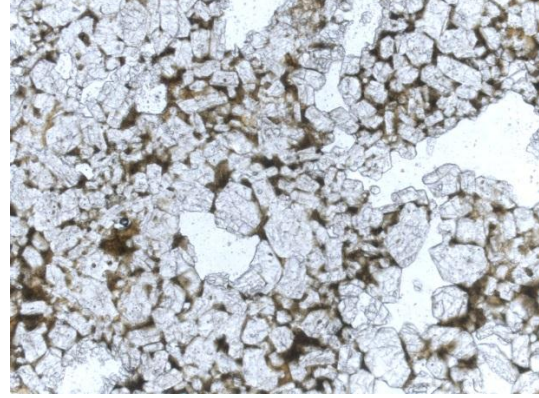
A-7/7 20X ince kesit



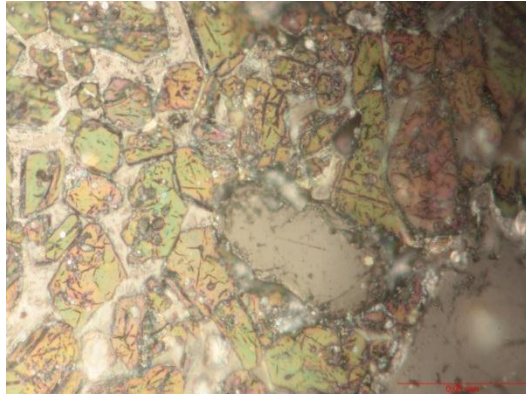
7/7 20X parlak kesit



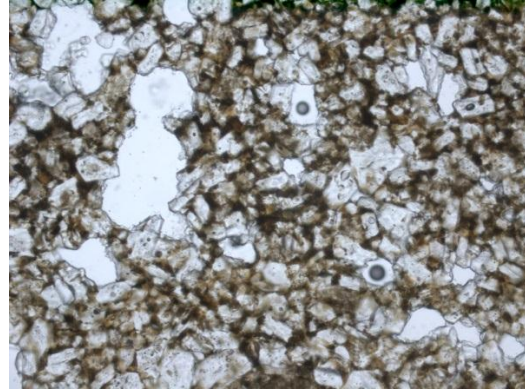
B-10/7 20X ince kesit



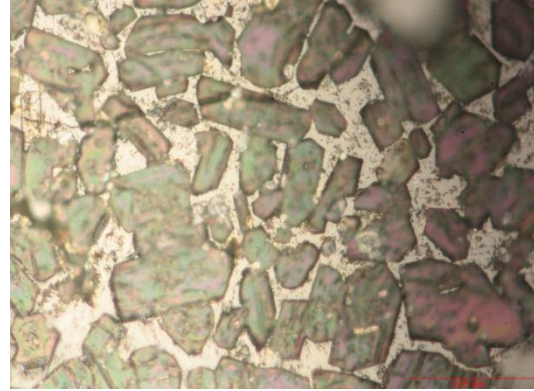
10/7 20X parlak kesit



C-14/7 20X ince kesit

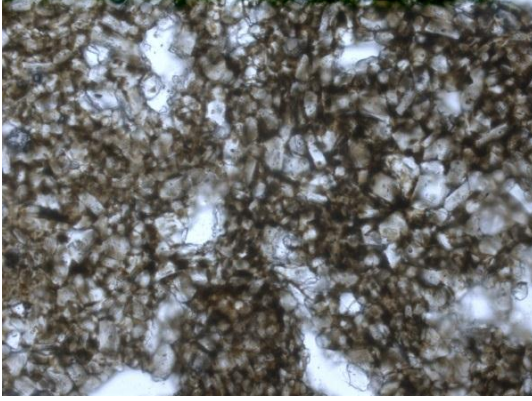


14/7 20X parlak kesit

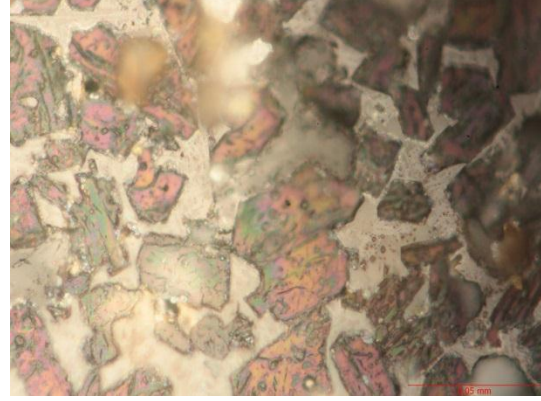


**Fotoğraf 4.4.** Klinker kristallerinin mikro görüntüleri (sol: İnce kesit, +N; sağ: Parlak kesit, //N).

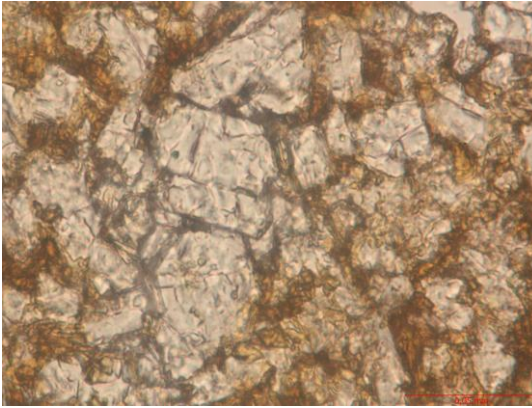
G-19/6 20X ince kesit



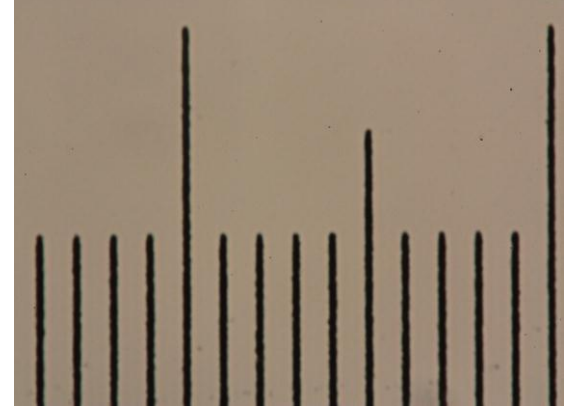
19/6 20X parlak kesit



H-18/6 50X ince kesit



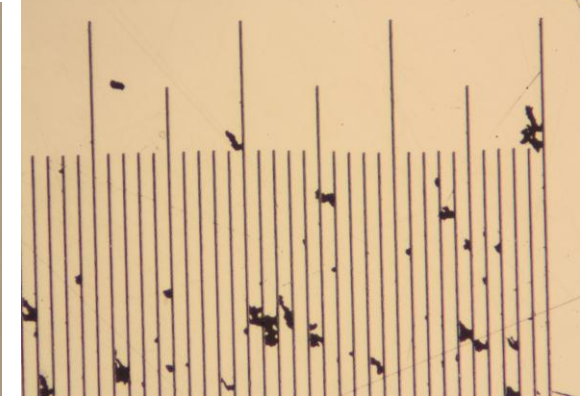
ince kesit Ölçek: 50X (mikrometre)



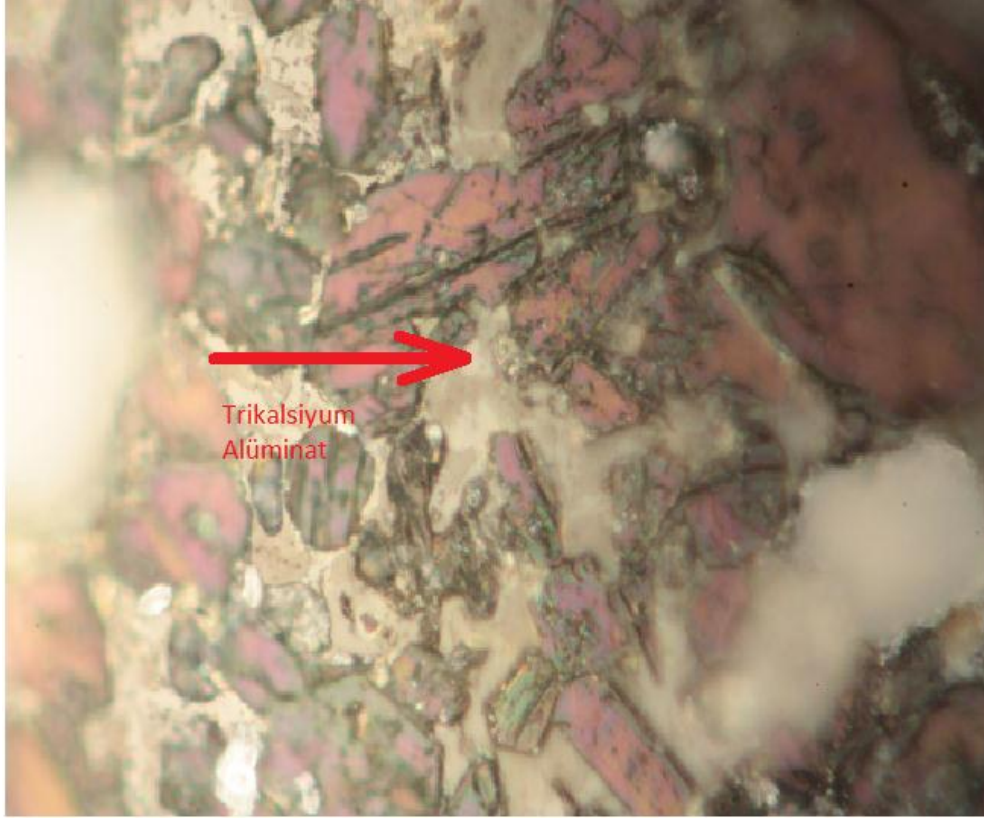
ince kesit ölçek: 20X (Mikrometre)



parlak kesit ölçek: 20X (Mikrometre)



**Fotoğraf 4.5.** Klinker kristallerinin mikro görüntüleri (sol: İnce kesit, +N; sağ: Parlak kesit, //N).



**Fotoğraf 4.6.** Trikalsiyum alüminat, 15/7,20X, parlak kesit // N.

### 4.3 Ono Yöntemi ve Uygulamaları

Çimento üretim teknolojisine Ono'nun (1980a) en önemli katkısı; polarize ışık mikroskobu kullanarak çimento kalitesinin belirlenmesi olmuştur. Bu yöntem polarize ışık mikroskobu ile birlikte diğer test ve cihazlardan elde edilen verilerin fırın koşullarının kontrol edilmesi esasına dayanır. Klinker ve çimentodan alınan numuneler ile, polarize ve ışık mikroskobuyla yapılan çalışmalarda, çimento üretiminin an ve an takip edilebileceği belirlenmiştir (Campbell, 1999).

Yapılan çalışmalarda iri kuvarsın yanma zorluğuna ve az oranda alkali ve magnezyum oksitinin sinterleşmedeki mineral oluşumuna etkili olduğu gözlenmiştir. Farin malzemesinin döner fırında 20 dakika 1380 °C sıcaklıkta yakılması ile paralel lamelli çift belit kristalinin ve 1430 °C sıcaklıkta pişirilmesi ile çok yönlü belit kristalin oluşumunun karakteristik olduğu gözlenmiştir.

Ono (1981) yapmış olduğu mikroskobik çalışmalarında portland çimento klinkerinin kristal yapısı ve faz değişim kimyalarının hammadde inceliğine, karıştırma ve ısıtma

hızına bağlı olduğu tespitinde bulunmuştur. Belit mineralinin yönelimlerini XRD ve ayrıntılı mineralojik çalışmalarla belirlenmiştir.

Ono (1981) doktora tezi çalışmasında portland çimento klinkeri üretiminde alit ve belit mineralinin faz değişimlerini mikroskobik olarak incelemiştir. Farine fazla kuvars minerali eklenmesi ile alit mineralinin daha da büyüdüğünü tespit etmiştir. Çalışmalarında kalsit, kil, silis ve bakır cürufu içeren farinin XRD ve cevher mikroskobuyla inceleyerek sinterleşme sırasında kimyasal reaksiyonlar dizisini tespit etmiştir.

Belitin polimorfik çeşitleri ve alitin morfolojik değişimleri döner fırının; yanma koşullarına, ısıtma hızına, maksimum sıcaklığına, yüksek sıcaklık süresinin uzunluğu ve soğutma oranı ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Bu parametreler, 28 günlük harç-küp dayanımının tespitinde kullanılmıştır.

İnce öğütülmüş farinin 1200–1300 °C sıcaklık aralığında uzun süre pişirilmesi sonucu 100–200 µm boyutlarında iri granüllü, gözenekli toz klinker meydana geldiği belirlenmiştir. Buna ek olarak; sıcaklığın 1500 °C ye yükselmesiyle hammaddenin beyazdan pembe, sarı, kahverengi ve griye doğru ilerlediği mineralojik renklerinin değişim gösterdiği gözlenmiştir. Ferrit mineralinin kristal yapısı klinkerin yavaş soğutulmasıyla eğrelti otuna, hızlı soğutulmasıyla bambu yaprağına benzediği tespit edilmiştir.

Ono en önemli yayını Kawamura ve Soda ile birlikte yazmış ve Tokyo Çimento Kimyası Beşinci Uluslararası Sempozyumu'nda sunmuşlardır. Burada alit ve belitin optik özelliklerinin klinkerin yanma koşullarının etkilediği tespitinde bulunmuşlardır. Normal ve çabuk sertleşen portland çimentosu 1200 °C ye kadar dakikada 17-20 °C soğuma hızıyla oluşacağını belirlemişlerdir. Böylece uluslararası kamuoyunda cevher mikroskobu ile fırın kontrolü yapılabileceği dikkatleri çekmiştir.

Dallas Uluslararası Çimento Mikroskopi Derneği (ICMA), Teksas' ta ve yaklaşık aynı zamanda gerçekleşen Portland Çimento Birliği (PCA) Genel Teknik Komitesi Skokie'de 1980 yılındaki toplantısında Ono alitin kristal boyu ile ısıtma hızı arasındaki ilişkiyi anlatan bir sunum gerçekleştirdi. Buna göre büyük kristalli alitin uzun süre

yüksek sıcaklıkta değil yavaş ısıtma ile oluşacağını belirtmiştir. Fırının maksimum yanma sıcaklığını belirlemek için alitin cilalı yüzeyinin asitlerle ‘aşındırma derecesi’ üzerinden renk değişim hızını ve cilalanma derecesinin takibi yapılması gerektiğini belirtmiştir. Ono klinkerin soğutma hızını belirlemek için belit kristalinin renginin gözlemlenmesi gerektiğini belirtmiştir.

Ono (1981) yılında fırın uzunluğu boyunca farin beslemelerinin mikroskopik değişikliklerini ısı değişimi ve faz değişimine göre açıklamıştır. Buna ek olarak farklı alev uzunlukları ve ocağı yakma koşullarına göre klinker özellikleri tanımlanmıştır.

Mikroskopik verilere göre 28 günlük harç dayanımı için aşağıdaki denklemi vermiştir.

$$28 \text{ günlük dayanımı} = 25,309 + 0,513 (AS) + 2,027 (AB) + 0,334 (BS) + 2,179 (BC) \quad (4.1)$$

AS = alit boyutu (ısıtma hızı)

AB = alit çift kırma (max sıcaklık)

BS = belit boyutu (yanma süresi)

BC = belit renk (sağuma hızı)

Standart sapma 1.69 MPa (230 psi)

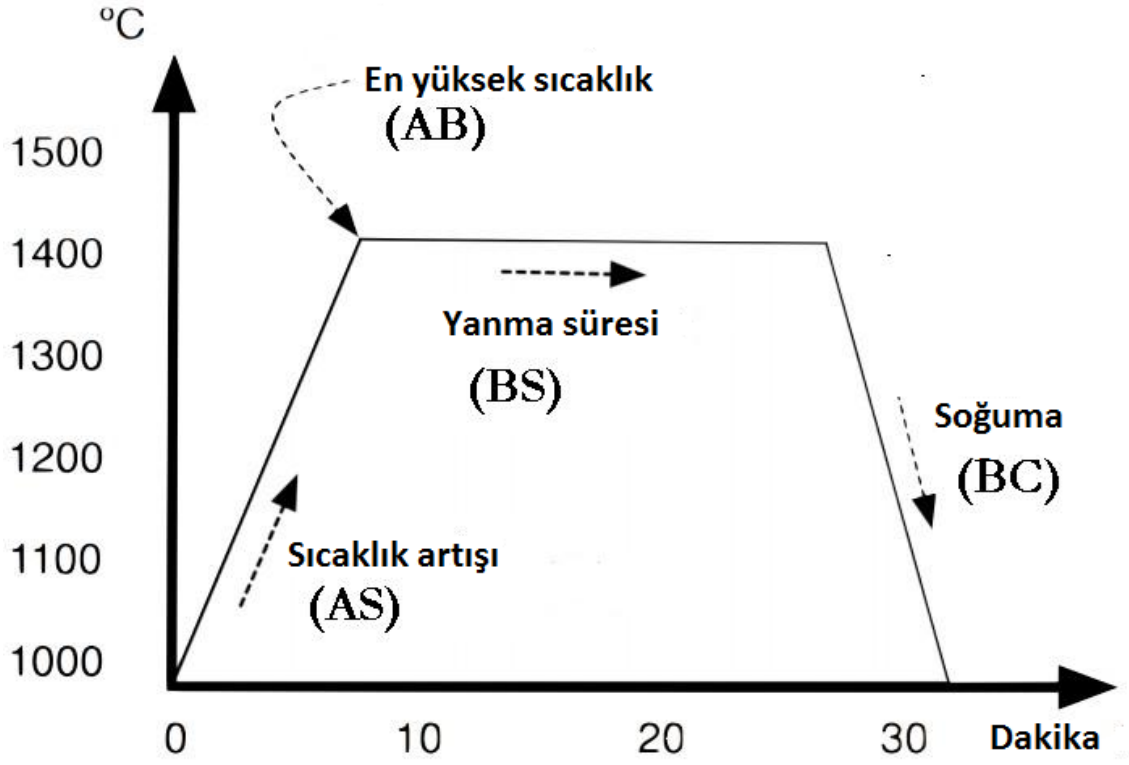
Alit mineralinin çift kırma indisi XRD yöntemi kullanılarak, mineralin kristal kafes yönelimleri (a,b,c), birim hücre hacmi (V) dikkate alınarak incelenmiştir. Yüksek çift kırma indisine sahip alit mineralinin a kenarı uzun b ve c kenarının kısa, birim hücre hacminin (V) düşük ve  $(a/b)^2$  oranının büyük olduğu tespit etmiştir. Laboratuvar koşullarında uzun süre yüksek sıcaklıkta yanarak hazırlanmış alitin düşük birim hücre hacmi (V), uzun  $(a/b)^2$  ve yüksek çift kırma indisi olduğunu tespit etmiştir. Bu nedenle klinkerin kalite kontrolü tespitinde XRD yöntemi mikroskop yöntemi gibi kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Ono (1980c), klinker oluşumunu 5000 t/g ve 100 m uzunluğunda döner fırın içinde ısı dağılımına göre fırın içindeki klinkerin mikroskopik karşılaştırmalarına göre üç

bölgeye ayırmıştır. Bunlar: dekarbonatlaşma zonu, geçiş zonu, yanma zonu olarak isimlendirmiştir. Geçiş ve yanma zonunda malzeme akış hızı 2 m/dk.'dır. Bu zonlarda malzeme sırasıyla 3,5 ve 10 dakika bekletilirler. 1000–1500 °C ye kadarki sıcaklık aralığında CaCO<sub>3</sub> ün CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>S ve C<sub>3</sub>S dönüşümü tarif edilmektedir. 1450 °C üzeri sıcaklıkta 10 metrelik mesafede klinkeri tutma süresi yaklaşık 5 dakikadır. Bu gözlemlerde dikkat çeken özellikler alit mineralinin kristalleşmesi (10–15 µm) ve ilk alit kristalinin büyüme (30–60µm) sıcaklık aralığı 1400–1500 °C gerçekleştiği ve gene aynı sıcaklıkta belit yığılımlarında çözülme ve dağılma ile C<sub>2</sub>S kristallerinin 20–30 µm boyutlarında büyümesidir. Sonuç olarak yüksek ısıda tutma zamanı alitin kristal boyutu ve belitin dağılma aralığındaki ilişkisi belirlenmiştir. Büyük döner fırınların hareketi sırasında malzemeye basınç ve fiziksel darbe uygulanması fırında kaba hammaddelerin yanmasını kolaylaştırır (Campbell, 1999).

Ono' nun (1981) geliştirmiş olduğu yöntemle göre fırın koşullarının değerlendirilmesi klinker gözlemlerine ve çimentonun mikroskopta incelenmesiyle belirlenir. Bu değerlendirme polarize ışık mikroskopuyla ve yaklaşık 400X büyütmeyle incelenir. Buna göre klinker veya çimento tozu 100µm mikrona kadar elenmiş ve kırılma indisi 1.705– 1.715 aralığında sıvıyla hazırlanmış örneklerle incelenir. Bu yöntemin önemli bir yanı üretim sırasında az miktar örnek ile fırın koşullarına hızlı müdahale edilebilmesidir. Böylece uygun üretim koşulları gerçekleştirilir.

Bu tekniğe göre fırın koşulları ve mikroskobik parametreler arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Şematik sıcaklık-zaman ilişkisi. Ono (1980c)

1. Isıtma hızı (alit boyutu, AS)
2. Yüksek sıcaklıkta yanma süresi (belit boyutu BS)
3. Maksimum sıcaklık (alit çift kırması, AB)
4. Soğutma hızı (belit rengi, BC)

Bu yöntemle parlak kesit ve ince kesit örnekleri mikroskopik tekniklerle düzenli olarak kontrol edilebilir. Çizelge 4.2. ve Şekil 4.4. 'de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Alit ve belitin yanma koşullarında mikroskobik karakterleri (Ono, 1981)

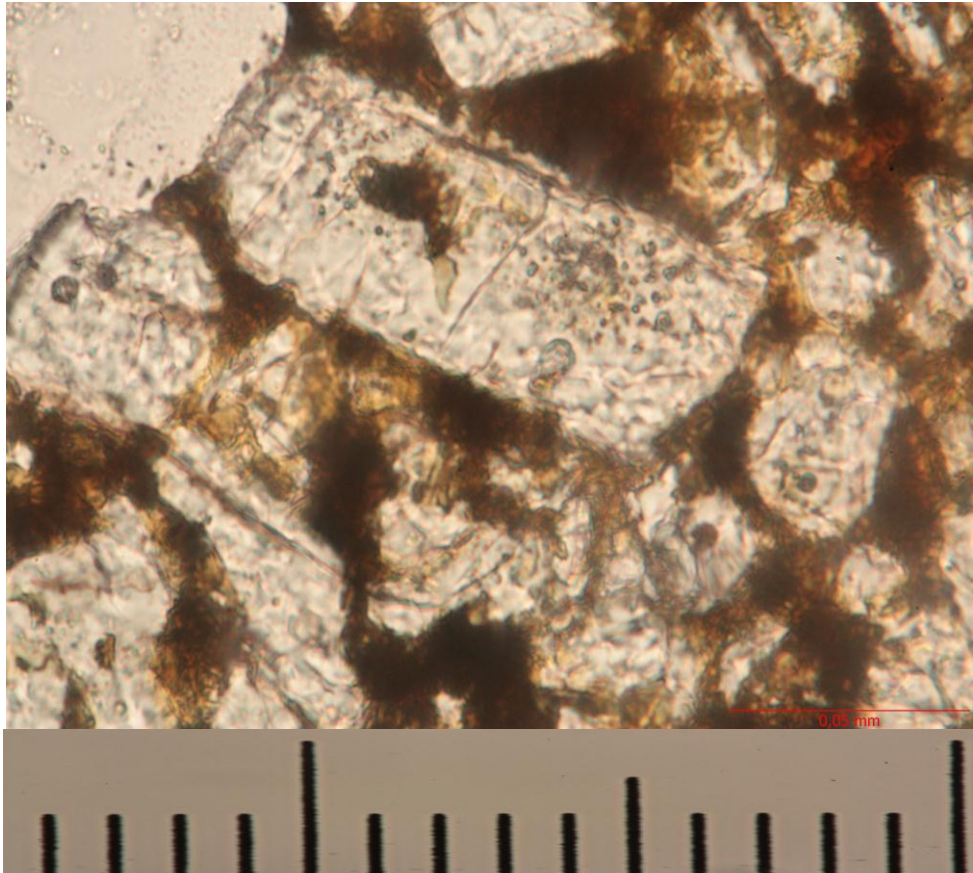
Yanma Koşulu	Hidrolik Faaliyet			
	4 Çok İyi	3 İyi	2 Orta	1 Kötü
Isıtma Hızı Alitbüyüklüğü(µm)	Hızlı 15 -20	- 20-30	- 30-40	Yavaş 40-60
Maksimum Sıcaklık Alitin çiftkırma indisi	Yüksek 0.010 – 0.008	- 0.007-0.006	- 0.006-0.005	Düşük 0.005-0.002
Yanma Süresi Belit Büyüklüğü (µm)	Uzun 25-40	- 20-25	- 15-20	Kısa 5-10
Soğutma Hızı Belit Rengi	Berrak	Soluk sarı	Sarı	Kehribar

Yaklaşık 0,5 kg ağırlığında bir klinker örneği çimento inceliğine kadar öğütülür ve küçük bir kısmı spatula ile lam üzerine yerleştirilir. Daha sonra lamelle kapatılarak kırılma indisi bilinen (1,705–1,715) birkaç damla sıvı damlatılır. Hazırlanan örnek 400X kadar büyütme, dereceli ve dönebilen analizöre sahip polarizan ışık mikroskobunda incelenir. Böylece hazırlanan numuneler saatlik periyotlarda bile incelenebilir (Campbell, 1999).

#### 4.3.1 Alit boyutu (AS)

Ono' nun (1981) yönteminde Alit boyutu, en sık görülen alit kristal uzunluğunu ifade eder. Alit kristallerini içeren klinker partikülleri kalibre edilmiş bir ölçekli mercek ile en sık görülen kristal boyutları uzunlukları göz önüne alınır. Yaklaşık belirlenen on alit boyutunun ortalaması alınarak belirlenir Ono'ya (1980a) göre alit boyutu yanma hızı ve kristalizasyon hızına bağlıdır. Kısa alevde hızlı pişen malzeme küçük alit kristallerini oluşturur. Uzun alevde yavaş yanma sonucu büyük alit kristalleri oluşur. Fırının boşaltma ucu yakınında sıcaklık değişimi 1400°C- 1000 °C arasındadır. Bu durumda küçük boyutlu ve kötü yanmış klinkerler oluşur. 1000 ton günlük üretimi olan fırında alit boyutu 15 µm ve altında olması fakir yanma göstergesidir.

Laboratuvar ortamında hazırlanan parlak kesit ve ince kesit klinker numuneleri polarizan mikroskobunda incelemelerde bulunulmuştur. Alit minerali boyutunun belirlenmesinde aynı fırında pişen aynı klinkerden alınan, 2 parlak kesit ve 2 ince kesit numuneleri olmak üzere 4 kesit incelenmiştir. Alit minerali boyutu en sık görülen minerallerden seçilmiştir, yani çok büyük ve çok küçük alit mineralleri göz ardı edilmiştir. En sık görülen 10 alit mineralinin uzunlukları ortalaması alınarak bir değer elde edilmiştir. 7/7 ve 14/7 nolu klinker örnekleri ince kesit olarak 18/6 ve 15/7 nolu numuneler ise parlak kesit olarak incelenmiştir. 14/7 nolu ince kesit 10X büyütmeli objektifte ve 7/7 nolu ince kesit 20X büyütmeli objektifte, 18/6 nolu parlak kesit numunesi 50X büyütmeli objektifte ve 15/7 nolu numune 20X büyütmeli objektifte incelenmiştir. Her örnek için 10 adet alit minerali boyutunun ortalaması alınmış olup hazırlana dört numune içinde aynı işlemler yapıp değerler toplanıp dörde bölünmek suretiyle ortalaması alınmış ve 29,25 mikron bulunmuştur. Bu değer Ono' nun hazırladığı çizelgede (Çizelge 4.2.) ısınma hızının 3 olarak değerlendirildiği tespitinde bulunulmuştur (Foto 4.3, 4 ve 5; 4.7).



**Fotoğraf 4.7.** İnce kesit 14/7 50X, alit kristalinin boyutu

### 4.3.2 Alit çift kırma indisi (AB)

İzotrop bir ortamdan gelen adi ışığın anizotrop bir ortama girerken birbirine dik titreşen polarize iki kısma ayrılması özelliğine çift-kırma denir. Alit çift kırma indisi ve belit boyutları takip edilerek kömürlerin kalori değişimlerini izlenebilir ve klinker kalitesini korumak ve buna göre fırın koşullarını ayarlamak mümkündür (Campbell, 1999).

Alitin çift kırma indisi tespitinde şunlara dikkat edilmelidir.

1. Nispeten parlak alit kristali (parlak gri sarımsı beyaz görünen) sahip olduğu uzunluk boyutu kabaca 2:1 olan kristal seçilir.
2. Kristal genişliği (w) mikron olarak kalibre edilmiş mikroskop vizörü ile ölçülür.
3. Çok büyük ve çok küçük kristaller göz önünde bulundurulmaz.

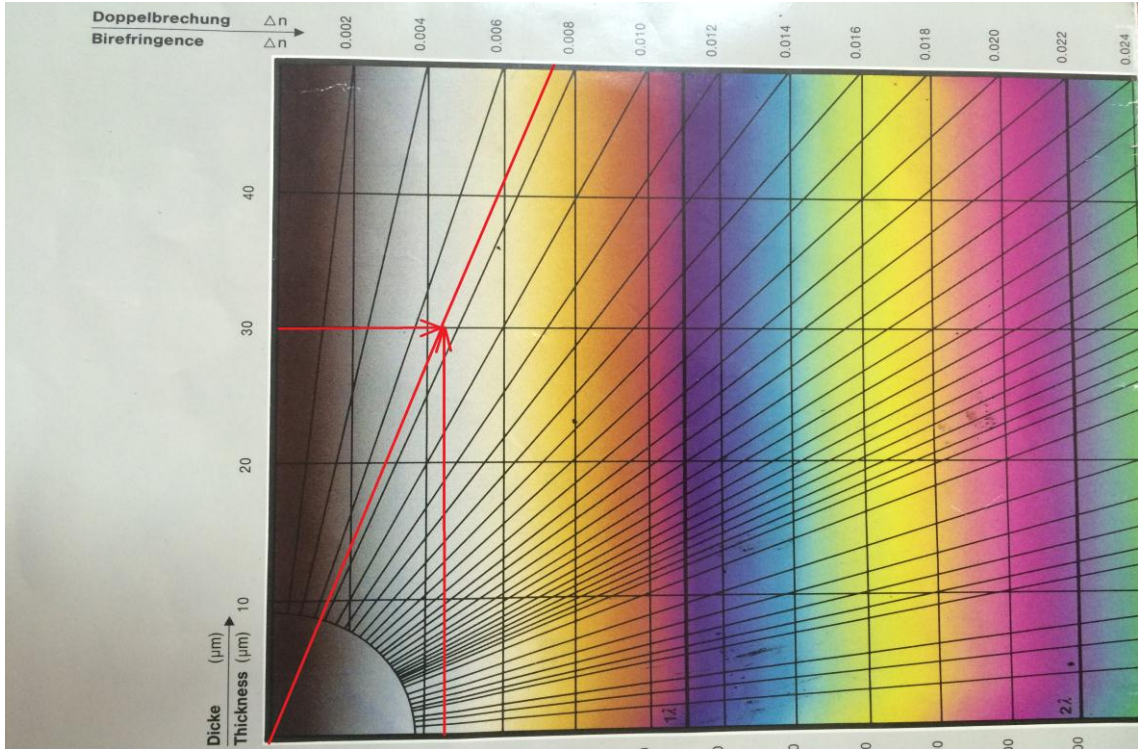
Minerallerin çift kırma indisinin tespitinde belli metotlar vardır (Müller ve Raith, 1988; Campbell, 1999). Bunlar aşağıda kısaca açıklanmıştır;

- a) Becke Çizgisi: Minerallerin ışık kırılma indislerinin kıyaslanmasında kullanılır. Işık kırılma indisleri birbirinden farklı iki değişik ortamın sınırında (kristal-sıvı veya kristal-kristal) parlak bir ışık gölgesi oluşur. Buna Becke çizgisi diyoruz. Mikroskopun netlik ayarının bozulması ile bu parlak ışık gölgesi bir ortamdan diğer ortama doğru hareket eder. 2B kuralı; Parlak ışık gölgesi, obje ile objektif arasındaki uzaklık büyütülünce, ışık kırılma indisi büyük olan mineralin içine doğru hareket eder.
- b) İmmersiyon Yağı Yöntemi: Işık kırılma indislerini belirlemek için, ışık kırılma indis değerleri bilinen sıvılardan birer damla alınarak mineralin üzerine damlatılır ve Becke çizgisine bakılır. Şayet Becke çizgisi oluşmuyor ise, mineralle sıvının ışık kırılma indisleri aynıdır. Farklı yönlerdeki ışık kırılma indisleri farkına çift kırılma denir ( $\Delta n = n_e - n_o$ ).

c) Michel Levy Tablosu ile çift kırılma indisinin ölçülmesi: Işık dalgalarının faz farkına bağlı olarak, örneğin yardımcı kamadaki 551 nm faz farkında, kuvars diyagonal konumda karakteristik bir girişim rengi, yani koyu kırmızı (kırmızı I) bir renk gösterir. Bu kırmızı girişim rengi beyaz ışığa ait (400-800 nm arasında) spektrumdan, yeşil renge ait ( $\lambda = 551$  nm) ışık dalgasının girişim sonucu ortadan kaldırması nedeniyle oluşur. Artta kalan zayıflatılmış ışık dalgaları (renkler), karakteristik kırmızı bir karışım rengi oluştururlar (Şekil 4.5).

Alit mineralinin soluk sarı renginin “Michel Levy Tablosu” kullanılarak tespit edilir. Daha sonra ince kesitin sabit kalınlığı (0.03 mm) aynı tablo üzerinde işaretlenerek, alitin rengi ile kesişen nokta belirlenir. Daha sonra, yukarı uzanan okun gösterdiği, tablonun üstünde yer alan çift kırılma değerleri belirlenir.

Bu işlem sonucunda, ince kesitteki alitin çift kırılma indisinin 0,006 ile 0,008 arasında bir değer olduğu, 0,008 ya daha yakın olduğu tespitinde bulunulmuştur (Şekil 4.5). Bu değer Ono' nun (1980a) hazırladığı çizelgede (Çizelge 4.2.) maksimum sıcaklık değerlerinin 3 (iyi) olarak belirlenmiştir.



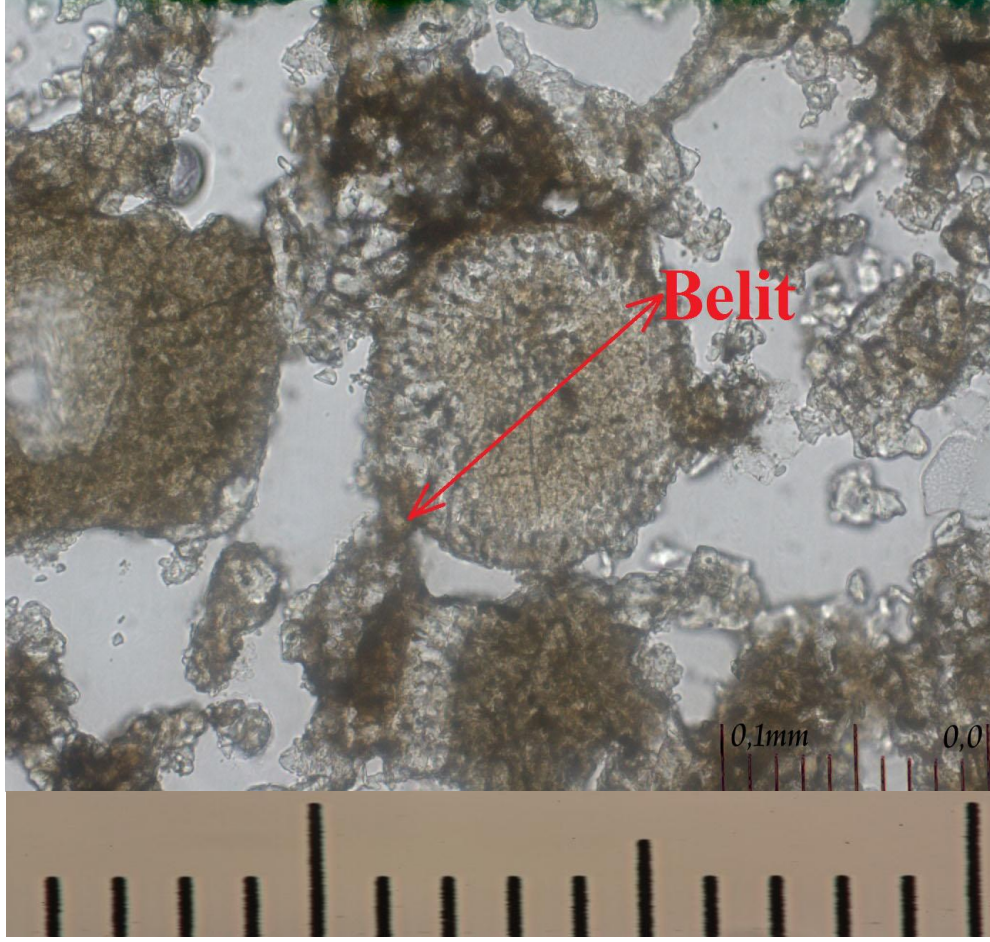
Şekil 4.5. Çiftkırılma ölçmek için kullanılan “Michel Levy Tablosu” (Müller & Raith, 1988).

### 4.3.3 Belit boyutu (BS)

Bu parametre yaklaşık 10 belit kristalinin uzun çaplarının ortalamasıdır. Kristal seçiminde en sık görülen kristal boyutunu temsil eden kristallerin ölçümü yapılır. Belit boyutu, parlak kesitin cilalı yüzeyi, ince kesitin kazınmış bölümünde gözlenir (Campbell, 1999).

Yaklaşık olarak 1100 °C–1200 °C arasındaki sıcaklıkta küçük kristalli belit oluşur. 1400 °C sıcaklıkta belit kristalleri önemli bir büyüme gösterir. Belit kristal boyutu bu yüzden 1400 °C yanma süresine bağlıdır (Campbell, 1999).

Belit minerali boyutunun tespitinde alit mineralinde olduğu gibi en belirgin 10 belit mineralinin uzun çaplarının ortalaması alınarak işlem yapılmıştır. Parlak kesitlerin cilalanmış yüzeyleri ve ince kesitte olmak üzere numuneler incelenmiştir. Aynı fırında pişen aynı klinkerden alınan, 2 adet parlak kesit ve 2 adet ince kesit olmak üzere 4 kesit incelenmiştir. 10/7 ve 18/6 nolu numuneler parlak kesit 7/7 ve 19/06 nolu numuneler ince kesit olarak incelenmiştir. 10/7 nolu parlak kesit 20X büyütme objektifte, 18/6 nolu parlak kesit 50X büyütme objektifte, 7/7 nolu ince kesit 20X büyütme objektifte ve 19/6 nolu ince kesit 20X büyütme objektifte incelenmiştir. Numunelerde 10 belit mineralinin uzun çapları ölçülüp ortalaması alınmış ve bu işlem dört numune içinde gerçekleştirilmiş olup dörde bölünmek suretiyle ortalaması alınmış ve 19,25 mikron bulunmuştur. Bu değer Ono' nun hazırladığı çizelgede (Çizelge 4.2) yanma süresi değerinin 2 olarak belirlendiği tespitinde bulunulmuştur (Foto 4.3, 4 ve 5; 4.8).



**Fotoğraf 4.8.** İnce Kesit 14/7 50X Belit kristalinin boyutu

#### 4.3.4 Belit Rengi (BC)

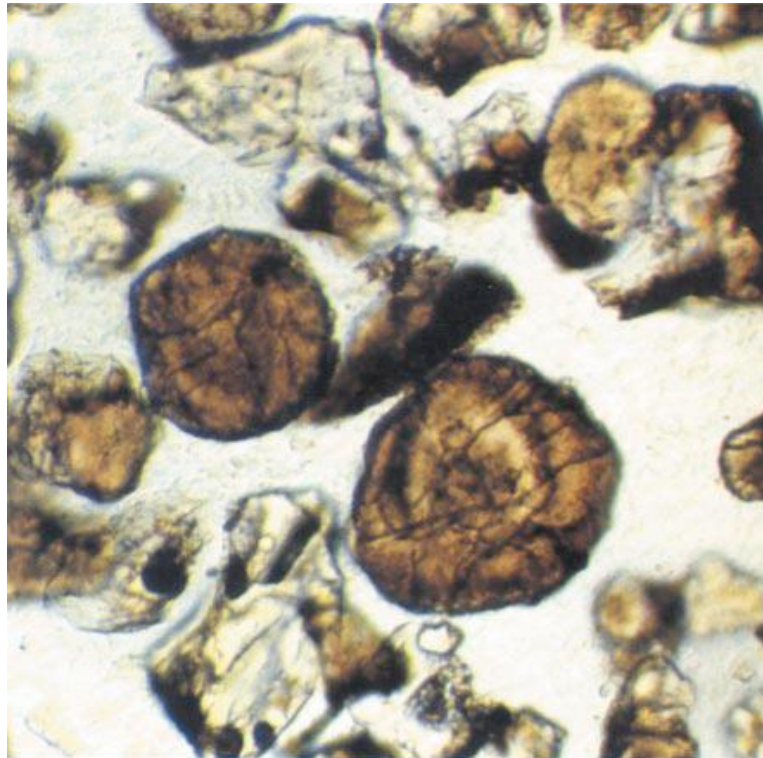
Belit mineralinin renkleri sayısal ölçek verilerek şu şekilde belirlenmiştir: Amber (1), sarı (2), soluk sarı (3), renksiz (4). Yaklaşık 10 belit kristali incelenir. Alit çift kırma indisinde olduğu gibi çok büyük ve çok küçük kristaller göz önünde bulundurulmamalıdır. Belit rengi en iyi şekilde ince kesitte gözlenir (Foto 4.8 ve 4.9.).

Belit minerali % 2 alümina, % 2 demir oksit ve %3 sodyum oksit iz minerali içerir. İçerdiği bu safsızlık soğutma olayında etkilidir. Soğutma ve ayrılma olayı gerçekleşirken şeffaf renkten soluk sarıya, sarıdan amber rengine sıcaklık oranına bağlı olarak renk değişimi gözlenir. Bu değişim cevher mikroskobunda ve polarizan mikroskobunda korele edilir (Foto. 4.3, 4 ve 5 ).

Aynı fırından aynı klinkerden alınan 7/7 ve 10/7 nolu klinker numuneleri ince kesit olarak mikroskopta belit rengi soluk sarı olarak belirlenmiştir. Bu değer Ono' nun (1980) hazırladığı çizelgede (Çizelge 4.2.) soğutma hızı değerlerinin 3 (iyi) olarak belirlendiği tespitinde bulunulmuştur.

Polarizan mikroskobunda incelenen numuneler Ono yöntemi kullanılarak klinkerin yanma koşullarına göre değerleri tespit edilmiştir. Buna göre Ono' nun bir formül olarak verdiği 28 günlük harç küpü dayanımı aşağıda hesaplanmıştır (Campbell, 1999).

$$\begin{aligned} F(28d) &= 25.309 + 0.513AS + 2.027AB + 0.334BS + 2.179BC \text{ MPa} & (4.1) \\ &= 25.309 + 0.513 \times 3 + 2.027 \times 3 + 0.334 \times 2 + 2.179 \times 3 \\ &= 40.134 \text{ MPa} \end{aligned}$$



**Fotoğraf 4.9.** Amber sarısı belit kristalleri düşük sıcaklıkta uzun yanma süresi, yavaş ısıtma hızı ve klinkerin yavaş yavaş soğuması sonucunda oluşur (ölçeksiz, Campbell, 1999)

#### 4.4 28 günlük harç küpü dayanımının Ono yöntemiyle belirlenmesi

Fırın koşullarındaki dört parametre (ısıtma hızı, soğutma hızı, max. sıcaklıkta yanma hızı, max. sıcaklıkta yanma süresi) mikroskop incelemelerine göre sayısal değerler verilmiştir. Ono' nun (1980) denklemi ile 28 günlük tahmini harç dayanımı hesaplanabilir

$$F (28d) = 25.309 + 0.513\mathbf{AS} + 2.027\mathbf{AB} + 0.334\mathbf{BS} + 2.179\mathbf{BC} \text{ MPa} \quad (4.2)$$

Standart sapma = 1.67 MPa

Örneğin aşağıdaki verilere göre; alit boyutu (AS) 50 µm (yavaş ısıtma hızı), alit çift kırma indisi (AB) 0.0085 (max. Yüksek sıcaklık), belit boyutu (BS) 30 µm (uzun yanma süresi) ve belit rengi (BC) (orta hızlı soğutma) solgun sarı olarak belirlendiğinde bunlara karşılık gelen sayısal puanlar 1, 4, 4 ve 3 tür.

$$F (28d) = 25.309 + 0.513 (1) + 2.027 (4) + 0.334 (4) + 2.179 (3) = 41.18 \text{ MPa}$$

Yüzde 1-2 oranında serbest kireç içeren klinkerler 28 günlük basınç dayanımı daha düşüktür. Klinker içerisinde MgO<sub>2</sub> oranı % 1,8 den fazla olduğu durumlarda alitin çift kırma indisi tabloda 0,001 artışı gereklidir. MgO<sub>2</sub> oranı %1,2 den az ise tablo değeri 0,001 negatif düzeltme önerilir. Sülfat (SO<sub>3</sub>) içeriği % 1,25 den büyükse çift kırma indisi 0.001 negatif düzeltme yapılır.

Ono klinker kalitesi, yanma koşulları, tahmini güce bağlı olarak bazı açıklamalar yapmıştır.

1. Alit, serbest kireç yüzdesi ve Blaine etkisi 28 günlük harç dayanımı üzerine etkisi azdır ve düzeltme yapılması gereksizdir.
2. Kötü yanan klinkerler birçok küçük belit minerali içerir. Farin anında iri kuvars taneleri içeriyorsa iyi yanmış klinkerde belit kümeleri içerirken alit boyutları geniş bir yelpazede görülür.
3. Alkalilerin 28 günlük mukavemete etkisi azdır.
4. Çabuk soğutulmuş klinkerin öğütülmesi daha kolaydır. Hızlı soğutulan klinkerin iyi öğütülmesi içermiş olduğu fazla mikro gözeneklerden dolayı daha kolay olur.

Alit çift kırma indisi 0.007 den biraz daha yüksek yazılmış olabilir bu durumlarda 0.007+ üstü "iyi" olarak belirtilir, 0.008 biraz daha düşük dalgalanma aralığı 0.008- durumlarda "mükemmel" olarak nitelendirilir.

Öğütülebilirlik problemlerini açıklamak için bir deney yapılmıştır. Balane yüzeyi (BL) tahmini için mikroskobik verilere göre tahmini sayısal değerler verilerek bir denklem kullanılmıştır (Campbell, 1999).

$$BL = 1513 + 171AS + 167AB + 417BS - 153BC \quad (4.3)$$

Korelasyon katsayısı = 0,840

Standart sapma =  $97 \text{ cm}^2 / \text{g}$

AS = alit boyutu

AB = alit çift kırma indisi

BS = belit boyutu

BC = belit rengi

Klinkerde belit yuvalarının büyük gözenekliliğe sahip olması öğütülebilirliğine olumlu bir katkı sağlamadığı gözlenmiştir. Hatta öğütmenin son taşlamasında bile belit kümelerinin zarar görmediği görülmüştür (Campbell, 1999).

Ono (1981), öğütülebilirlik ile ilgili yaptığı bazı ön çalışmalarda, yanma koşulları, klinker mikro yapısı şöyle sıralanmıştır.

1-Hidrolik modülün yüksek olması (HM)  $\text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  daha yumuşak ve daha kolay öğütülebilmesini sağlar.

2- Klinker ince toz fraksiyonu alit parçaları bakımından zengindir. Kaba kısımda bulunan küçük taneli kahverengi renkli aglomeraların çevresi belitçe zengindir.

3- Yüksek yoğunluklu ve iyi yanmış klinkerin kaba öğütülebilirliği (1-2 mm) zor olup, ince öğütülebilirliği (<88 mikron) kolaydır.

Ono yöntemi ve mikroskop sonuçları göz önüne alınarak bilgisayar veri tabanına işlenerek yapılan analizlerde çimento kalite kontrolü için rutin ve hızlı değerlendirme yapmaya olanak sağlamaktadır. Sürekli güncellenen analizlerde şu değişkenler vardır; klinker sıcaklığı, ikincil hava sıcaklığı, ekstraksiyon hava sıcaklığı, fırın dönme hızı (Campbell, 1999).

Kötü yanmış klinkerin özellikleri şu şekilde listelenmiştir: serbest kireç oranı % 4,5 den daha büyük, sıkışık kümeli büyük serbest kireç yuvaları, belit yuvalarını çevreleyen küçük alitler, yüksek gözenekli gevşek bir çerçevede serbest kireç ve alkali alüminatlar gözlenir. İyi yanmış klinkerlerde dolomit, kaba alüminat ve ferritten gelen küçük serbest kireç, oktahedral periklas gözlenir. Normal yoğunlukta klinkerin 1,20 ile 1,25 kg/lt, gözenekliliği 0,13 ile 0,16 cc/cc 'dir.

Yanma derecesi ile ilgili olarak klinker özellikleri yapılan çalışmalarla belirlenmiştir. İyi yanmış klinkerin yoğunluk aralığı 1,30- 1,32 kg/lt, gözenekliliği 0,04- 0,07 cc/cc 'dir. İyi yanmış klinkerlerde 30–40 µm arasında bazen 60 µm'a kadar değişen alit kristalleri ile 20–40 µm arasında değişen belit kristalleri karakteristiktir (Campbell, 1999).

Buna karşılık kötü yanmış klinkerin birim yoğunluğu 1kg/lt ve gözenekliliği 0,25- 0,35 cc/cc' dir. Kötü yanmış klinkerlerde alit minerallerinin kristal boyutları geniş bir aralığa sahiptir (15–60 µm, ortalama 30–40 µm ). Kötü yanmış klinkerde belit mineralleri 200–400 µm arasında değişen çaplarda içi boş kürecikler oluşturur. Kötü yanmış klinkerlerde 10–30 µm arasında boyutlarda belit minerali gözlenir.

#### **4.5 Çimentonun Kimyasal Bileşimi**

Kalker, kil, marn, alüminyum ve demir oksit gibi hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılıp 90 µm 'dan daha ince olacak şekilde öğütülüp döner fırında sinterleşme sıcaklığına kadar pişirilmesiyle oluşan ara ürün klinkerin çeşitli katkı maddeleri ile öğütülmesiyle elde edilen üründür. Çimentonun ara ürünü olan klinkerin kimyasal bileşimi genel itibariyle aşağıdaki çizelgedeki gibidir (Çizelge 4.3).

**Çizelge 4.3.** İncelenen klinkerin kimyasal bileşimi (Niğde-ÇİMSA).

Tarihler	Klinker kimyası										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	A.Z.	S.CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl
17.06.2011	20,84	5,27	3,52	65,02	2,81	1,17	0,18	1,30	0,50	0,75	0,0130
18.06.2011	20,86	5,33	3,62	64,46	2,89	1,14	0,19	1,10	0,51	0,75	0,0106
19.06.2011	20,87	5,33	3,59	64,81	2,88	1,11	0,18	1,25	0,53	0,76	0,0084
07.07.2011	20,66	4,80	5,07	64,78	2,05	1,30	0,19	0,61	0,34	0,70	0,0070
10.07.2011	20,93	5,18	3,30	65,26	2,69	1,18	0,21	1,42	0,36	0,74	0,0061
14.07.2011	20,93	5,31	3,51	64,96	2,80	1,18	0,18	0,93	0,44	0,75	0,0115
15.07.2011	20,83	5,29	3,53	64,75	2,91	1,28	0,19	0,77	0,43	0,80	0,0091
TOPLAM											

**Çizelge 4.4.** Portland çimentosuna ait klinkerin kimyasal bileşimi (Yazıcı, H.)

Oksitler	İsimler	Gösterim	Miktarı
CaO	Sönmemiş kireç	C	% 58-67
SiO <sub>2</sub>	Silika	S	% 16-26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alümina	A	% 4-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir oksit	F	% 2-5
MgO	Magnezyum oksit	M	% 1-5
Na <sub>2</sub> O	Sodyum oksit	N	% 0-1
K <sub>2</sub> O	Potasyum oksit	K	% 0-1
SO <sub>3</sub>	Sülfirik anhidridi		% 0,1-2,5
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mangan oksit		% 0-3
TiO <sub>2</sub>	Titanyum oksit		% 0-0,5
Kızdırma Kaybı % 0,5-3			

#### 4.5.1 Çimento modülleri

Üretilen çimentonun fiziksel özellikleri mukavemet değerleri fırında pişirilmesine bağlı olsa da temelde farinin kimyasal bileşimine de bağlıdır. Çimento üretimi başlarda tecrübeyle hammaddelerin belirli oranlarda katılmasıyla üretilmiştir. Ancak gelişen teknoloji ve yapılan bir çok araştırmaya göre hammaddeyi oluşturan kireç taşının, silisin, demir oksidin ve alüminyum oksidin belli hassas oranlarda birleşim yaptığı tespit edilmiştir.

#### 4.5.1.1 Silikat modülü

$$S.M.=\frac{SiO_2}{Al_2O_3+Fe_2O_3}$$

Silikat modülü, toplam  $Al_2O_3$  ve  $Fe_2O_3$  içindeki  $SiO_2$ 'nin ağırlık olarak oranını vermektedir. Silika modülü 1.9 ile 3.2 değerleri arasında değişmektedir. Silika modülü için en uygun değerler 2. 2 ile 2. 6 arasındadır (Duda, 1985).

Silikat modülü klinker kalitesini direk etkiler. Silikat modülünün yüksek değerlerde olması pişme gücüne, daha fazla yakıt kullanımına, sinterleşmenin güç olması nedeniyle daha yüksek ısılarda pişirme gereğine neden olur. Yüksek silikat modülü çimentonun priz süresini geciktirir ve donmasını yavaşlatır. Fırın yüksek sıcaklıklarda çalıştırıldığı için fırın içerisindeki aksamalara zarar verebilir. Düşük değerlerdeki silikat modülü yani alüminyum ve demir oksit değerlerinin yüksek olması farinin kolay sinterleşmesini sağlar. Ancak fazla düşük olması fırın içinde artık malzeme kalmasıyla ortaya çıkan kemerler oluşturur ki bu üretimin aksaması demektir.

#### 4.5.2 Hidrolik modül

$$H.M.=\frac{CaO}{SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3}$$

Çimento içerisinde bulunan kalsiyum oksidin; silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir okside oranına hidrolik modül denir. Kaliteli çimentoların hidrolik modüllü ikiye yakındır. Hidrolik modülü 1.7'den az olanlar yeterli dayanıma sahip değildir. 2.4'den yüksek olanlar ise hacim açısından dengesizdir. Genel olarak hidrolik modül yükseldikçe klinkerin pişmesi için daha fazla ısı gerekmektedir.

#### 4.5.3 Alümina modülü (kil modülü)

$$T.M.=\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Çimento içerisinde bulunan alüminyum oksidin demir okside oranına alümina modülü denir. Bu oran genellikle 1.5 ila 2.5 arasında değişir. Yüksek alüminalı çimentolarda

2,5'in üzerinde, düşük alüminalı çimentolarda ise 1.5'in altındadır. Alüminyum modülü klinkerin sinterleşme değerlerinin kontrolünü sağlar. Modülün yüksek değerlerde olması düşük enerji sarfiyatını sağlar. Demir oranının yüksek olması ise klinkerin sert ve yoğunluğunun yüksek olmasına neden olur.

#### 4.5.4 Kireç doygunluk faktörü (LSF)

Portland çimentosu içinde ne miktarda CaO bulunması gerektiği teorik olarak hesaplanabilir. Eğer çimento içinde bulunan bütün silisyum dioksitin C<sub>3</sub>S olarak, bütün demir oksitin eşdeğer miktardaki alüminyum oksitle C<sub>4</sub>AF olarak ve artan alüminyum oksitin de C<sub>3</sub>A olarak bağlandığı kabul edilirse, klinkerdeki kireç doygunluğu tam olarak gerçekleşmiş olur. Bu kabullere göre çimento içinde bulunan silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit tarafından bağlanan maksimum kalsiyum oksit miktarı teorik olarak hesaplanabilir. Eğer alüminyum modülü <0,64, yani molar olarak  $Fe_2O_3 > Al_2O_3$  ise, bu durumda bütün Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, klinker içinde C<sub>4</sub>AF halinde bulunur. Buna göre klinker içinde bulunması gereken maksimum kireç ve kireç doygunluk derecesi içinde aşağıdaki bağıntılar verilebilir (Yalçın ve Gürü, 2006).

$$CaO_{max} = 2,80 SiO_2 + 1,10 Al_2O_3 + 0,70 Fe_2O_3$$

$$LSF = \frac{100 CaO}{2,8 SiO_2 + 1,1 Al_2O_3 + 0,7 Fe_2O_3}$$

Hammadde karışımının en önemli bileşeni olan CaO miktarının dikkatle hesaplanması gerekir. Kireç doygunluk derecesi yüksek olan hammadde karışımlarında, pişmenin sağlanabilmesi için yakıt sarfiyatı yükselir. Malzeme zor pişer, çimento içinde serbest kireç fazla olur ve ilk gündeki dayanımlar yüksektir. Düşük kireç doygunluk faktörü olan ham karışımlarda ise, pişme kolaydır, ancak C<sub>3</sub>S fazının az, C<sub>2</sub>S fazının çok fazla oluşmasından dolayı dayanımlarda düşük olur. Kireç doygunluk faktörü her fabrika için farklı olmakla birlikte genellikle 90-98 arasında olması istenir (Yalçın ve Gürü, 2006).

**Çizelge 4.5.** Çimentoyu oluşturan oksitlerin yaklaşık oranları

Oksitler	İsimler	Gösterim	Miktarı
CaO	Sönmemiş kireç	C	63-67
SiO <sub>2</sub>	Silika	S	20-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alümina	A	5-9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir oksit	F	2-6
MgO	Magnezyum oksit	M	0,5-4
Na <sub>2</sub> O	Sodyum oksit	N	0,2-1,3
K <sub>2</sub> O	Potasyum oksit	K	0,2-1,3
SO <sub>3</sub>	Sülfirik anhidridi	S'	1,3

## BÖLÜM V

### SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, Niğde ÇİMSA Çimento Fabrikası'ndan alınan farklı zamanlarda üretilmiş ve farklı özelliklere sahip klinker numunesinin mineralojik ve petrografik özellikleri belirlenmiş, Bu özellikler, Ono (1980b) metoduna göre değerlendirilerek, klinkerlerin pişirilme koşulları incelenmiştir.

Altan aydınlatmalı polarizan mikroskoplarla, yaklaşık 0.30 mm kalınlığında hazır beton veya diğer malzemeler, örneğin klinkerlerden hazırlanan ince kesitler incelenmektedir. Işığı geçirmeyen cevher minerallerinin (opak) incelenmesinde ya da elektron mikroskop kullanımının gerektiği durumlarda ise, parlak kesitler tercih edilir. İnce ve parlak kesitler hazırlanırken kayaç ve mineral ince kesitlerinin hazırlanmasına benzer bir protokol izlenmektedir. Ancak beton numuneleri hazırlanırken, betonun gevrek yapısından dolayı, çeşitli çatlama ve kopmalar oluşabilir. Bu istenmeyen durumların oluşmasını engellemek amacıyla ince ve parlak kesit üretimine geçilmeden önce malzemeye düşük viskoziteli epoksi emdirilmesi genel kabul görmüş bir yöntemdir. Epoksi kürlendikten sonra SiC, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(korund) veya endüstriyel elmas bazlı aşındırıcılar ve parlaticılar ile numuneler mikroskobik çalışmalarda kullanıma hazır hale getirilmektedir.

Kullanılmış olan çimento tipinin belirlenmesi veya çimento hammaddelerinin incelenmesi amaçlandığında polarizasyon mikroskopisi sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Mikroskop yardımıyla çimento tipi belirlenmek istendiğinde özellikle alite, belite gibi klinker mineralleri belirlenmeli, daha sonra varsa puzolanik katkıları incelenmelidir. Özellikle klinkeri oluşturan alite ve belite kristalleri, anizotrop yapılarda olup, çapraz polarizasyon yardımıyla ince kesitte kolaylıkla tayin edilebilmektedir. Ancak, diğer önemli klinker kristalleri olan C<sub>3</sub>A ve Brownmilleritin (C<sub>4</sub>AF) incelenmesi istendiğinde, alttan aydınlatmalı polarizasyon mikroskobu yerine üstten aydınlatmalı cevher mikroskobu kullanmak gerekmektedir.

Çimento üretim teknolojisine Japon bilim adamı Yoshio Ono'nun en önemli katkısı; polarize ışık mikroskobu kullanarak çimento kalitesinin belirlenmesi olmuştur. Bu

yöntem polarize ışık mikroskobu ile birlikte diğer test ve cihazlardan elde edilen verilerin fırın koşullarının kontrol edilmesi esasına dayanır. Böylece medeniyetlerin ihtişamını temsil eden yapıların temel taşı olan çimentonun kalitesini yükseltmeye çalışılmıştır.

Niğde ÇİMSA Fabrikadan farklı zamanlarda alınan klinker numuneleri polarizan mikroskobunda incelenmiş ve Ono (1980b) yöntemi kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Bu yönteme göre alit boyu 3 (iyi) olarak değerlendirilmiştir. Alit boyu fırında klinkerin ısıtma hızına göre değişim göstermektedir. Buna göre kısa alevde yavaş yanma sonucu büyük boyutlu alit minerali oluşurken uzun alevde ve hızlı yanmada küçük boyutlu alit minerali olduğu gözlenmiştir. Belit minerali klinkerin fırında yanma süresi üzerinde etkilidir. Belit mineralinin boyutu yine aynı yönteme göre 3 yani iyi düzeyde belirlenmiştir. Uygulanan aynı yöntemde, alit mineralinin çift kırma indisi klinkerin maksimum sıcaklığının belirlenmesinde belirleyici olduğu belirlenmiştir. Yapılan incelemeye göre alit çift kırma indisi Michel Levis Tablosuna göre 3 (iyi) olarak belirlenmiş ve fırının 1400 °C üzerinde bir sıcaklıkla yanma gerçekleştirmesi çimento kalitesini daha yükselteceği anlaşılmaktadır. Belit mineralinin renginin amber sarısı olarak tespiti, bunun düşük sıcaklıkta uzun yanma süresi, yavaş ısıtma hızı ve klinkerin yavaş yavaş soğuması sonucunda olduğu sonucuna varılmıştır. İncelediğimiz numunede belit rengi soluk sarı yani 3 olarak belirlenmiştir. Belit soğumaya başlarken ilk olarak şeffaf renkten soluk sarıya ve sonraki soğuma hızına göre amber rengine doğru değişim gösterir. Klinkerin soğumasının hızlı olması kaliteyi artırıcı bir etki yaptığı belirlenmiştir.

Ono (1980b) yönteminin çimento teknolojisinde kullanılması kalite kontrolün kolay ve çabuk yapılabilmesini sağlamaktadır. Pişmekte olan klinker numunesinden alınan örnek kısa bir sürede hazırlanıp incelenebilir ve klinkerin pişme koşullarına hızlı bir şekilde müdahale edilip, kalitesi yüksek çimento elde edilmesini sağlanabilmektedir. Bu da çimento üretiminde kalitenin an ve an takip edilebileceğini göstermektedir.

## KAYNAKLAR

Ailen, T., Partide Size Measurement, Powder 134, 1981.

Altun, A.,Çimento klinkerindeki fazların oluşumu ve mikro yapıların incelenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (1), 29-40, 2000.

Altun, A.,Klinker kalite kontrolünde mikroskobik kriterler, *Çimento ve Beton Dünyası*, Sayı 16, 22-32, 1998.

Ayrancı, B., Çimento Teknolojisinde Petrografi, *M.T.A.*, Ankara, 1971.

Brüggemann, H. and Bentrup, L., Relationship between cement strength and the chemico-mineralogical parameters of the clinker, *ZKG*, No. 1, 30-33, 1990.

Bye, G.C., Portland Cement composition, production and properties, *Thomas Telford 2nd Edition*, London, 225s., 1999.

Campbell, D.H., Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker, *Portland Cement Association*, Second Edition, USA, 201p., 1999.

Charmant, J., Chermant, L., Coster, M., Dequiedt, A. and Redon, C., Some Field of applications of automatic image analysis in civil engineering, *Cement and Concrete Composite*, 23, 157-169, 2001.

Chromy, S., "Mechanism of White Clinker Formation," *Sixth International Congress on the Chemistry of Cement*, Supplemental paper, III-8, Moscow, pp. 2-18., 1974.

Chromy, S., and Carin, V., "Microscopic Studies of Alite and Belite in Portland Cement Clinker," *Cement*, No. 1, pp. 18-21 (in Croatian), 1980/81.

Chromy, S., "Process of Portland Clinker Formation, Reactivity, and Burnability of Cement Raw Materials: Part I: Mechanism of Portland Clinker Formation," *Zement-Kalk-Gips*, Vol. 35, No. 4, pp. 204-210, 1982.

D.P.T., Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayii Hammaddeleri, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Raporu, *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu*, Yayın No: D.P.T. 2614, Ö.İ.K 625, Ankara, 54 s., 2001.

D.P.T., Taş ve Toprağa Dayak Sanayiler, Dokuzuncu Kalkınma Planı, *Özel İhtisas Komisyon Raporu*, Cilt 1, Yayın No: D.P.T.2773, Ö.İ.K. 703, Ankara, 363 s., 2008.

Felekoğlu, B., Tosun, K. ve Altun, İ.A., Optik mikroskop ve görüntü işleme teknikleri kullanarak klinker karakterizasyonu, Bölüm I-Porozite ve kristal boyutu dağılımı, *Çimento ve Beton Dünyası*, Sayı 57, 54-67., 2005.

Feret, B. and Feret, C.F., CemQUANT(D software mathematical modeling in quantitative has eanalysis of Portland cement, *Cementand Concrete Cement*, Vol. 29, 1627-1633., 1999.

Gille, F., Zur Mikroskopie des Zementes. ZKG 8. et al. (1965), Mikroskopie des Zementklinkers, *Bildatlas. Betonverlag GmbH*, Düsseldorf., 1955.

Ghosh, S.K., “Portland Cement Phases: Polymorphism, Solid Solution, Defect Structure, and Hydraulicity,” *Advances in Cement Technology*, ed. S.K. Ghosh, Pergamon Press, New York, pp. 289-305., 1983.

Hills, L.M., The effect of clinker microstructure on grindability: Literature review database, *Portland Cement Association Report*, 90p., 1995.

Hofmänner, F., Microstructure of Portland Cement Clinker, *Holderbank Management and Consulting*, Ltd., Holderbank, Switzerland, 48 pp., 1973.

[http://www.cimsa.com.tr/UserFiles/File/Document/pdf/Cimsa\\_Urunler](http://www.cimsa.com.tr/UserFiles/File/Document/pdf/Cimsa_Urunler)

[http://kisi.deu.edu.tr/halit.yazici/YM2/YM-II%233\\_CIMENTO.pdf](http://kisi.deu.edu.tr/halit.yazici/YM2/YM-II%233_CIMENTO.pdf)

Imlach, J.A., and Hofmänner, F., “Investigation of Clinker Formation by DTA and Optical Microscopy,” *Sixth International Congress on the Chemistry of Cement*, Supplemental Paper, Sec. I, I-5, Moscow, 11 pp., 1974.

Insley, H., “Structural Characteristics of Some Constituents of Portland Cement Clinker,” *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 17, Research Paper RP917, Washington, D.C., pp. 353-361., September 1936.

Kökipek, B., Suni Alçının Çimento Üretiminde Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, *Ç. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 2010.

Kraemer, H., Vergleichende mikroskopische Untersuchungen an Zementklinkern. *ZKG* 13, 1960.

Krischner, H., Einführung in die Röntgenfeinstrukturanalyse. *Vieweg*, Stuttgart, 170p, 1974.

Kurdowski, W., Cement Manufacture, Cement and Concrete Science and Technology Volume I Part I, S. N. Ghosh (ed.), *ABI Books Private Limited*, India, 57-98, 1991.

Maki, I., “Nature of the Prismatic Dark Interstitial Material in Portland Cement Clinker,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 3, pp. 295-313, 1973.

Maki, I., “Morphology of the So-Called Prismatic Phase in Portland Cement Clinker,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 4, pp. 87-97, 1974.

Maki, I., “Mineral Quality Evaluation and Basic Research Feasibility Study,” Special Paper, *Cement Manufacturing Technology Symposium, Proceedings*, Japanese Cement Association, November 30, pp.38-52 (in Japanese), 1982.

Maki, I., and Kato, K., “Phase Identification of Alite in Portland Cement Clinker,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 12, pp. 93-100, 1982.

Maki, I., Fukuda, K., Imura, T., Yoshida, H., Ito, S., “Formation of Belite Clusters from Quartz Grains in Portland Cement Clinker,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 4, pp. 835-840, 1982.

Moore, A.E., “The Sequence of Compound Formation in Portland Cement Rotary Kilns,” *Cement Technology*, Part I—Vol. 7, No. 3, pp. 85-91; Part II—Vol. 7, No. 4, pp. 134-138, 1976.

Müller, G. und Raith, M., “Methoden der Dünnschleifmikroskopie” , Çeviri: Yavuz Erkan, *Ankara Üniversitesi*. 114 s.,1988.

Ono, Y., and Shimota, T., “Microscopic Textures of Ferrite Phase in the Systems C<sub>6</sub>A<sub>2</sub>F-C<sub>3</sub>A and C<sub>2</sub>FC 2A<sub>6</sub>F-MgO,” *Reviews, 22nd General Meeting of the Cement Association of Japan*, pp. 27-3, 1968.

Ono, Y., “Microscopical Test of Clinker and Its Background,” *Journal of Research, Onoda Cement Co.*, Vol. 32, No. 104, pp. 101-109, 1980a.

Ono, Y., “Microscopy for the Quality Control of Cement,” *Journal of Research, Onoda Cement Co.*, Vol. 32, No. 104, pp. 110-112, 1980b.

Ono, Y., “Microscopical Estimation of Burning Condition and Quality of Clinker,” *Seventh International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, Vol. 2, Theme I, pp. 206-211, 1980c.

Ono, Y., “Microscopical Observation of Clinker for the Estimation of Burning Condition, Grindability, and Hydraulic Activity,” *Proceedings of the Third International Conference on Cement Microscopy, International Cement Microscopy Association*, Houston, Texas, pp. 198-210, 1981.

Öney, N., Çimentonun Kimyası, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Eğitim ve Değerlendirme Müdürlüğü, Ders Notları Serisi*, Ankara, s.1-29, 1998.

Patton, W.J., **Cements and Concretes, *Materials in Industry, Third Edition***, 408p, 1986.

Sansoni, G., and Zybell, H., “Grindability Tests with Portland Cement Clinkers. Preparation and Microscopic Testing of Clinkers,” *Silikattechnik*, Vol. 25, pp. 87-93 (in German), 1974.

Sarkar, S., “Microstructural Investigation of Strength Loss in a Type 10 Cement,” Proceedings of the 11th International Conference on Cement Microscopy, *International Cement Microscopy Association*, New Orleans, Louisiana, pp. 101-114, 1989.

Stutzman, P. and Leigh, S., Phase composition analysis of the NIST reference clinker by optical microscopy and X-ray powder diffraction, *NIST Technical Note 1441*, 44p., 2002.

Taylor, H.F.W, The Formation and Phase Composition of Portland Cement Clinker, The Chemistry of Cements, Volume 1, *Academic Press*, 460p., 1964.

Taylor, H.F.W, Cement Chemistry, *Thomas Telford Second Edition*, 459p., 1997.

Tereci, Z., Çimento Teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, *N.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2003.

T.Ç.M.B., Sürdürülebilir Çimento Üretimi, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, 2011

TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, 2002.

TS EN 196-1, Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, 2002.

Yalçın, H. ve Gürü, M., Çimento ve Beton, *Palme Yayınevi*, Ankara, 403 s., 2006.

Yeğinobalı, A., Çimento “Yeni Bir Çağın Malzemesi”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, 2. baskı, 52s., 2003.

Yeğinobalı, A. ve Ertün, T., " Çimentoda Standartlar ve Mineral Katkılar ", *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, 2009.

## ÖZGEÇMİŞ

11.01.1987 yılında Niğde'de doğdu. İlköğretim ve Lise eğitimini Niğde'de tamamladı. 2005 yılında başladığı Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümün' den 2009 yılında mezun oldu. 2010 yılında Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı. Halen Niğde Belediyesi İmar ve Şehircilik Müdürlüğünde jeoloji mühendisi olarak çalışmaktadır ve evlidir.