

T.C.
BİLECİK ŐEHY EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**BİLYALI DEĞİR MENLERDE ÇİMENTO ÜRETİM KAPASİTESİNİN
ARTIRILMASI VE ENERJİ TÜKETİMİNİN AZALTILMASINA YÖNELİK
OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI VE BUNLARIN SÜRDÜRÜLEBİLİR
EKOLOJİYE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FURKAN MERİÇ KAYA

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. VELİ ŞİMŞEK

BİLECİK, 2023

10526352

T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**BİLYALI DEĞİRMENLERDE ÇİMENTO ÜRETİM KAPASİTESİNİN ARTIRILMASI
VE ENERJİ TÜKETİMİNİN AZALTILMASINA YÖNELİK OPTİMİZASYON
ÇALIŞMALARI VE BUNLARIN SÜRDÜRÜLEBİLİR EKOLOJİYE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FURKAN MERİÇ KAYA

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. VELİ ŞİMŞEK

BİLECİK, 2023

10526352

BEYAN

“Bilyalı Değirmenlerde imento Üretim Kapasitesinin Artırılması ve Enerji Tüketiminin Azaltılmasına Yönelik Optimizasyon alışmaları ve Bunların Sürdürülebilir Ekolojiye Etkisi” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu alışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	
		X	
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:	/.....	

Furkan Meriç KAYA

Tarih

.....

İmza

.....

ÖN SÖZ

Yüksek Lisans tezimin tamamlanma sürecinde desteği, pozitif yaklaşımı ve tecrübeleriyle her zaman yanımda olan, en az benim kadar tez çalışmam üzerine emek harcayan danışman hocam Sn. Doç. Dr. Veli ŞİMŞEK'e, karbon ayak izi hesaplamalarında bilgi ve zamanımı paylaşan Sn. Dr. Öğr. Üyesi Burçin ATILGAN TÜRKMEN hocama, yüksek lisans sürecinde başından beri yanımda olan sevgili eşim Dilşad KAYA'ya, bu tezi bitirmem için sonuna kadar beni motive eden ve manevi olarak her zaman arkamda duran sevgili babam Kemal KAYA'ya, dualarıyla beni hiç yalnız bırakmayan canım annem Nimet KAYA'ya, benimle aynı masada karşılıklı ders çalışan biricik oğlum Emir Aras ve resimleriyle bana eşlik eden biricik kızım Dila'ya, projenin gerçekleşmesi için hiçbir imkanı esirgemeyen Vezirhan Çimento A.Ş.'e, projede dayanışma içinde çalıştığım sevgili mesai arkadaşım Çimento Üretim Şefi Şafak DEMİR'e, araştırma ve analiz çalışmalarım sırasında XRD ve partikül analiz cihazları ile bana destek olan Traçim Çimento A.Ş.'e ve sevgili arkadaşım Traçim Çimento Kalite ve İş Geliştirme Şefi Seda EREN TOPAL'a teşekkürlerimi ve minnet duygularımı sunarım.

Furkan Meriç KAYA

2023

ÖZET

BİLYALI DEĞİRMENLERDE ÇİMENTO ÜRETİM KAPASİTESİNİN ARTIRILMASI VE ENERJİ TÜKETİMİNİN AZALTILMASINA YÖNELİK OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI VE BUNLARIN SÜRDÜRÜLEBİLİR EKOLOJİYE ETKİSİ

Bu yüksek lisans tezinin temel amacı, bilyalı çimento değirmenlerinde kalite kriterlerinden taviz vermeden, üretim kapasitesinin artırılması ve enerji kullanımının azaltılması için optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesidir. Bu optimizasyon işlemleri üretim süreçleri durdurulmadan yapılmıştır. Başka bir ifadeyle tesisin durdurulması sonucu meydana gelebilecek ekonomik çıktılarının minimuma indirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca yapılan bu çalışmanın çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan sürdürülebilirliğe etkisi incelenmiştir.

Sunulan bu yüksek lisans tezinde optimizasyon çalışmaları üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, kapasitesinin çok altında çalışmakta olan çimento değirmenlerinin mevcut çalışma şartları ile elde edilen blaine (özümlü yüzey), incelik, kimyasal analiz ve saatlik üretim değerleri incelenmiştir. İkinci aşamada, değirmen çalışma şartları değiştirilerek (değirmen giriş çıkış emişleri, seperatör temiz hava klape açıklıkları, filtre giriş sıcaklıkları, vb. gibi) saatlik üretim değerlerinin nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Üçüncü aşamada ise değiştirilen parametrelerle yaklaşık 3 ay boyunca çimento üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, belli zaman aralıklarında değirmenlerin farklı noktalarından alınan numunelerin, dayanım, özgül yüzey, incelik ve kimyasal içerikleri XRD, CNH-S, SEM/EDX, MAPPING, FT-IR ve partikül sizer analiz yöntemleriyle incelenmiştir. Özellikle, seperatör temiz hava klape açıklığının %30-50 seviyelerinden %80-100 seviyelerine artırılması nedeniyle seperatör geri dönüş tonajının 200 ton/saat değerlerinden yaklaşık 150 ton/saat değerlerine çekilmesi sağlanmıştır. Çimento incelik değerlerinde ise her iki değirmende yaklaşık %18'lik artış gözlenmiştir. Çimento incelik değerlerindeki artış öğütme süresini kısaltmasıyla enerji tüketiminde tasarruf sağlamıştır. Yapılan 28 günlük dayanım test sonuçlarında yaklaşık %4 artış gözlenmiştir. Her iki değirmen için, saatlik üretim değerleri incelendiğinde ise 73-74 ton/saat üretim değerlerinden 79-80 ton/saat üretim değerlerine ulaşılmıştır. Diğer taraftan, optimizasyon çalışması sonrası değirmen ünitelerine ait ve üretim artışına bağlı olarak sevkiyatta kullanılan araçların sürdürülebilir ekolojiye ve ekonomiye etkisi KAI değerlerinin hesaplanmasıyla değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, optimizasyon öncesi ve sonrası elde edilen sonuçlar detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Optimizasyon sonrası hem enerji maliyeti, hem de ürün kalitesi bakımından önemli iyileştirmeler gözlenmiştir. Daha iyi kalitede ve düşük enerji tüketiminde yaklaşık %8 kapasite artışı sağlamanın yanında, enerji tüketimindeki azalmaya bağlı olarak sera gazı emisyonuna neden olan girdilerin kısmi olarak düşürüldüğü belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Optimizasyon, çimento değirmeni, seperatör, verim, dayanım, sürdürülebilir ekolojik-üretim.

ABSTRACT

OPTIMIZATION STUDIES IN BALL MILLS TO INCREASE CEMENT PRODUCTION CAPACITY AND REDUCE ENERGY CONSUMPTION AND THEIR EFFECT ON SUSTAINABLE ECOLOGY

The main purpose of this master's thesis is to carry out optimization studies to increase production capacity and reduce energy use in ball cement mills without compromising quality criteria. Moreover, these optimization processes were carried out without stopping the production processes. In other words, it seeks to minimize the economic output that may result from shutting down the facility. In addition, the effect of this study on sustainability in terms of environmental, economic, and social aspects was examined.

In the master's thesis presented here, optimization studies were carried out in three stages. In the first stage, the blaine (specific surface), fineness, chemical analysis, and hourly production values obtained with the current working conditions of the cement mills operating far below their capacity were examined. In the second stage, it was observed how the hourly production values changed by changing the mill operating conditions (mill inlet and outlet suction, filter inlet temperatures, damper angles, etc.). In the third stage, cement production was carried out with the changed parameters for about 3 months. Then, the strength, specific surface, fineness, and chemical contents of the samples taken from different points of the mills at certain time intervals were examined by XRD, CNH-S, SEM/EDX, MAPPING, FT-IR, and particle sizer analysis methods. Especially since the opening values of the separator's fresh air inlets were increased from 30–50% to 80–100%, the return tonnage of the separator was reduced from 200 tons per hour to approximately 150 tons per hour. Besides, an increase of approximately 18% was observed in cement fineness values in both mills. The increase in cement fineness values shortened the grinding time and saved energy consumption. An increase of approximately 4% has been observed in the 28-day strength test results. When the hourly production values for both mills are examined, they have ranged from 73–74 tons per hour to 79–80 tons per hour. On the other hand, after the optimization study, the effects of the vehicles belonging to the mill units and used in the shipment, depending on the increase in production, on sustainable ecology and economy were evaluated by calculating the CFP values.

As a result, the results obtained before and after optimization were compared in detail. After the optimization, significant improvements were observed in terms of both energy cost and product quality. It has been determined that, besides providing an approximately 8% capacity increase in better quality and low energy consumption, the inputs that cause greenhouse gas emissions are partially reduced due to the decrease in energy consumption.

Keywords: Optimization, cement mill, separator, yield, strength, sustainable eco-production.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR VE KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1 Çimento Üretim Prosesi.....	6
2.1.1 Taş ocağı	7
2.1.2 Hammadde Hazırlama	8
2.1.3 Yakıt Hazırlama.....	9
2.1.4 Klinker Üretimi	9
2.1.5 Mineral Ekleme	12
2.1.6 Çimento Öğütme	13
2.1.6.1 Seperasyon İşlemi ve Seperatör Tipleri	14
2.1.6.1.1 Statik Seperatörler	16
2.1.6.1.1.1 Kanat Tipi Seperatörler	17
2.1.6.1.1.2 V Tipi Seperatörler	18
2.1.6.1.2 Dinamik Seperatörler	19
2.1.6.1.2.1 Birinci Nesil Dinamik Seperatörler	20
2.1.6.1.2.2 İkinci Nesil Dinamik Seperatörler	21

yfa2.1.6.1.2.3 Üçüncü Nesil Dinamik Seperatörler	21
2.1.6.2 İnceliği Etkileyen Parametreler	23
2.1.6.2.1 Mekanik Parametreler	23
2.1.6.2.2 Fiziksel-Kimyasal Parametreler	23
2.1.6.2.3 Operasyonel Parametreler	23
2.1.7 Paketleme ve Sevkiyat.....	26
2.2 Portland Çimentosu	26
2.2.1 Portland Çimento Tipleri	26
2.2.1.1 Avrupa Standartları Çimento Tipleri	26
2.2.1.2 Amerikan Standartları Çimento Tipleri	28
2.3 Sürdürülebilir Gelişmelerin Ekolojiye ve Sosyal Hayata Etkisi	29
2.3.1 Karbon Ayak İzi	30
3. MATERYAL VE METOT	32
3.1 Karakterizasyon Yöntemleri	33
3.1.1 Astek Alpin Elek Cihazı.....	34
3.1.2 Astek Basınç Dayanım Cihazı.....	35
3.1.3 Astek Blaine (Özgül Yüzey Alanı) Cihazı.....	35
3.1.4 Partikül Boyut Analizleri	36
3.1.5 SEM/EDX-MAPPING Analiz Yöntemleri	36
3.1.6 FT-IR Analiz Yöntemi	37
3.1.7 CHN-S Elemental Analiz Yöntemi	37
3.1.8 XRF (X-Ray Floresans) Analiz Yöntemi.	37
3.1.9 XRD Analiz Yöntemi	39
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	40
4.1 Optimizasyon Çalışmaları	40
4.1.1 XRD Analiz Sonuçları	45
4.1.2 XRF Analiz Sonuçları	49

4.1.3 Partikül Boyut Analiz Sonuçları	50
4.1.4 FT-IR Analiz Sonuçları.....	53
4.1.5 SEM/EDX ve MAPPING Analiz Sonuçları	55
4.1.6 CHN-S Analiz Sonuçları.....	61
4.1.7 KAI Analiz Sonuçları	61
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	63
6. DEĞERLENDİRME.....	64
KAYNAKÇA	65
EKLER.....	71

ÇİZELGELER LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Türkiye’de bölgesel çimento ve klinker üretim kapasiteleri	6
Çizelge 2.2. Klinker içindeki temel oksit formları	10
Çizelge 2.3. Klinker oluşum prosesi	11
Çizelge 2.4. Klinker fazları	11
Çizelge 2.5. Dinamik seperatör çeşitleri	20
Çizelge 2.6. EN 197-1 Çimento tipleri	27
Çizelge 2.7. ASTM C 150 Çimento tipleri	28
Çizelge 2.8. ASTM C150Çimento tiplerinin ana bileşen miktarları	29
Çizelge 3.1. Çimento örnekleri üzerinde gerçekleştirilen karakterizasyon analizleri	32
Çizelge 4.1. II. Çimento değirmeninde normal ve test çalışması verilerinin karşılaştırılması	41
Çizelge 4.2. I. Çimento değirmeninden alınan numunelerin analiz sonuçları	42
Çizelge 4.3. I. Çimento değirmeni verimlilik tablosu	42
Çizelge 4.4. II. Çimento değirmeninden alınan numunelerinin analiz sonuçları	42
Çizelge 4.5. II. Çimento değirmeni verimlilik tablosu	43
Çizelge 4.6. I. Çimento değirmeni Cem I 42,5 R ürünü için işletme parametreleri.....	44
Çizelge 4.7. II. Çimento değirmeni Cem I 42,5 R ürünü için işletme parametreleri	45
Çizelge 4.8. I. Çimento Değirmeni Optimizasyon Çalışması Sonuçları	46
Çizelge 4.9. II. Çimento Değirmeni Optimizasyon Çalışması Sonuçları.....	46
Çizelge 4.10. Çimento Değirmenleri Aylık Enerji Tüketimleri Tablosu.....	46
Çizelge 4.11. Optimizasyon öncesi ve sonrası XRD analiz sonuçları	50
Çizelge 4.12. Optimizasyon öncesi ve sonrası incelik, blaine, XRF analiz sonuçları	51
Çizelge 4.13. Elde edilen çimentoların spesifik yüzey alanları	54
Çizelge 4.14. Optimizasyon öncesi çimento örneklerinin SEM görüntüleri	58
Çizelge 4.15. Optimizasyon sonrası çimento örneklerinin SEM görüntüleri	59
Çizelge 4.16. Optimizasyon sonrası çimento örneklerinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri	59
Çizelge 4.17. Optimizasyon sonrası çimento DÜ örneğinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri	59

Çizelge 4.18. Optimizasyon öncesi DÇ çimento örneğinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri	60
Çizelge 4.19. Optimizasyon sonrası DÇ çimento örneğinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri	61
Çizelge 4.20. Elde edilen çimentoların CHN- S değerleri	62

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Çimento üretimi akış şeması	8
Şekil 2.2. Hammadde hazırlama iş akım şeması	9
Şekil 2.3. Bilyalı çimento değirmeni	13
Şekil 2.4. Seperatör tipleri	15
Şekil 2.5. Statik havalı seperatör kesit görünümü	16
Şekil 2.6. Kanat tipi statik seperatör	18
Şekil 2.7. V tipi statik seperatör.....	19
Şekil 2.8. Dinamik seperatörler için tromp eğrileri... ..	20
Şekil 2.9. Kapalı çevrim çimento değirmeni	24
Şekil 2.10. Çimento tipi kodlaması	28
Şekil 3.1. Astek elek cihazı	33
Şekil 3.2. Basınç dayanım cihazı	34
Şekil 3.3. Blaine cihazı	34
Şekil 3.4. SEM Zeiss/Supra 40 VP cihazı	35
Şekil 3.5. LECO/CHN-S 628 cihazı	36
Şekil 3.6. X-Ray floresans analiz metodu atomik modeli	37
Şekil 3.7. X-Ray floresans cihazı	37
Şekil 3.8. XRD cihazı	38
Şekil 3.9. Çimento değirmeni seperatör verimlilik tespiti için numune alma noktaları.....	39
Şekil 4.1. I. Değirmen numunelerinin alındığı andaki CCR ekran görüntüsü.....	42
Şekil 4.2. II. Değirmen numunelerinin alındığı andaki CCR ekran görüntüsü... ..	43
Şekil 4.3. Optimizasyon öncesi numunelerin XRD analiz sonuçları.....	47
Şekil 4.4. Optimizasyon sonrası numunelerin XRD analiz sonuçları	48
Şekil 4.5. Örnek olarak seçilen çimento numunesinde XRD faz analiz sonuçları	49
Şekil 4.6. Optimizasyon sonrası DÜ numunesinde intensity sonuçları	50
Şekil 4.7. Optimizasyon öncesi değirmen numunelerinde partikül boyut dağılımı sonuçları	52
Şekil 4.8. Optimizasyon sonrası değirmen numunelerinde partikül boyut dağılımı sonuçları	53

- Şekil 4.9.** Optimizasyon öncesi değirmen numunelerinde FTIR analiz sonuçları ... **55**
- Şekil 4.10.** Optimizasyon sonrası değirmen numunelerinde FTIR analiz sonuçları .. **55**
- Şekil 4.11.** Değirmenlerin enerji tüketimine bağlı olarak KAI değerleri..... **63**

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

- A** : Alüminyum Oksit, $Al_2O_3 \cdot Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$: Kaolinit Grup **ALM** : Alüminyum Modülü **ATY** : Atıktan Türetilmiş Yakıt °C : Santigrat Derece
- C** : Kalsiyum Oksit, **CaO** : Kalsiyum Alüminat **CaO** : Kalsiyum Oksit **CaCO₃**: Kalsiyum Karbonat
- CCR** : Merkezi Kumanda Odası
- CO₂** : KarbonDiOksit
- CS** : Kalsiyum Silikat
- C₂S** : Dikalsiyum Silikat, Belit
- C₃A** : Trikalsiyum Alüminat **C₃S**:Trikalsiyum Silikat, Alit
- C₄AF** : Tetrakalsiyum Alüminoferrit
- DC** : Değirmen Çıkış
- DF** : Değirmen Filtre
- DGD** : Değirmen Geri Dönüş
- DSG** : Değirmen Seperatör Giriş
- DU** : Değirmen Ürün
- F** : Demir Oksit, Fe_2O_3
- FTIR** : Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi
- H₂O** : Su
- KAI** : Karbon Ayak İzi
- Kg** : Kilogram
- LNG** : Likit petrol gaz
- LSF** : Kireç Doygunluk Faktörü
- mPa** : Mega paskal

Ort : Ortalama

S : SilisyumDiOksit, SiO₂

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

SIM : Silikat Modülüs.**CaO** : Serbest Kireç **Vb** : Ve benzeri

XRD : X-Işını Kırınım Cihazı

XRF : X-Işını Floresans Fotometresi

1. GİRİŞ

Çimento, suyla birleştğinde hidrasyon reaksiyonlarının meydana gelmesiyle sertleşen ve bu sertliğini de uzun yıllar koruyan inorganik bir malzemedir. Çimentonun kimyasal yapısının, inceliğinin ve partikül dağılımının basınç dayanımına direkt etkisi bulunmaktadır. Çimento değirmenleri, klinkerin, kalker, alçı taşı, tras gibi yan katkı malzemeleriyle beraber öğütülerek homojen hale getirilmesi işlevini görmektedir. Bu fonksiyonu ile de çimento, üretim prosesinin en önemli basamaklarından birini oluşturmaktadır (Gülşen, 2016). Entegre çimento üretim prosesinde, ocaklardan getirilen hammaddenin büyük kırıcı sistemlerde kırılarak ufaltılması ve belli reçete ile fırında pişme öncesi hazırlanması sonucu farin adı verilen homojen karışım elde edilir. Farin, siloya alınmadan önce ve silodan fırına beslenirken numuneler alınarak fiziksel ve kimyasal testleri yapılır ve bilgisayar ortamına aktarılır. Pişme sonrası oluşan yarı mamul klinkerin kalker, tras, alçı taşı gibi yardımcı hammaddelerle çimento değirmenlerine beslenmesi ve öğütülmesi ile de istenilen tip çimento üretilmiş olur. Bir malzemenin öğütülmesi, değirmen geometrisi, hız, bilya boyutları, mineralin öğünebilirliği ve granül geometrisi gibi birden çok faktöre bağlıdır (Godwin & Supparaj, 2010).

İnşaat sektörünün ana elemanı olan çimento için tüm dünyada 3 milyar ton/yıl gibi (Çimento cam seramik ve toprak ürünleri ihracatçıları birliği, 2014) oldukça fazla bir talep mevcuttur. Çimento fabrikaları da yedi gün yirmi dört saat üretim yaparak bu talebi karşılamaya çalışırken karlılığını artırmak amacıyla sürekli olarak enerji verimliliği daha yüksek teknolojileri araştırmalı, benimsemeli ve böylece rekabet gücünü artırmalıdır (Karbassi & Jafari ve diğerleri, 2010). Bu fabrikaların tümünde ortak amaç, daha az enerji ile daha fazla üretim yaparak üretim maliyetleri ve işçilikten tasarruf sağlayıp toplam maliyeti sınır değerlere indirmek, iç ve dış piyasada rakipleriyle kıyasıya mücadeleyi kazanabilmektir (Nakamura & Aizawa ve diğ., 1986). Bu amaca ulaşmanın en önemli yollarından biri de enerji tüketiminin yoğun olduğu proses basamaklarında optimizasyon çalışması yapmaktır. Enerji tüketim değerleri, işletmenin performansında önemli bir parametre ve optimizasyon değerlendirmede kritik bir faktördür. Proseste sabit olmayan ve dar boğazlara sebep olan faktörlerin etkin bir şekilde ele alınması gerekir. Bir endüstriyel çimento fabrikasında çeşitli kritik proses değişkenleri ve ürün kalite parametreleri anlık olarak ölçülemeyebilir ancak bunu elimine edebilecek bir çözüm, spesifik enerji tüketiminde azalma ile birlikte proses değişkenliğinin önemli ölçüde azaltılmasını da sağlar (Sahasrabudhe & Sistu ve diğerleri, 2006).

Optimizasyon, bir proste, projede ya da sistemde mevcut kaynakların en verimli şekilde kullanılarak maksimum verim, kapasite artışı ya da kar elde etme çalışmasıdır(Türkay, 2011). Optimizasyon, karar verme süresini kısaltmakta ve karşılaşılan problemlerin doğru kararlar ile çözümünde rol oynamaktadır (Türkay, 2011; Winston, 2003). Optimizasyon çalışmaları hayatın her aşamasında kişisel olarak yapılabileceği gibi sanayide ve üretimin olduğu her işletmede de yapılması gereken en önemli verimlilik ve karlılık çalışmaları içindedir. Optimizasyonda iki ana yapı taşı, modelleme ve çözümlenme işlemleridir. Modelleme, gerçek yaşamda karşılaşılan problemin matematiksel olarak ifade edilmesi, çözümlenme ise bu modeli sağlayan en iyi çözümün elde edilmesini kapsar (Winston, 2003). Matematiksel modelleme ve simülasyon, çimento sektöründe öğütme devrelerinde kullanılan makinelerin tasarım ve işletme parametrelerini yüksek doğrulukla tespit eder. Simülasyon yöntemleri kullanılarak ortaya çıkarılan akım şemaları ile değişik besleme miktarlarında ve belli sabit işletme koşullarında boyut dağılımları ve özgül yüzey alanları (blaine) tahmin edilebilmektedir (Ergin ve Gür, 2001). Çimento sektöründe proses kontrolünün çok daha etkin olabilmesi için kalite kontrol ile birleştirilmesi gerekmektedir. Çimento kalitesinin en önemli göstergelerinden birinin çimento harcının 28 günlük basınç dayanımı olması, test sonuçlarının alınması için bir aya ihtiyaç olduğunu gösterir ve bu yüzden bu parametre üretim sırasında işe yarar bir kontrol mekanizması olarak kullanılamaz(Nakamura & Aizawa ve diğ., 1986). Dayanım değerleri, anlık çalışmalar yerine uzun süreli yapılan optimizasyon çalışmalarında karar vermede esas rol oynamaktadır. Yaptığımız optimizasyon çalışması altı aylık bir dönemi içerdiğinden karar verme aşamasında dayanım değerleri belirleyici parametrelerden biri olmuştur.

Çimento fabrikalarının neden oldukları atıklar nedeniyle yapılacak olan en küçük iyileştirme, doğal yaşamın ve sosyal hayatın sürdürülebilirliği açısından çok önemlidir. Çimento üretim süreçleri sırasında SO_x (kükürt oksit), NO_x (azot oksit) gibi kirletici gaz emisyonları atmosfere salınır. Bu gaz emisyonları doğal yaşamı olumsuz etkiler. Günümüzde gerçekleştirilen yeniliklerin çevre-dostu yenilikler olması mavi gezegenin devamlılığı için oldukça önem arz etmektedir. Bu bağlamda düşündüğümüz zaman, üretim yapan endüstriyel tesislerde yapılacak pozitif değişimler sadece girdi maliyetlerinin düşürülmesi olarak ele alınmamalıdır. Hem çevresel olarak hem de canlı hayatının devamlılığı açısından ele alınmalı ve bu parametreler dikkate alınarak değerlendirilmeleri yapılmalıdır. Sürdürülebilir ekoloji için, dünya nüfusundaki artış devamlılığı ve buna bağlı olarak modern dünyanın ihtiyaçları karşılanması için sürekli üretim ve tüketim çılgınlığının önüne geçilememesi, üretim sistemlerinde yapılacak ufak iyileştirmeleri de önemli kılmaktadır. Son zamanlarda

sürdürülebilir hayatın devamlılığı için ulusal ve global ölçekte üretim yapan tesislerin üretim süreci boyunca neden oldukları karbon ayak izi (KAİ), toprak ayak izi ve su ayak izi parametrelerinin belirlenmesi çok önem kazanmıştır.

Sunulan bu yüksek lisans tezinde optimizasyon çalışması üç aşamada planlanmıştır. İlk aşamada, kapasitesinin çok altında çalışmakta olan çimento değirmenlerinin mevcut çalışma şartları ile elde edilen blaine (özgül yüzey), incelik, kimyasal analiz ve saatlik üretim değerleri incelenmiştir. Değirmenin çeşitli noktalarından numuneler alınarak laboratuvarında 45, 90 mikron incelik ve blaine değerleri tespit edilmiş, seperatör verimliliği hesaplanmıştır. İkinci aşamada, değirmen çalışma şartları değiştirilerek (değirmen giriş çıkış emişleri, seperatör temiz hava klape açıklıkları, filtre giriş sıcaklıkları, vb. gibi) saatlik üretim değerlerinin nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Üçüncü aşamada ise değiştirilen parametrelerle yaklaşık 3 ay boyunca çimento üretimi gerçekleştirilerek belli zaman aralıklarıyla değirmenlerin farklı noktalarından numuneler alınarak, özgül yüzey, incelik, kimyasal analiz ve saatlik üretim değerleri elde edilmiştir. 1. ve 3. aşamadaki sonuçlar karşılaştırılarak, değirmen üretim, enerji tüketim verileri tespit edilmiştir. Her iki aşamada elde alınan numunelerin dayanım, özgül yüzey, incelik ve kimyasal içerikleri, XRD, CNH-S, SEM/EDX, MAPPING, FT-IR ve partikül sizer analiz yöntemleriyle incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar hem enerji maliyeti, hem de ürün kalitesi bakımından önemli iyileştirmeler olduğunu göstermiştir.

Çimento fabrikalarında, enerji yoğun ünitelerden biri olan çimento değirmenleri için daha az maliyetli ürün üretme amaçlı kapasite artışı ya da enerjinin daha verimli kullanılması çalışmaları her zaman yapılması gereken bir ihtiyaçtır. Bu iyileştirme çalışmaları yaygın olarak, değirmen bilya şarjının yenilenmesi, değirmen plakalarının değiştirilmesi, eski tip seperatörlerin son çıkan jenerasyonlar ile yenilenmesi, değirmen öncesine ön öğütücü roller sistemleri kurulması gibi yüksek maliyetli ve zaman alıcı yatırımlar ile yapılmaktadır. Bu iyileştirme çalışmalarında üretime ara vermek gerekmektedir. Gerçekleştirilen bu tezin en önemli noktalarından biri, bilyeli değirmenlerin duruşa alınıp (değirmenlerin çalışmasının durdurulması) revizyona sokma işlemi olmadan, kalitenin sabit tutularak, üretim miktarının artırılması ve enerjinin daha verimli kullanılmasının başarılmasıdır. Bununla beraber tesisin durdurulması sonucu meydana gelebilecek ekonomik çıktılarının minimuma indirilmesi hedeflenmiştir. Bu kayıplar başlıca, müşteri kaybı ve personel maliyeti olarak sıralanabilir. Ayrıca yapılan bu çalışmanın çevresel, ekonomik ve yaşam alanlarına pozitif etkisinin yanında sosyal yaşamın sağlıklı sürdürülebilirliğe katkısı değerlendirilmiştir. Bu incelemelere ek olarak

Çimento üretiminin parçası olan bilyeli değirmenlerin ve üretim artışına bağlı olarak sevkiyatta kullanılan araçların karbon ayak izi değerleri belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR VE KURAMSAL TEMELLER

Doğal ve yapay malzemeler farklı oranlarda gözenekli yapıya sahiptirler. Gözeneklilik malzeme bünyesindeki toplam boşluk hacminin malzemenin toplam hacmiyle ilişkilendirilerek hesaplanır. Gözeneklilik, malzemelerin yüzey alanları, dayanımı, tanecik boyutlarında önemli etkiye sahiptir(Şimşek, 2008; Şimşek ve Murtezaoğlu, 2023). Bu yapay malzemelerden biriside çimentodur. Bu bağlamda 1824 yılında Aspdin tarafından keşfedilen ve inşaat sektöründe yoğun olarak kullanılan çimentoların kimyasal içerikleri yanında fiziksel özellikleri de önemlidir.

Suyla birleştiğinde hidrasyon reaksiyonlarının meydana gelmesiyle sertleşen ve bu sertliğini de uzun yıllar koruyan inorganik bir malzeme (Gülşen, 2016) olan çimento, antik mısır zamanlarından itibaren binlerce yıldır kullanıldığı halde ilk olarak bir duvar ustası olan Joseph Aspdin tarafından 1824'te patenti alınarak portland çimentosu adı ile kullanılmaya başlanmıştır. Aspdin, Manş denizinde yarımada olan Portland adasında çıkarılan doğal kireçtaşının rengine benzediği için çimentoya bu adı vermiştir. Portland çimentosu, katkı maddesi olarak kalsiyum silikatlar, kalsiyum alüminatlar ve kalsiyum sülfat içeren klinkerin alçı taşı katılarak (Çimento Üretimi Sektörel Uygulama Kılavuzu. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sanayiden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Belirlenmesi ve Azaltılmasına Yönelik Uygulamanın Kolaylaştırılmasının Sağlanması Projesi) öğütülmesiyle üretilen hidrolik çimentodur (Avşar, 2006). Ana hammaddesi kalkerin hemen hemen her bölgede bulunması ve düşük maliyeti sayesinde portland çimentosu oldukça yaygın kullanılan bir malzeme haline gelmiştir (Çimento Üretimi Sektörel Uygulama Kılavuzu). Çimento üretimi için iki ana malzeme bulunmaktadır. Bunlar, yarı mamül klinker ve alçı taşıdır. Bunların dışında katkı olarak tras, kalker, cüruf, uçucu kül gibi mineraller de çimento tipine göre öğütme sırasında ilave edilebilmektedir. Dayanım sınıfına, kullanılacağı yerin fiziksel şartlarına, son kullanıcının ihtiyaçlarına göre farklı tiplerde çimentolar üretilebilmektedir (Avşar, 2006). İlave katkı katılarak öğütülen ve "katkılı çimento" olarak isimlendirilen çimentolar, katkı cinsi ve miktarına göre portland kompoze çimento, puzolanik çimento, kompozit çimento, yüksek fırın cürufllu çimento vb. adlarla isimlendirilir (Çimento Üretimi Sektörel Uygulama Kılavuzu).

Enerji tüketim değerleri, işletmenin performansında önemli bir parametre ve optimizasyon değerlendirmede kritik bir faktördür. Proseste değişken olup dar boğazlara yol açan faktörlerin etkin şekilde incelenmesi gerekir. Bir çimento fabrikasında bazı önemli proses değişkenleri ve kalite parametreleri anlık ölçülemeyebilir. Sonuçların ortaya çıkması uzun

zaman alabilir. Bu nedenle iyi oluşturulmuş bir varsayım sistemi kurulmalıdır. Bu sistem, spesifik enerji tüketimi ve proses değişkenliğinin büyük ölçüde azaltılmasını sağlar (Sahasrabudhe & Sistu ve diğerleri, 2006).

Çimento üretiminde yüksek enerjiye ihtiyaç vardır. Özellikle enerji tüketimi fırın kısmında gerçekleşir. Enerji kaynağını yakıt ve elektrik oluşturur. Hammadde kırıcılarında, farin değirmeninde, fırında, soğutmada ve çimento değirmenlerinde tüketilen elektriğin % 80'den fazlası kullanılır. Bir ton çimentonun üretim maliyetinin yarısını kullanılan yakıt ve elektrik oluşturur. Yani kullanılan elektrik enerjisi toplam enerji ihtiyacının yaklaşık %20'sine karşılık gelir(Cembureau raporu, 1997). Bu oran son yıllarda çok daha yukarılara çıkmıştır.

2.1. Çimento Üretim Prosesi

Kalker ve kil karışımının oldukça yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ve alçı taşı (kalsiyum sülfat) ilavesi ile öğütülmesi sonucu gri renkli toz formda çimento elde edilir. 1 ton portland çimento üretmek için yaklaşık 1.6 ton ham madde ısıl işleme sokulmakta, ısıl işlem sonrası 950 kg klinker elde edilmektedir. 950 kg klinker öğütülürken ortama 50 kg alçı taşı ve bir miktar da katkı maddesi eklenmektedir (Gülşen, 2016).Türkiye'de bölgesel olarak klinker ve çimento üretim kapasiteleri Çizelge 2.1 de görülmektedir.

Çizelge 2.1. Türkiye'de bölgesel bazda çimento ve klinker üretim kapasiteleri

Bölge (ton/2019 yılı)	Klinker	Çimento
Marmara	20.459.020	29.367.736
Ege	9.576.600	14.333.611
Akdeniz	23.935.230	34.124.430
Karadeniz	8.855.550	18.131.912
İç Anadolu	14.917.650	23.255.300
Doğu Anadolu	7.645.440	13.297.963
Güney Doğu Anadolu	6.270.530	11.241.408
Toplam	91.660.020	143.752.359

Kaynak: (<https://www.tcma.org.tr/tr/istatistikler/kapasite>)

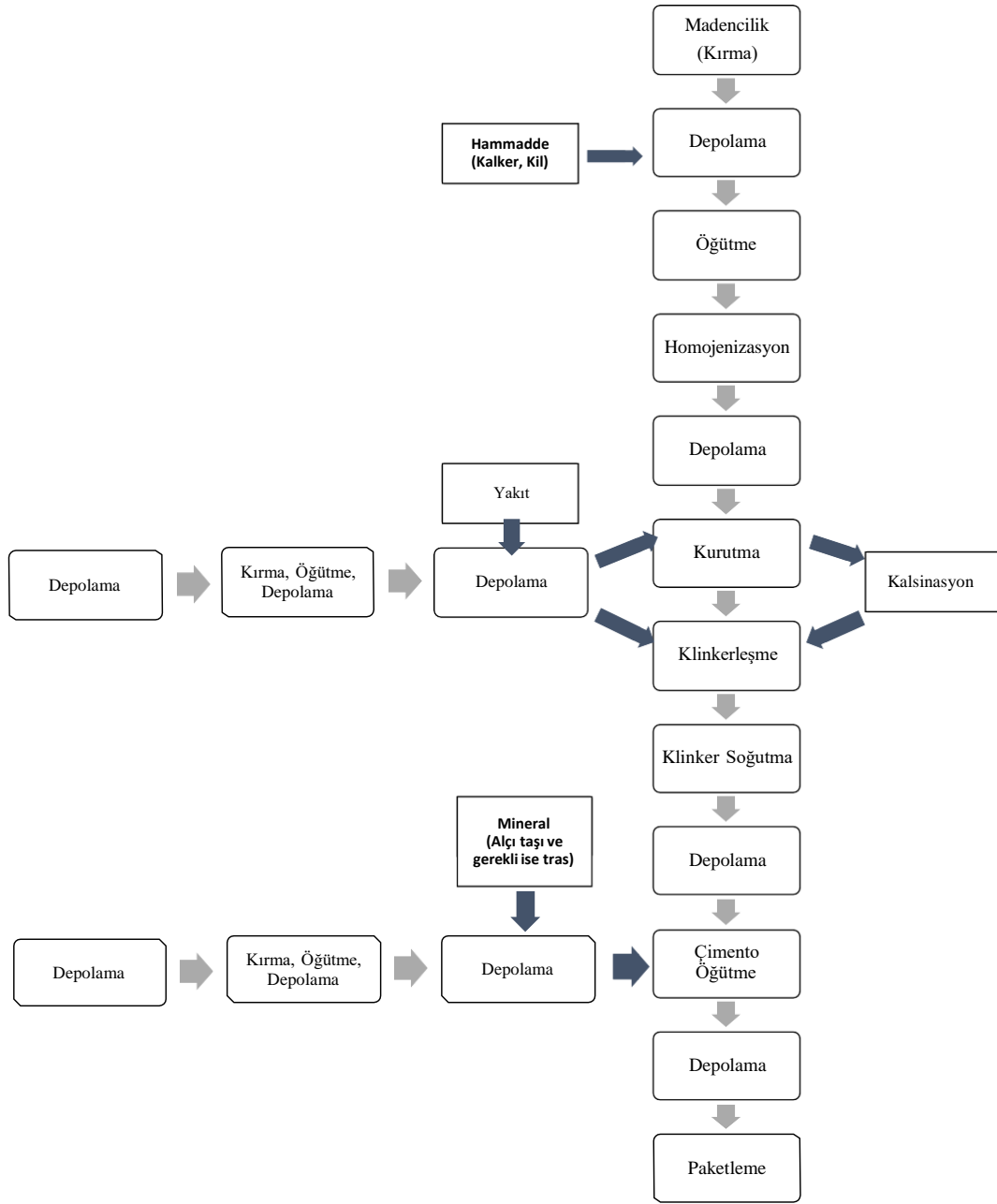
Çimento üretim aşamaları;

- a- Taş ocağı
- b- Ham madde hazırlama
- c- Yakıt hazırlama
- d- Klinker üretimi
- e- Mineral ekleme
- f- Çimento öğütme
- g- Paketleme ve sevkiyat

başlıkları altında gruplandırılabilir. Çimento üretim iş akım şeması Şekil 2.1.'de gösterilmektedir (Çimento Üretimi Sektörel Uygulama Kılavuzu). Çimento üretim tesisleri, entegre ya da klinker öğütme tesisi olarak ikiye ayrılır. Entegre tesislerde kalker, kil, marn gibi hammadde ocaklarından temin edilen hammaddelerin kırıcılarda ufaltılarak öğütülmesi ve pişirilerek klinker ara ürünü elde edilmesi aşamaları ile klinker öğütme ve çimento eldesi aşamalarının tümü yer almaktadır. Öğütme tesislerinde ise klinker ara ürünü hazır alınarak kalker, alçı taşı ve tras gibi katkılarla beraber öğütülmesi ile çimento elde edilir (Çimento Üretimi Sektörel Uygulama Kılavuzu).

2.1.1. Taş ocağı

Çimento üretim prosesinin ilk basamağı, hammaddenin ocaktan çıkarılmasıdır. Çimento üretiminde en çok kullanılan kalker, kil, marn gibi hammadde ocakları genellikle entegre çimento fabrikalarının yakınlarında yer alır ve fabrikanın ruhsatlı sahalarıdır. Ocaktan hammadde çıkarma işlemleri delme, patlatma ve kazı yöntemleri ile yapılmaktadır. Açık maden ocaklarında maden yatağı basamaklar haline getirilerek kazılır ve kamyonlara yükleme yapılır. Kalker (kireç taşı), gerekli kalsiyum oksiti sağlarken, kil gibi hammaddeler de silis, alüminyum, demir oksitleri sağlarlar. Silisyum oksit ve demir oksit yüzdesini yükseltmek için demir cürufu, grid ya da demir cevheri gibi ilave hammaddelerin de kullanılması gerekir (Çimento Üretimi Sektörel Uygulama Kılavuzu).

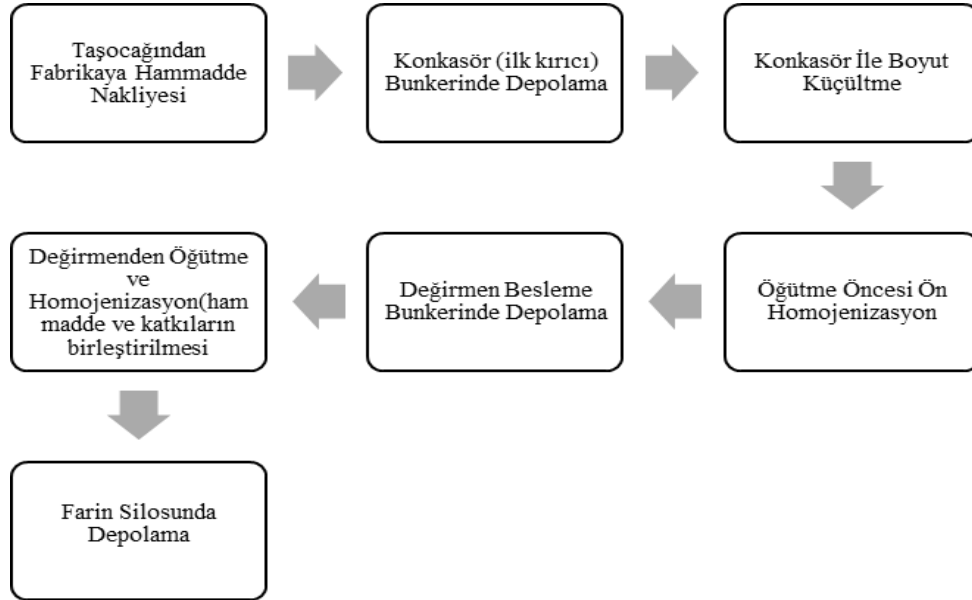


Şekil 2.1. Çimento üretimi akış şeması
Kaynak: (Çimento Üretimi Sektörel Uygulama Kılavuzu)

2.1.2. Hammadde Hazırlama

Çimento üretimi için gereken yarı mamül klinker üretiminde kullanılan ana hammaddeler kalker, kil ve marndır. Ayrıca demir cevheri, boksit, silis kumu gibi yan hammaddeler de klinker üretmek için kullanılan hammaddelerdendir. Hammadde hazırlamada temel amaç, kimyasal ve mineralojik açıdan homojen bir karışım elde etmektir (Çolak, 2018; Labahn, 1971). Ocaklardan kamyonlara yüklenen hammaddeler fabrika sahasında ilk olarak

kırıcı (konkasör) ünitesine getirilir ve büyük parçaların boyut küçültme işlemi burada gerçekleştirilir. Şekil 2.2.'de de görüldüğü gibi, boyutu küçültülen hammaddeler ön homojene alanına alınarak stoklanır. Daha sonra stok alanından öğütülmek üzere ayrı bunkerlere alınır ve farin değirmenine reçete oranlarına göre besleme yapılır. Farin oluşmasında silisyum dioksit kaynağı kil ve marn, kalsiyum oksit kaynağı ise kalkerdir.



Şekil 2.2. Hammadde hazırlama iş akım şeması
Kaynak : (Çimento Üretimi Sektörel Uygulama Kılavuzu)

2.1.3. Yakıt Hazırlama

Çimento üretim prosesinde entegre fabrikalar için en önemli üretim maliyetlerinden biri de yakıt giderleridir. Yakıt enerjisi maliyetleri üretim maliyetinin yaklaşık %30-40'ını oluşturmaktadır(Çimento Üretimi Sektörel Uygulama Kılavuzu). Kömür kullanılan işletmelerde kömürün değirmene verilmeden önce ön homojene edilmesi ve kalori değerlerine göre gruplandırılarak homojen bir besleme yapılması gerekmektedir. Kömür değirmenine taşıyıcı bantlarla gönderilen kömür, toz hale geldikten sonra kömür silosuna aktarılır ve oradan da fırına beslenir. Kömür yanında alternatif yakıt olarak lastik parçaları, atık yağlar, atıklardan türetilmiş yakıtlar gibi malzemeler de tasarruf sağlama amaçlı kullanılabilen malzemelerdir.

2.1.4. Klinker Üretimi

Klinker üretmek için dört ana oksite ihtiyaç vardır. Bunlar klinker içinde birleşmiş özgün kristaller olarak bulunurlar (Kuleli, 2009).

Çizelge 2.2. Klinker içindeki temel oksit formları

Ana oksit yapısı	Kimyasal formülü	Çimentoda kullanılan simgesi
Kalsiyum Oksit	CaO	C
Silisyum Oksit	SiO ₂	S
Alüminyum Oksit	Al ₂ O ₃	A
Demir Oksit	Fe ₂ O ₃	F

Kaynak : (Kuleli, 2009)

Çizelge 2.2' de klinker yapısındaki temel oksit formları verilmiştir. Gereken temel oksitlerin en çok ihtiyaç duyulan elementi kalsiyumdur. Kimyasal simgesi Ca, oksit formu ise CaO' dur. Fırın reaksiyonlarında simgesel olarak C harfi ile gösterilir. Klinkerin yaklaşık %65 i CaO' dur. Ana tedarik kaynağı kireç taşıdır (kalker). İkinci önemli element silisyum olup kimyasal simgesi Si, oksit formu SiO₂ 'dir. Simgesel olarak S harfi ile gösterilir. Klinkerin yaklaşık %23 'ü SiO₂dir. Ana tedarik kaynağı kil, kumdur. Üçüncü önemli element alüminyumdur. Kimyasal formülü Al, oksit formu Al₂O₃ 'dür. Simgesel olarak A ile gösterilir. Klinkerin yaklaşık %5' i Al₂O₃' dür. Ana tedarik kaynağı kum, boksit ve kildir. Dördüncü gerekli element demirdir. Kimyasal simgesi Fe, oksit formu Fe₂O₃' dür. Simgesel olarak F harfi ile gösterilir. Klinkerde yaklaşık %4 oranında bulunmaktadır. Hematit, limonit gibi cevherler ana kaynaklarıdır. Bu dört ana oksit yanında daha az veya eser miktarda MgO, K₂O, Na₂O, SO₃ gibi oksitler de hammaddelerin bünyesinde bulunan diğer bileşiklerdendir(Kuleli, 2009). Farin üretiminden sonra fırına farin beslenmesi aşaması gelmektedir. Bu aşamada farin ilk olarak ön ısıtıcı siklonlarına gönderilip 1000 °C'ye kadar ısıtılmaktadır. Daha sonra kısmen kalsine olmuş olan farin döner fırına girmektedir (Çimento Üretimi Sektörel Uygulama Kılavuzu). Ön ısıtıcı ünitesi siklonlarında yakma prosesi ile hammaddenin yaklaşık %50 si kalsine olmaktadır. Bu yakma ile fırındaki ısı yükün bir kısmı azalmış olmakta ve refrakter ömrü de uzamaktadır. Ayrıca fırın kapasitesi de artmış olmaktadır. Yakma kanalındaki yanma işlemi için kanala harici oksijen verilmektedir. Bu bölgede ATY, atık ve lastik yakma imkanları mevcuttur. Kalsinatör sistemli proseslerde klinker soğutma ünitesinden ön ısıtıcıya tersiyer ısı hattı çekilir ve böylece yakıtın yaklaşık yarısı fırında diğer yarısı da kalsinatörde bulunan yakma ünitesinde yakılır. Bu sayede hammaddenin %95 CO₂'i uzaklaştırılarak kalsine edilmiş olur (Yıldız, 2015). Ön ısıtma sonunda kalan CO₂'nin geri kalanı farinden uzaklaşır ve bir dizi kimyasal reaksiyon gerçekleşir. Döner fırın içinde oluşan sıcaklık basamakları ve bu sıcaklıklarda oluşan reaksiyonlar Çizelge 2.3'te, bu reaksiyonlar sırasında oluşan klinker fazları Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Klinker oluşum prosesi

Sıcaklık °C	Proses	Kimyasal Değişim
200	Serbest suyun buharlaşması	
100 – 400	Absorbe edilmiş suyun buharlaşması	
400 – 750	Kil minerallerinin bozunması, Metakaolinit oluşumu	$Al_4[(OH)_8Si_4O_{10}] \rightarrow 2(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) + 4H_2O$
600 – 900	Metakaolinit ve diğer bileşenlerin bozunması ve reaktif oksitlerin karışımının oluşması	$Al_2O_3 \cdot SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2SiO_2$
600 – 1000	Kireçtaşının bozunması C ₂ ve CA oluşumu	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ $3CaO + 2SiO_2 + Al_2O_3 \rightarrow 2(CaO \cdot SiO_2) + CaO \cdot Al_2O_3$
800 – 1300	CS ve CA tarafından kireç absorpsiyonu C ₄ AF oluşumu	$CS + C \rightarrow C_2S$ $2C + S \rightarrow C_2S$ $CA + 2C \rightarrow C_3A$ $CA + 3C + F \rightarrow C_4AF$
1250 – 1450	C ₂ S tarafından daha fazla kireç absorpsiyonu	$C_2S + C \rightarrow C_3S$

Kaynak: (Çimento Üretimi Sektörel Uygulama Kılavuzu)**Çizelge 2.4.** Klinker fazları

Tri-Calcium silicate	3 CaO.SiO ₂ (C ₃ S)	Alite
Di-Calcium silicate	2 CaO.SiO ₂ (C ₂ S)	Belite
Tri-Calcium aluminate	3 CaO.Al ₂ O ₃ (C ₃ A)	Aluminate
Tetra-Calcium alumina ferrite	4 CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ (C ₄ AF)	Brownmillerite

Kaynak : (Avşar, 2006)

Klinkerin kalitesine, kireç doygunluk faktörü LSF (2.1), silikat modülü SIM (2.2), alüminat modülü ALM (2.3) değerleri ile yön verilir(Li ve diğerleri, 2012). Fırında pişme reaksiyonları sırasında oksit formdaki bileşiklerin hangi oranlarda birleşeceğini bu modüller belirler.

$$LSF = \frac{100 \times CaO}{2,8 \times SiO_2 + 1,18 \times Al_2O_3 + 0,65 Fe_2O_3} \quad (2.1)$$

$$SIM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2.2)$$

$$ALM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (2.3)$$

Ham karışımdaki yüksek kireç oranı klinker minerallerinin oluşması için şarttır. Kirecin diğer oksitlerle yeterince birleşemeyip bir miktarının serbest kalsiyum oksit formunda kalması kirecin doymadığı anlamına gelir ve serbest kireç olarak tanımlanır. Serbest kirecin % 2,5 üzeri olması harç ve çimentoda genleşme, çatlama gibi olumsuz etkilere yol açar. Klinker için genel kabul görmüş LSF değeri > 97,0 dir. Erken dayanımı yüksek istenen çimentolarda klinker kireç doygunluk faktörü (LSF) değerleri 97,0 – 99,0 arası çalışılmalıdır. Daha yüksek LSF değerleri fırında pişmeyi zorlaştırır. Silis modülü (SIM), fırında pişme sırasında oluşan katı/sıvı oranını gösterir. Klinkerleşmenin gerçekleştiği sıcaklıklarda silisyumun çoğu katı formdadır. Alüminyum ve demir oksitler ise eriyik haldedirler. İşletmeler için uygun SIM değeri 2,30 – 2,80 arasındadır. SIM değeri arttıkça pişmede zorluklar yaşanmaya başlar. Klinkerleşme sıcaklığında eriyik halde bulunan alüminyum ve demirin birbirine oranı alüminyum modülünü (ALM) belirler. Yüksek ALM, eriyik kıvamının arttığını, düşük ALM ise eriyiğin kıvamının azaldığını gösterir. İşletmeler ALM değerini 1,30-1,50 aralığında tutmaktadırlar (Kuleli, 2009).

LSF, SIM ve ALM değerleri proses şartlarında çok stabil gitmeyebilir (Li ve diğerleri, 2012). Bunun birden çok nedeni olmakla beraber en önemlisi hammaddenin ocaktan yüklenirken farklı damarlara denk gelmesi ve kimyasal analizinin de birden bire değişmesidir. Bir diğer önemli faktör, hazırlanan premix kompozisyonundaki yüzdesel oranların değiştirilmesi ve yeni oranlarla hazırlanmış farin yığınının geçişte bu modüllerin direkt etkilenmesidir. Bu etkileşimleri en aza indirmek ve fırın proses şartlarını optimum şekilde sabit tutmak amacıyla çoğu işletmede taşıyıcı bant üzerinden iki dakikada bir kimyasal analiz yapabilen ve bu analiz sonucuna göre farin değirmeni besleme kantarlarına komut verebilen online analizör cihazları kullanılmaktadır. Çevrenin korunması amacıyla doğal kaynakların tüketimini azaltmak ve fabrikalardan çıkan atık olarak nitelendirilen malzemelerin çimento sektöründe farin içinde alternatif hammadde olarak kullanımının artmasıyla farin analizlerinde daha fazla sapma olması beklenecek ve bunu en aza indirmesi beklenen online analizör cihazları da çok daha fazla ihtiyaç duyulur hale gelecektir.

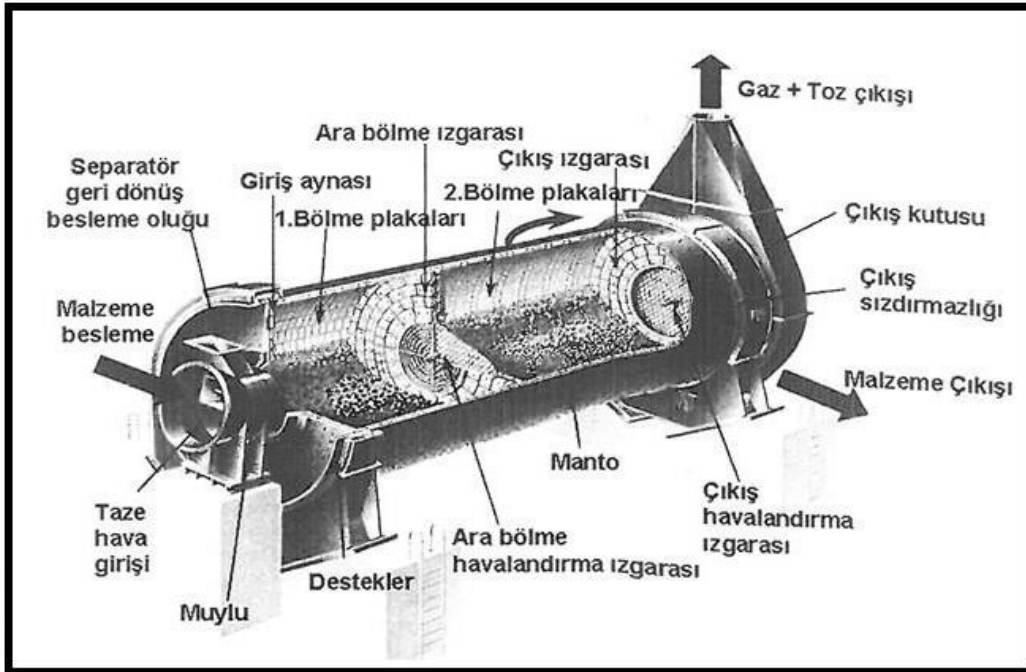
2.1.5. Mineral Ekleme

Klinkere, öğütülmesi sırasında farklı mineral katkıları eklenmektedir. Mineral katkı miktarına ve çeşidine göre elde edilen çimento tipleri de farklı özellikte ve farklı standartlarda olmaktadır. Klinkere ilave edilen mineral katkıları tras, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik malzemeler ve kalkerdir. Priz (sertleşme) düzenleyici olarak kullanılan alçı taşı da yaklaşık %5 civarında tüm çimento tiplerine katılmaktadır. Günümüzde portland çimentosu en

yaygın olarak kullanılan çimento tipi olmasına rağmen ileriki yıllarda katkılı çimentoların üretiminin de kullanıma bağlı olarak artmaya devam edeceği tahmin edilmektedir (Şengül ve diğ., 2007). Katkılı çimento üretim oranının artırılması ile fabrikaların karşı karşıya kalacakları karbon ayak izi değerinde de azalma sağlanmış olacaktır.

2.1.6. Çimento Öğütme

Öğütme, çimento üretiminde kullanılan pahalı bir yöntemdir. Öğütme sonunda çıkan ürünün tane boylarının ürün kalitesi bakımından dar bir aralıkta olması istenir (Kuleli, 2009). Çimentoda son öğütme işlemlerinin çoğu verimlilik ve kalite nedenleriyle (Tsatmatsoulis, 2014) bilyalı değirmenlerde, separatörlü kapalı devrede yapılır (Van Breusegem ve diğ., 1996). Örnek bir bilyalı çimento değirmeni Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3. Bilyalı çimento değirmeni

Kaynak: (Kuleli, 2009)

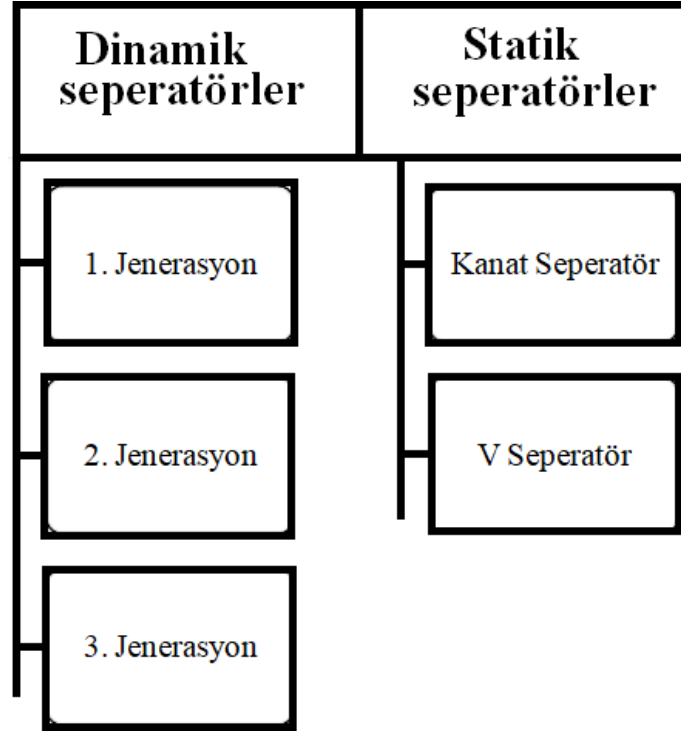
Çimento değirmenleri, birbirine bağlı işleme ve tahrik operasyonlarına sahip (Subbaraj ve Anand, 2010; Jadot ve diğerleri, 1998), girdisi klinker, alçı taşı ve yardımcı hammadde olan ve istenilen incelikte çimento üreten endüstriyel bir sistemdir (Subbaraj ve Anand, 2010; Dağcı ve diğerleri, 2001). Değirmenler çoğunlukla, kurutma bölmesi, ön öğütme bölmesi ve son öğütme bölmesi olmak üzere üç bölmeden oluşur. Bir değirmenin kritik hızı, merkezkaç gücünün, öğütme bilyelerini etkileyen yerçekimi kuvvetini nötralize ettiği dönme hızıdır. Değirmenin dönme hızı, sahip olduğu bilya yüküne göre 14 ile 15 rpm arasında değişir. Kurutma bölmesi ayrı olan değirmenlerde, klinker, alçı taşı ve kalkerli besleme ile geri dönüş beslemesi sıcak gaz yardımıyla kurutulur. Aynı anda çelik barlar ile beslenen malzemenin homojen şekilde karışması sağlanır. Ön öğütme bölümünde 70, 80 ve 90 mm yarıçaplı döküm bilyeler bulunmaktadır. Optimizasyon çalışmasının yapıldığı değirmenler çift kamaralı ön kurutmasız sisteme sahiptir. Bu sistemlerde ön kurutma olmadığı için beslenen malzemenin rutubeti önem kazanmaktadır. Aşırı rutubetli hammadde, değirmende öğünme zorluğu, yapışmalar ve tıkanmalara sebebiyet vermektedir. Değirmenlerde, homojen öğütme sağlamak için iç kabuk üzerine takılmış kabuk gömlekleri vardır. Bu gömlekler, farklı boyuttaki bilyelerin kamaranın sonuna kadar ilerlemesini ve birbirine karışmasını engeller. Büyük boyutlu partiküllerin bir sonraki bölmeye geçmesini önlemek için çift cidarlı bir elek diyaframı mevcuttur. Daha ince parçacıklar, yarıkları olan elek diyaframından son öğütme kamarasına geçerler. Değirmenin son bölümünde 30, 40, 50 ve 60 mm yarıçaplı daha küçük bilyeler bulunur. Bilyeler arasındaki küçük boşluklar, karışık malzemenin etkili bir şekilde öğütülmesini sağlar. Ön öğütme bölümünde olduğu gibi, homojen karıştırma ve farklı boyuttaki bilyelerin belirli bir şekilde yerleştirilmesi için bu bölmede de iç kabuk üzerine monteli gömlekler vardır. Ön öğütme bölümünden farklı olarak etkili öğütme için bu bölmede tek cidarlı bir elek diyaframı vardır. Yuvalardan geçen daha ince parçacıklar, kovalı elevatör yardımıyla separatöre gönderilir (Avşar, 2006).

2.1.6.1. Seperasyon İşlemi ve Seperatör Tipleri

Seperasyon, malzeme akışının mekanik seperatör ile hava kullanılarak ikiye bölünmesidir. Malzeme, seperatöre hava ile verilir ve ayırma haznesinde dağıtım plakası tarafından homojen şekilde dağıtılır. Hava akımına karışan ince partiküller, hava contaları ile donatılmış siklonlara katılır. Tozsuz hava, üfleyciye geri döner ve ayarlanabilir kılavuz kanat halkaları vasıtasıyla seperatöre tekrar girer. Gelen hava, iri tanecikler arasından aşağı doğru akarken, ikincil bir ayırma etkisi meydana getirir. Havalı seperatörlerin en önemli görevi, değirmen ürününü kaba ve ince kısımlara ayırarak değirmende aşırı öğütmeyi azaltmaktır.

Başka bir ifade ile ince tanelerin oluşması sonrası ortamdan hemen alınması ve kaba tanelerin tekrar öğütülmesi amacıyla geri gönderilmesi ile daha uygun parçacık boyut dağılımına sahip ürün üretmek için kullanılır. Tek çeşit bir separator sistemi, hava ayırmanın uygulanacağı işlemlerde farklı ihtiyaçları karşılayamayabilir. Bu bağlamda, özel endüstriyel gereksinimleri karşılamak için bir dizi farklı tipte seperatör geliştirilmiştir (<https://slideplayer.com/slide/12697794/>). Son ürünün inceliği, plakaların dönüş hızlarının değiştirilmesiyle tercihe göre dar ya da geniş bir aralıkta düzenlenmiş olur (Avşar, 2006). İncelik, sadece değirmen beslemesinin bileşimine değil, aynı zamanda seperatörün dönüş hızına ve hava akış hızına da bağlıdır. Bu nedenle, seperatörün dönüş hızını kontrol ederek inceliğin istenen değere mümkün olduğunca yakın tutulması amaçlanmaktadır (Subbaraj ve Anand, 2010; Ramezani ve Ramezani, 2007). Bu yöntem, çimento, kömür, seramik, kağıt hamuru ve kağıt, gübre ve eczacılık gibi birçok endüstride yaygın bir kullanıma sahiptir.

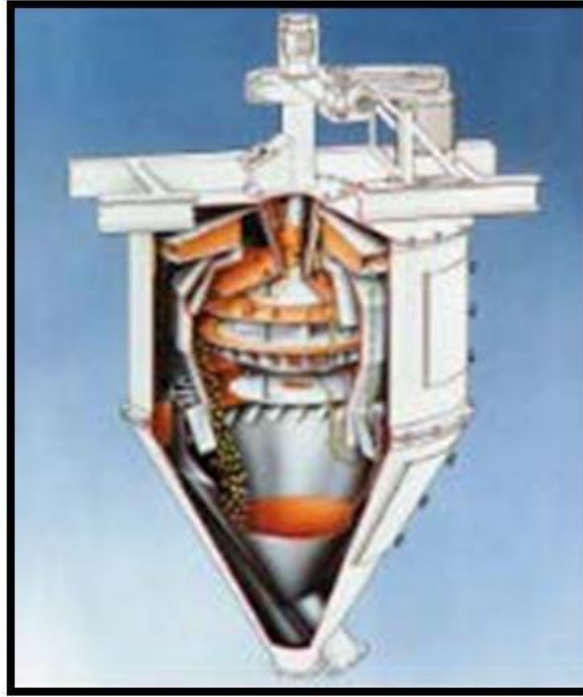
Seperatörler, Şekil 2.4.'de görüldüğü gibi statik seperatör ve dinamik seperatörler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.



Şekil 2.4. Seperatör tipleri
Kaynak: (<https://slideplayer.com/slide/12697794/>)

2.1.6.1.1. Statik seperatörler

Statik havalı seperatörler, geniş aralıkta tane boyutlarıyla çalışılabilen, büyük boyutlu tane kaçaklarının fazla önemli olmadığı, yaklaşık 20 yıl öncesine kadar kuru öğütme sistemlerinin en çok kullanılan sınıflandırıcısı durumundaydılar. Günümüzde özellikle d_{97} 45–250 μm tane boyut aralığında ürün elde edilmesine karşın, yerlerini fan-filtre destekli dinamik havalı seperatörlere bırakmışlardır. Statik havalı seperatörler özellikle kalsit, talk, kaolin, barit vb. dolgu maddeleri üreten yeni mikronize öğütme tesislerinde neredeyse tümüyle ortadan kalkmıştır. Değirmen çıkışı malzeme, seperatörün içinde üstte bulunan dağıtım plakası üzerine beslenir. Buradan bir altta bulunan döner plakanın üzerine dökülen malzeme, iri tanelerin merkezkaç kuvvetinin etkisiyle dış kısımda kalır ve yerçekimiyle aşağı dökülüp geri beslemeye verilir veya ayrılır. İnce olanlar ise dönen plakaların etkisiyle oluşan hava sirkülasyonuna kapılarak yukarı taşınır ve ince tane konisinde birikerek son ürün olarak dışarı alınır (Toraman ve Sönmez, 2012). Şekil 2.5.'de statik havalı seperatör kesiti görülmektedir.



Şekil 2.5. Statik havalı seperatör kesiti görünümü
Kaynak: (Toraman ve Sönmez 2012; Anon 2010)

Statik havalı sınıflandırıcıların başlıca avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Kurulumları ve yapıları basittir.
- İlk yatırım maliyetleri oldukça düşüktür.
- Toplam enerji tüketimi dinamik seperatörlere göre 10-15 kat daha düşüktür.

- Basit yapılarından dolayı bakım ve işletme maliyetleri yok denecek kadar azdır.
- Montaj için gerekli yer ve yükseklik ihtiyacı azdır.
- Montaj ve demontajı kolay olduğundan tesis tasarımında ve operasyonda kolaylık sağlar.
- Tane boyut aralığı üretimi aksatmadan değiştirilebilir.
- Aşırı yükte tıkanma ve bozulma gibi bir sorunu yoktur.

Bunca avantajına rağmen aşağıdaki konularda yetersiz kalması sebebiyle statik seperatörlerin kullanımı önemli ölçüde sınırlanmıştır. Buna sebep olan dezavantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- 45 µm tane boyunun altında ayırma yapamamaktadır
- Ayrılan iri tanelerin içine fazla miktarda ince malzeme de kaçmaktadır. Bu da enerji maliyetini artırmakta ve gereksiz yere aşırı öğütülmüş malzeme çıkarılmış olmaktadır.
- Elde edilen ürünün tane boyutu çok geniş aralıkta olduğundan tane boyut dağılım eğrisi dik değildir.
- En önemli dezavantajı ise ince olarak ayrılan malzeme içinde iri boyutlu tanelerin de bulunmasıdır.

Statik havalı sınıflandırıcıların kullanıldığı liç öncesi kuru öğütme uygulamaları için bu dezavantajlar çok önemli yer kaplamazlar (Toraman ve Sönmez, 2012).

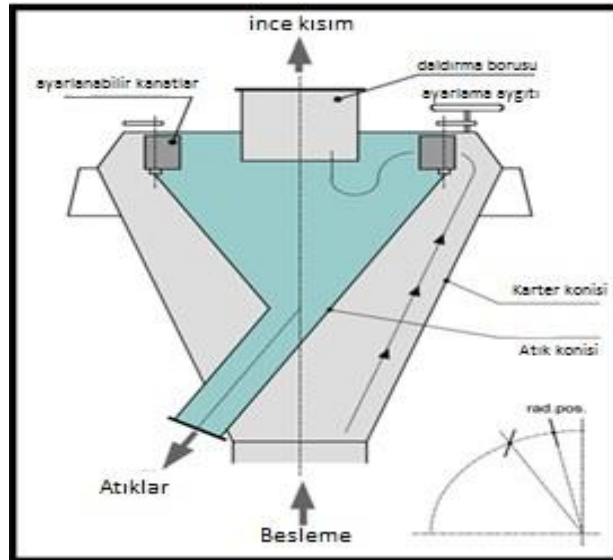
2.1.6.1.1.1. Kanat tipi seperatörler

Kanat tipi statik seperatörde hareketli parçalar yoktur. Ayırma işlemi, hava hızı ve yönündeki kanatlarla gerçekleşir. Partikülleri taşıyan hava akımı, dış koni boyunca yönlü bir akıştan, kılavuz kanatlar tarafından dönen bir akışa dönüştürülür. Parçacıklar merkezkaç kuvvetine maruz kalırlar. Kaba kısım, iç koninin dış duvarına doğru hareket eder ve geri dönüş akımına girmek için aşağı doğru sarmal yapar, ince kısımlar ise koninin merkezinde yukarı doğru spiral hareket ile taşınır. Ayırma etkisi hava hacmine, besleme hızına ve kanat açılarının ayarlanmasına bağlıdır. Hava hacmi arttıkça yani hava hızı arttıkça merkezkaç kuvveti artar ve ayırma daha verimli hale gelir. Ürün boyutu, kanatların açısı değiştirilerek kabaca ayarlanabilir. Kanatlar kapatılırken daha ince partiküller seçilecek ve ürün daha ince hale gelecektir. Kanatların kapanmasının sınırı, seperatörde tolere edilebilecek basınç düşüşü seviyesidir. Statik seperatörler daha çok değirmen havalandırma devrelerinde kullanılmaktadır. Taşınan partiküller, bitmiş ürüne eklenemeyecek kadar kaba olabilir. Bu seperatörler, yeniden öğütme

için değirmene geri dönen daha kaba fraksiyonu kaldırabilirken, daha ince fraksiyon bitmiş ürüne eklenir.

Toz yüklü hava, seperatöre alttan girer ve çok sayıda ayarlanabilir kanattan geçer. Kanatlar radyal olarak ayarlanırsa, iri parçacıklar, kanatlara ve daldırma tüpüne girerken akım çizgilerinin 90° sapmasını izleyemedikleri için yalnızca iç kuvvetlerin etkisiyle çöker. Kılavuz kanatlar radyal yöne açılı olarak ayarlanırsa, akışkanın girdap hareketi oluşur ve merkezkaç kuvvetleri nedeniyle ayrılma gerçekleşir. Açı arttırılırsa, teğetsel hız da artar ve kesim boyutu küçülür. Yaklaşık 60° 'lik açılarda parçacıklar bıçak uçlarına çarpmaya başlar ve sürtünme nedeniyle teğetsel hız artar, bu, yaklaşık 60° 'den daha büyük açılarda kesim boyutunun neden tekrar arttığını ve bu tip sınıflandırıcılarla genellikle yaklaşık 90° μm ile sınırlandırıldığını açıklar (<https://slideplayer.com/slide/12697794>).

Bu tip seperatörlerin, hava süpürmeli bilyalı değirmenlerde, dikey valsli değirmenlerde ve çekiçli kırıcılarda uygulama alanları mevcuttur (<https://slideplayer.com/slide/12697794>). Şekil 2.6.'da kanat tipi statik seperatör görülmektedir.

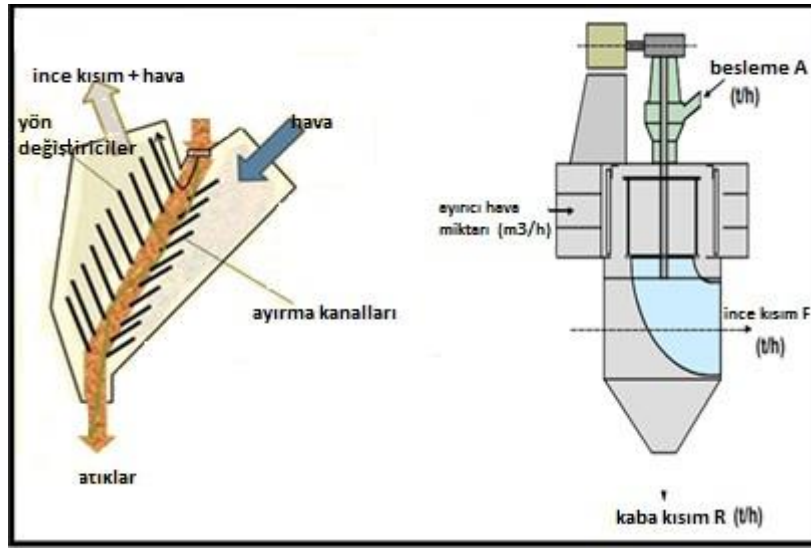


Şekil 2.6. Kanat tipi statik seperatör
Kaynak: (<https://slideplayer.com/slide/12697794>)

2.1.6.1.1.2. V tipi seperatörler

Bu seperatörler, yüksek basınçlı öğütme valsleri ile birlikte kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Öğütme valsleri tarafından üretilen kekin, kaba ve ince parçacıklara ayrılmadan önce dağılması sağlanmalıdır. V seperatörler, hem bu dağılmayı sağlayacak, hem de ince ve kaba parçacıkların ayrılmasına yarayacak şekilde tasarlanmıştır (<https://slideplayer.com/slide/12697794>). Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi besleme, yükselen hava

akışını karşılamak için bölmeler aracılığıyla aşağı doğru yönlendirilir. Zayıf kompaktlar, perdelerle çarpıştıkça kırılır, böylece ince ve kaba partiküller serbest kalır. İri partiküller hava akımı ile taşınmaz ve aşağı kayarak öğütme valslerine geri dönerler. İnce parçacıklar havada sürüklenir ve başka bir perde setinden yukarı doğru süpürülür. V-Separatör tozları normalde $1800 \text{ cm}^2/\text{g}$ civarında blaine yüzeylerine sahiptir ve bu önceden sınıflandırılmış malzeme, bilyalı değirmen ile kapalı devre yüksek verimli seperatöre girer. Ayırma boyutu, hava akış hızı değiştirilerek ayarlanır.



Şekil 2.7. V tipi statik seperatör

Kaynak: (<https://slideplayer.com/slide/12697794/>)

2.1.6.1.2. Dinamik seperatörler

19. yüzyılın ikinci yarısında portland çimento üretmek için tüp değirmenler geliştirildiğinde hava ayırma işlemi önemli hale geldi. Öğütme, ince parçacıkların değirmen deşarjından verimli bir şekilde ayrılmasını gerektirdiğinden statik seperatörlerin bu konuda yetersiz olduğu ortaya çıktı. Mumford ve Moodie, 1985 yılında ilk nesil dinamik seperatörlerin temeli olan Askham hava seperatörünün patentini almıştır (<https://slideplayer.com/slide/12697794/>).

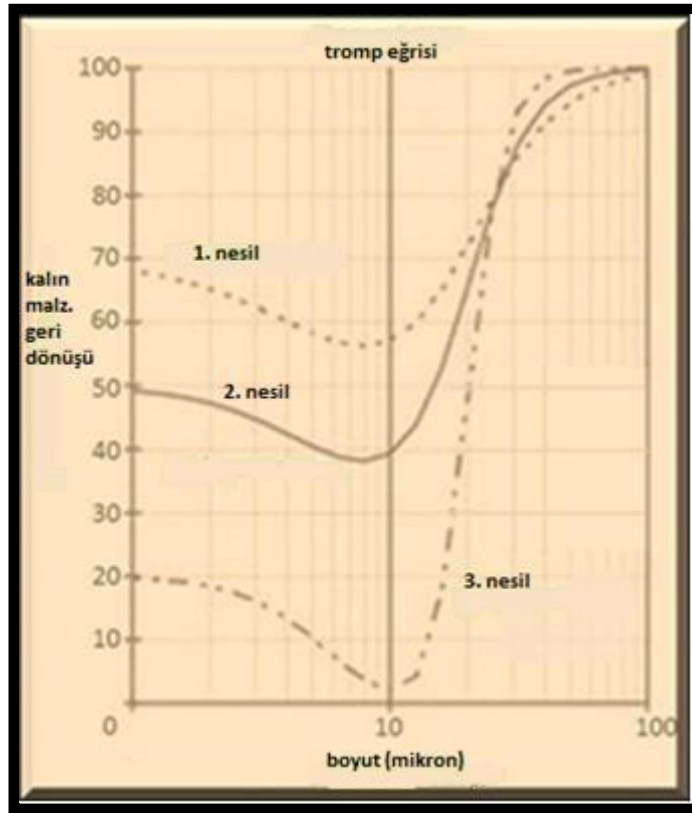
Dinamik seperatörler, birinci, ikinci ve üçüncü nesil olmak üzere üç kategoride sınıflandırılır (Çizelge 2.5). Tromp eğrilerine bakıldığında (Şekil 2.8), son jenerasyon olan 3. Jenerasyona doğru kaba malzeme miktarının azaldığı seperatör etkinliğinin arttığı söylenebilir. Birinci nesil seperatörlerde hava akımı, sınıflandırıcı gövdesi içerisinde bulunan bir fan

tarafından üretilir. İkinci nesilde ise hava akımı harici bir fan tarafından üretilir ve siklonlar vardır. Üçüncü nesil, karşı bıçakların yerini alan dönen bir kafese sahiptir.

Çizelge 2.5. Dinamik seperatör çeşitleri

Kategori	1. Jenerasyon	2. Jenerasyon	3. Jenerasyon
Ad	Klasik Seperatörler	Siklonlu Seperatörler	Yüksek Etkili Seperatörler
Yeterlilik	40 - 60 %	60 - 80 %	80 - 90 %
By-pass	20 - 70 %	10 - 40 %	0 - 30 %
Blaine	1100-2000 cm ² /g	800-1200 cm ² /g	550-1200 cm ² /g

Kaynak: (<https://www.thecementgrindingoffice.com/separators>)



Şekil 2.8. Dinamik seperatörler için tromp eğrileri.

Kaynak: (<https://www.thecementgrindingoffice.com/separators>)

2.1.6.1.2.1. Birinci nesil dinamik seperatörler

Birinci nesil seperatörlerde hava akımı, sınıflandırıcı gövdesi içerisinde bulunan bir fan tarafından üretilir. Sınıflandırılacak malzeme, ayırmanın dönen bir dağıtım plakası tarafından oluşturulduğu alana dağıtılır. Dönen plaka, partikülleri ayırma bölgesine atmak için bir merkezkaç kuvveti uygular. Büyük parçacıklar iç koni içinde düşer ve aparatı terk eder. Fanın indüklediği akım, dış kasaya atılan daha ince partikülleri de taşıyan fan kanatları arasından yukarı ve dışa doğru geçer. Havanın yön ve hızının değişmesi nedeniyle hava taşıyan ince

taneler dönüş havası kanatları vasıtasıyla fan girişine geri döner ve ince taneler toz oluğundan dışarı atılır.

Birinci nesil havalı seperatörlerle ilgili en önemli sorun, dışarıdan hava eklenmemesi ve dolaşan havanın çok ısınmasıdır (>120 °C). Bu, bitmiş çimentodaki alçı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir, bu nedenle bu üniteler klinkerden ziyade hammadde öğüten değirmenlere daha uygundur. Diğer bir sorun ise ince partiküller geri dönüşüm havasından etkin bir şekilde uzaklaştırılmamıştır ve kaba üründe birikerek bitmiş ürünün değirmene yüksek oranda geri dönüştürülmesine neden olur.

Yaklaşık 80 yıldır bu tip sınıflandırıcılar çimento fabrikalarında kullanılmış ve birçoğu bugün hala kullanılmaktadır. 1950'lerde çimentoya olan talebin hızla artmasıyla çimento kalitesini iyileştirme ihtiyacı da arttı. Bu da boyut dağılımının daha yakından kontrol edilmesi anlamına geliyordu. Birinci nesil havalı sınıflandırıcının eksikliklerinin düzeltilmesi gerekiyordu ve bunu yapma girişimleri, ikinci nesil dinamik sınıflandırıcıların tasarımıyla sonuçlandı (<https://slideplayer.com/slide/12697794/>).

2.1.6.1.2.2. İkinci nesil dinamik seperatörler

Birinci nesil seperatörler, yüksek by-pass sebebiyle ince üründe parçacık boyut dağılımı ve yüzey alanını değiştirmede zorlanmaktaydı. Bunun çözümü sirkülasyondaki havadan ince parçacıkları çıkarmaktı. Bu ihtiyaç ile ikinci nesil seperatörler kullanıma sunuldu. Bu seperatörlerde havayı sirküle etmek için dahili fanın yerine harici bir fan yer almakta ve ince toz konisinin yerine birkaç dış gezegensel siklon bulunmaktadır. Böylece seperatör hızı ve sirkülasyon kontrolü de sağlanabilmektedir. Birinci ve ikinci nesil seperatörlerde ayırma işlemi aynı prensibe dayanmaktadır. Birinci nesile göre ikinci nesil seperatörlerin avantajları, ince tanelerin daha iyi çıkarılması, daha keskin ayırma, daha düşük by-pass ve inceliğin her an için kontrol edilebilmesidir. İkinci nesil seperatörler, piyasada kullanılmaya başlandıktan sonra birinci nesil seperatörlere karşı tercih edilmeye başlandılar ancak en büyük dezavantajı olan boyutlarının birinci nesile göre çok daha büyük olması sebebiyle kısa ömürlü oldular ve yerlerini üçüncü nesil seperatörlere bıraktılar.

2.1.6.1.2.3. Üçüncü nesil dinamik seperatörler

Bu tip seperatörlerde malzeme beslemesi üstten yapılmaktadır. Dağılımın artırılması için plaka üzerinde iki adet besleme oluğu yer alır. Malzeme düştüğünde dağıtım plakası tarafından dolaşımdaki hava içinde dağılması sağlanır. Hava akımı, harici bir fanla sağlanır.

Çevrim tipine göre taze havanın %100'ü sirkülasyonlu ya da %100'ü resirkülasyonlu ya da bunların arasında bir oranda olabilir. Tasarıma göre de birincil, ikincil ve üçüncül hava girişi bulunur. Kanatlar ile dönen kafes arasındaki ayırma bölgesine malzeme gelir ve parçacıklar üç kuvvet tarafından yönlendirilir. Bu kuvvetler; dağıtma plakası kaynaklı merkezkaç kuvveti, hava akışından kaynaklı sürükleme kuvveti ve parçacığın kütlesinden kaynaklanan yerçekimi kuvvetidir. Sürükleme kuvveti malzemeyi dönen kafesin içine çekmeye çalışır. Merkezkaç kuvveti malzemeyi kılavuz kanatlara doğru itmeye çalışır. Ayırıcının düzenli bir kesim boyutuna neden olan bu kuvvetlerin dengesidir. Bu denge sabit kalır, çünkü sınıflandırma bölgesindeki malzeme her zaman aynı dönme yarıçapına sahiptir, dolayısıyla merkezkaç kuvveti de tüm alanlarda aynı olur. Diğer taraftan hava hızı yani sürükleme kuvveti sabit kalarak malzeme ve hava uniform şekilde dağılır. İri malzeme ise dönen kafes içine giremez ve yerçekimi kuvveti ile alttaki koniğe inerek dışarı çıkar. İnce malzeme de kafes içerisine girerek üst ya da alt hava akımı ile seperatörden dışarı çıkar (<https://www.thecementgrindingoffice.com/separators>).

Üçüncü nesil dinamik seperatörlerin avantajları;

- çok büyük akış hızlarına ulaşılabilmesi
- mekanik ayarlamaların mümkün olması
- farklı kalitelerde ürün üretilmesi imkanı
- birinci ve ikinci nesil seperatörlere göre daha fazla verimlilik
- değirmene özgü tüketimin azalması
- öğütme kapasitesinin artması
- çimento sıcaklığının düşmesi
- daha yüksek çimento kalitesi

Üçüncü nesil dinamik seperatörlerin dezavantajları;

- optimum sızdırmazlığın sağlanmasında zorluk
- akış hızının ve parçacıkların merkezkaç ivmelerinin sabit olmaması sebebiyle verimliliğin etkilenmesi(<https://www.thecementgrindingoffice.com/separators>).

2.1.6.2. İnceliği etkileyen parametreler

Çimento öğütme prosesinde inceliğe etki eden pek çok parametre olmakla beraber bu parametreler üç başlık altında sınıflandırılabilir.

2.1.6.2.1. Mekanik parametreler

Mekanik parametreler, seperatör boyutları, değirmenin uzunluğu ve yarıçapı, bilya boyutları, elek diyaframı üzerindeki yuvaların yarıçapları gibi fiziksel özelliklerle ilgilidir. Bu parametreler çalışma sırasında sabit olduğundan kabul edilebilir olarak değerlendirilir.

2.1.6.2.2. Fiziksel - kimyasal parametreler

Bu parametreler klinker ve katkı maddesi içeriklerini içerir. Klinkerin kimyasal içeriği (C_3S , C_2S) klinkerin mineralojik yapısını etkiler. Bu da klinkerin öğütülebilirliğinde, dolayısıyla çimentonun da öğünebilirliğinde büyük rol oynar.

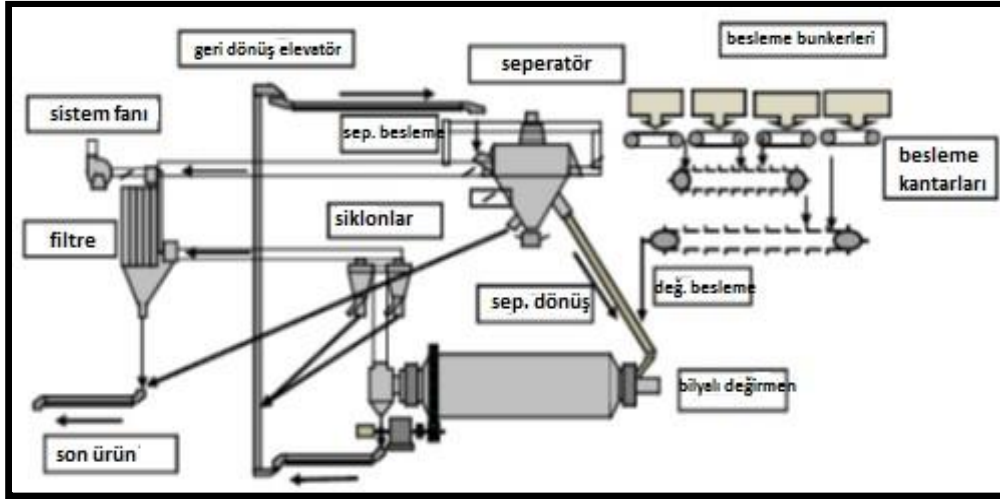
2.1.6.2.3. Operasyonel parametreler

Verimli çalışma koşulları ve daha iyi incelik elde etmek için ayarlanan parametrelerdir. Çimento öğütme işlemi birçok operasyonel parametre yardımıyla gerçekleştirilir. İşlemi kontrol etmek için ise bazı parametreler hayati önem taşır. Bunlar falofon, elevatör amperi ve geri dönüş miktarıdır. Bu faktörlerin tümü, öğütülmüş ürünün inceliği üzerinde, 32 mikron elek üzerindeki ürün kalıntısının ağırlık yüzdesi olarak veya blaine (öğütülmüş ürün başına yüzey alanı, cm^2/g) olarak ölçülen, değişen derecelerde etkiye sahiptir.

- a) Geri dönüş miktarı: Seperatöre taşınan malzeme, ince ve kaba parçacıklar olarak iki akıma ayrılır. Ayırma, merkezkaç ve yerçekimi kuvvetinin dengesinin kontrolüyle gerçekleştirilir. Devir seviyesi değiştirilerek merkezkaç kuvveti kontrol edilebilir. Dolayısıyla incelik ve bitmiş ürün ağırlığı seperatörde ayarlanabilir.
- b) Falofon: Genellikle en iyi öğütme, değirmen en gürültülü olduğunda meydana gelir ve bu, değirmen içinde gerçekleşen birçok öğütme eyleminin göstergesidir. Değirmen gürültüsünün fonksiyonu olan falofon seviyesi, anlık ortam ve besleme yükünün maksimum ortam ve besleme yüküne yüzde oranını yansıtır. Falofon seviyesi genellikle değirmen çalışmasını izlemek için bir proses kontrol parametresi olarak ölçülür.
- c) Elevatör amperi: Öğütülmüş malzeme, yeniden öğütülmek üzere değirmen girişine geri gönderilen büyük boyutlu parçacıkların akışına ve nihai ürünü oluşturan

ince parçacıkların akışına bölünmek üzere bir elevatör ile seperatöre taşınır. Dolayısıyla elevatördeki seperatöre gönderilecek olan malzeme miktarı elevatör motorunun amper seviyesinin bir fonksiyonu olarak ölçülür.

Bir bilyalı değirmen ve seperatörden oluşan sistemde, ekipman boyutları, bilya yükü ve boyu, seperatör değişkenleri, malzemenin sertliği ve tane boyu dağılımı gibi performans üzerine etkili çok sayıda değişken bulunmaktadır (Erdem ve diğerleri, 2005). Seperatörlerin çalışma koşulları, değirmene doğru hava akışı ve değirmen kamaralarındaki bilya boyları gibi farklı değişkenler, kuru öğütme hatlarının verimini etkileyebilmektedir. Değirmende öğütme sonrası oluşan çimento, seperatöre gelir ve seperatör, gelen malzemeyi ikiye ayırır. İstenen incelik değerini aşan kısım değirmene tekrar öğütülmek üzere geri gönderilir. İstenen incelik değerlerine sahip kısım da seperatörün diğer kanalından değirmen çıkışına gelir ve silolara gönderilir (Subbaraj ve Anand, 2010; Dağcı ve diğerleri, 2001). Kapalı bir öğütme sisteminin temel bileşenlerini gösteren basitleştirilmiş bir akış şeması Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Kapalı çevrim çimento değirmeni
Kaynak: (Tsamatsoulis 2014)

Öğütme devresinin performansını ve kalitesini etkileyen başka birçok faktör vardır. Kalite açısından kritik olan, seperatör havalandırma havasıdır. Seperatör beslemesinin seperatör havasına oranı önemlidir. Havalandırma havasındaki değişiklikler performans ve kalite değişikliklerine yol açabileceğinden, seperatör havalandırma havasının sabit olduğu kabul edilir (Van Breusegem ve diğerleri, 1996). Değirmendeki malzeme yükü de iyi kontrol edilmelidir. Yükün çok olması değirmen tıkanmalarında, az olması ise değirmenin iç ekipmanlarının hızlı aşınmasında rol oynar. Proses sürecinin çok değişkenli yapısı, aşırı derecede yük dengesizlikleri, aynı değirmende öğütülen farklı çimento türleri ve klinker sertliği, malzemedeki nem miktarı, öğütme ortamı durumu, seperatör verimliliği ve farklı

malzemelerin parçacık boyutu gibi bazı temel süreç özellikleri hakkında eksik bilgiler nedeniyle endüstriyel bir öğütme sisteminin modellenmesi çok hassas bir işe dönüşmektedir (Tsamatsoulis, 2014).

Değirmen enerji tüketimi değirmenden çıkan ürüne bağlıdır. Genel olarak besleme akış hızı kullanılarak geri dönüş akış hızı kontrol edilir (Van Breusegem ve diğerleri, 1996). Sistemde, minimum özgül enerji tüketimiyle istenen tane boyutunda ürün elde edilmesi, doğru ekipman seçimi ve sistemin optimum işletme koşullarında çalıştırılmasına bağlıdır (Erdem ve arkadaşları, 2005). Son derece yüksek enerji tüketen bir ağır sanayi olan çimento endüstrisinde, yüksek belirsizlik derecesi, proses değişkenliği ve çalışma sırasında parametrelerin sık değişmesi nedeniyle öğütme işleminin otomatik kontrolü, içinden çıkılması zorlu bir konu olmaktadır (Tsamatsoulis, 2014). Değirmen sistemi ve kontrolü göz önüne alındığında üretimin stabil gitmesi için bir ölçülü değişken ve bir kontrollü değişkene ihtiyaç bulunmaktadır. Bu tip kontrol sistemleri orantılı integral türev (PID) kullanır ve sistemden çıkan ile sisteme girenin eşit olması varsayımına dayanır (Van Breusegem ve diğerleri, 1996). Otomasyonda genellikle proses değişkeni olarak şu seçeneklerden biri seçilir;

- 1- Geri dönüş elevatörünün gücü
- 2- Seperatörden gelen geri dönüş debisi
- 3- Değirmen girişindeki elektronik kulak (folafon)
- 4- Değirmen gücü

Kontrolör tasarımları arasındaki ortak nokta, süreç dinamiklerini tanımlayan bir modelin varsayımıdır (Tsamatsoulis, 2014). Çok sayıda çalışma, farklı karmaşıklıklara sahip değirmen otomasyon tekniklerini tanımlamaktadır. Çok değişkenli karakter ve doğrusal olmama özelliğinden dolayı model öngörülü kontrol şemaları geliştirilmiştir (Efe & Kaynak, 2002; Ramasamy ve arkadaşları, 2005; Prasath ve diğ., 2010). Endüstriyel proses kontrolünde kontrol döngülerinin %95'inden fazlası PID tipindedir (Astrom ve Hagglund, 2006). Sabit değirmen beslemesi veya sabit seperatör beslemesi, sabit incelikte çimento taneciklerinin üretiminin yapıldığı anlamına gelmez. Gerçek stabil üretim, geri dönüş akış hızı ve ince toz akış hızı takip edilerek stabil hale getirildiğinde mümkün olur. PID kontrol sistemi, optimum şekilde üretimi optimize edebilirken mekaniksel eksikliklerin üstesinden gelemez (Van Breusegem ve diğerleri, 1996).

2.1.7. Paketleme ve Sevkiyat

Üretilen çimento, çimento tipine uygun silolara alınarak paketleme ve sevkiyat bu silolardan yapılmaktadır. Çimento, torbalı ve dökme olarak satılabildiği gibi sling bag ve big bag denilen çuvallarla da satılabilmektedir. Çimento ihracatı, yoğunlukla deniz yoluyla ve fabrikaya en yakın limanlardan yapılmaktadır. Bazı çimento fabrikalarının kendi liman tesisleri bulunmakta ve direkt sevkiyatlarını bu limanlardan taşıyıcı bantlarla yapabilmektedirler.

2.2. Portland Çimentosu

2.2.1. Portland Çimento Tipleri

Çimento tipleri, Avrupa standartları ve Amerikan standartları baz alınarak farklı isimlendirmeler almakta ve tüm dünyada aynı isimlendirmeler ile üretim ve satışı yapılmaktadır.

2.2.1.1. Avrupa standartları çimento tipleri

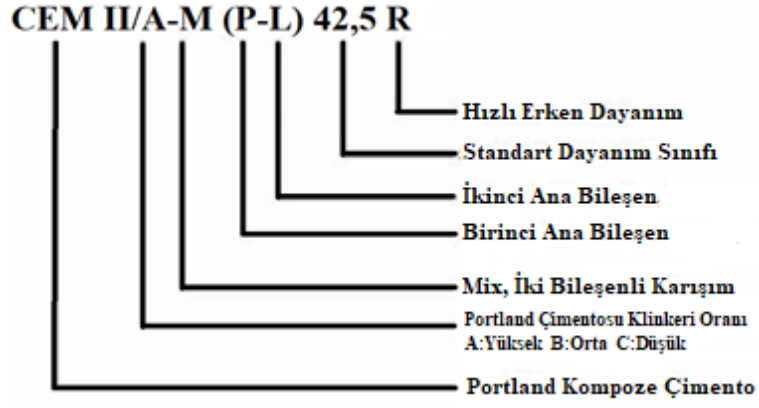
TS EN 197-1:2012 standardı, 27 farklı genel çimento, 7 farklı sülfata dayanıklı genel çimento ve 3 farklı düşük erken dayanımlı yüksek fırın cürüflü çimento ile 2 farklı sülfata dayanıklı düşük erken dayanımlı yüksek fırın cürüflü çimento ve bileşenlerinin tarifini ve özelliklerini kapsar. Çizelge 2.6.'da çimento çeşitleri tablosu yer almaktadır.

Çizelge 2.6. EN 197-1 Çimento tipleri

Ana Tipler	27 ürüne ait işaret (Genel Çimento Tipleri)		Bileşim (kütlece % olarak)										Minör İlaveler Bileşen	
			Ana Bileşenler											
			Klinker	Yüksek Fırın Curufu	Silis Dumanı	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist	Kalker			
K	S	D	Doğal P	Doğal Kalsine Edilmiş Q	Silissi V	Kalkersi W	T	L	LL					
CEM I	Portland Çimento	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland Curufu Çimento	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	90-94	-	6 - 10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	80-94	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21- 35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portland Pişmiş Şistli Çimento	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portland Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21 -35	0-5
	Portland Kompoze Çimento	CEM II/A-M	80-94	----- 6 - 20 -----										0-5
CEM II/B-M		65-79	----- 21 - 35 -----										0-5	
CEM III	Yüksek fırın Curufu Çimento	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Puzolanik Çimento	CEM IV/A	65-89	-	----- 11 - 35 -----					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	----- 36 - 55 -----					-	-	-	0-5	
CEM V	Kompoze Çimento	CEM V/A	40-64	18-30	-	----- 18 - 30 -----			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	----- 31 - 50 -----			-	-	-	-	0-5	

Kaynak: (TS EN 197-1)

TS-EN 197-1 standardında tanımlanan çimento tiplerinin kodlanmasına ait bir örnek CEM II/A-M (P-L) 42,5 R tipi çimento için Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Çimento tipi kodlaması
Kaynak: (Arslanhan, 2016)

2.2.1.2. Amerikan standartları çimento tipleri

ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarında çimento kullanımı bilhassa yurtdışında çok yaygındır. ASTM sınıflandırmasına göre bir portland çimentosunun hidrasyon hızı ve ısı, hangi hızla dayanım kazanacağı, hangi tipin sülfata daha dayanıklı olduğu bileşenlerin miktarına bağlı olarak anlaşılabilir. Kullanım amaçlarına göre Çizelge 2.7’de, ana bileşen yüzdelere göre ise Çizelge 2.8’de çimento tiplerinin sınıflandırması yapılmıştır.

Çizelge 2.7. ASTM C150 Çimento tipleri

Çimento Tipi	Kullanım
I	Genel amaçlı çimento
II	Orta düzeyde sülfata dayanıklı çimento
III	Yüksek erken dayanımlı çimento
IV	Düşük hidrasyon ısı çimento
V	Yüksek düzeyde sülfata dayanıklı çimento
IA	Tip I için hava sürükleyici çimento
IIA	Tip II için hava sürükleyici çimento
IIIA	Tip III için hava sürükleyici çimento

Kaynak: (ASTM C 150/C150M-21)

Çizelge 2.8. ASTM C150 Çimento tiplerinin ana bileşen miktarları.

Çimento Tipleri		Ana Bileşenlerin Miktarları %				Blaine (cm ² /g)
ASTM	CSA	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
I	Normal	50	24	11	8	2800
II	Orta (ara tip)	42	33	5	13	2800
III	Yüksek hızda dayanım kazanan	60	13	50	40	2800
IV	Düşük ısılı	26	50	5	4	2800
V	Sülfata dayanıklı	40	40	12	9	2800

Kaynak: (ASTM C 150/C150M-21)

2.3. Sürdürülebilir Gelişmelerin Ekolojiye ve Sosyal Hayata Etkisi

Dünya nüfusundaki artışa bağlı olarak yeni yerleşim alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Canlıların dünya yüzeyindeki yaşam alanlarının sınırlı olması nedeniyle gelişen teknolojinin yaşama entegre edilmesine yol açmıştır. Modern hayatın sürekli olarak tüketimle beslenmesi sınırsız düzensizlikleri meydana getirmektedir. Düzensizlikler gün geçtikçe sürdürülebilir hayatı olumsuz olarak etkilemektedir. Mikroorganizmalar yaşamlarını devam ettirebilmek için entropisi düşük besinleri tüketmeyi hedefler, ancak insanoğlu bu yaklaşıma sahip olmaktansa dünyanın entropisini sürekli arttırmaya yönelik faaliyetler içerisinde olmayı hedeflemiş gibi davranmakta. Diğer taraftan dünya biyosferindeki yaşamı önemseyen kuruluşlar, sürdürülebilir hayatın oluşup ve gelişmesi için aktif olarak faaliyet göstermektedirler. Örneğin, Birleşmiş Milletler tarafından 1987 yılında ilk kez sürdürülebilir kalkınma kavramı Brundtland Raporu'nda tanımlanmıştır. Bu tanım, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneklerinden taviz vermeden mevcut neslin gereksinimlerini karşılmasıdır. Sürdürülebilir kalkınmanın gerçekleşmesi ve devamlılığı için, çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik kavramlarıyla paralel olarak önem verilmelidir (United Nations, 1987). Yani yüzeysel ekoloji yerine derin ekoloji kavramıyla hayatın sürdürülebilirliğine önem verilmelidir. Endüstri ile ekolojinin simbiyotik bir ilişki içerisinde olduğu günümüzden daha iyi anlaşılmalı olup bir bütün oldukları unutulmamalı. Endüstriyel gelişmeyi besleyen sanayideki sürdürülebilir kalkınma modeli, doğal yaşamın devamlığını sağlayan en önemli parçalardan biri olarak düşünülebilir.

Sürdürülebilir üretim, çevreye dost ve sosyal bakımdan yararlı bir şekilde ürün ve hizmet üretimi olarak ifade edilir. Dahası ekonomik olarak uygulanabilir bir model olarak tanımlanabilir (Azapagic & Perdan, 2000: 243). Günümüzde gelişen teknolojinin endüstriyel

sistemlere uygulanarak çevre kirliliğine neden olmayan, doğal kaynakların korunması, enerji kullanımını azaltan doğal kaynakların tercih edilmelerinin yanı sıra bu süreçleri oluşturan etkenlerin (çalışanlar, doğal çevreyi oluşturan canlı toplulukları ve üreticiler) korunarak ekonomik ürünlerin yaratılması hedeflenmektedir. İnsanlar, kuruluşlar ve ülkeler arasında çevre bilincin gün geçtikçe artmaktadır. Bu nedenle kuruluşlar ve işletmeler arasında oluşan rekabet ortamı işletmeleri sürdürülebilir üretim yöntemlerini tercih etmelerine yönelmelerini sağlamıştır. Bu bağlamda doğal kaynaklara yönelim, atık miktarının ve çevre kirliliği azaltılması, sürdürülebilir üretim modelleri için stratejik öneme sahiptir (Azapagic & Perdan, 2000: 243). Sürdürülebilir üretim modeli ürünün nasıl üretildiğinin yanı sıra ürünü oluşturan özellikleri de dikkate alır. Sürdürülebilir üretim yaklaşımının ana bileşenleri, daha az tehlikeli madde kullanarak daha düşük tehlikeli atık üretmenin yanında, geri kazanımla ya da yeniden kullanımla daha düşük enerji ve hammadde kullanımınıdır. Yeni teknoloji ve basit proses işlemleriyle üretim kapasitesi, enerji tasarrufu ve çevreci yaklaşımlarla ve sürdürülebilir üretim uygulamaları gerçekleştirilebilir (Garetti & Taisch, 2012: 83).

2.3.1. Karbon Ayak İzi (KAİ)

Dünya nüfusundaki artışa bağlı yeni yerleşim alanlarına ihtiyaç duyulması ile gün geçtikçe çimento üretiminde önemli artışlar gözlenmektedir. Yani canlı popülasyonu artışına bağlı olarak çimento tesislerinin neden oldukları atıklar gün geçtikçe artmaktadır. Dünyada ve ülkemizde çimento üretimi yapan tüm tesislerin, 1 torba çimento üretmek için gerekli olan süreçlerin neden oldukları KAİ değerlerinin belirlenmesi zorunluluk haline getirilecektir. Bölgesel ve küresel boyutta nüfus artışına bağlı olarak talebin artması, üretim miktarına bağlı olarak meydana gelen atıkların belli düzeyde tutulması sürdürülebilir üretim ve ekoloji için önemlidir. Desarj ortamına verilen atık miktarına bağlı olarak, toprak, su ekosistemlerinin kirlenmesi ve küresel ısınma nedeniyle canlıların yaşadığı fiziksel ve çevresel şartları değişmektedir. Kontrolsüz üretim ve tüketim nedeniyle doğal kaynaklardaki azalmanın yanında doğal yaşam alanlarının azalması insanlığın ana gündem konuları olmaktadır.

KAİ bir üretim ve tüketim süreci boyunca atmosfere verilen sera gazlarının (CO, NOX, SO₂ vb. gibi) CO₂ cinsinden değeri olarak ifade edilebilir. Çalışmamızda karbon ayak izi hesaplaması uluslararası standartlar ve yöntemler olan ISO 14064 – 1:2006 (ISO, 2006) ve GHG Protokol (GHG Protocol, 2015) standartlarına göre yapılmıştır. KAİ hesaplamaları a) doğrudan emisyonlar, b) Dolaylı emisyonlar ve c) diğer dolaylı emisyonlar olarak 3 farklı şekilde (boyutta) hesaplanmaktadır. Şirket tarafından yakılan yakıt, şirket araçlarının yakıt

tüketimi, kaçak emisyonları ve forklift kullanımı 1. kapsam içerisinde değerlendirilir. 2. kapsamda, elektrik ve buhar tüketimini içerir. 3. kapsam ise atıkların bertaraf edilmesini, hammadde ve ürün çıkışındaki nakliye, iş seyahatleriyle otel konaklamalarını içerir (Müjdecı, 2022). Gerçekleştirilen bu yüksek lisans çalışmasında çimento üretiminde kullanılan değırmen ve ürün kapasite artışına bağlı olarak nakliye araçlarında kullanılan yakıtların neden olduğu emisyon etkileri elde edilmiştir. Bu bağlamda enerji tüketimleri optimizasyon öncesi (ağustos, eylül ve ekim) ve sonrası (kasım, aralık ve ocak) 3'er periyotlar için 43.19 kws/ton ve 39,60 kws/ton olarak hesaplanmıştır. Ayrıca iki değırmen için optimizasyon öncesi ve sonrası ortalama (3'er aylık periyot için) üretim tonajları 73.7 ton/s, 79.8 ton/s olarak elde edilmiştir. Bu üretim değerlerine göre optimizasyon öncesi günlük üretim, 3537,6 ton/gün iken optimizasyon sonrası 3830,4 ton/gün olarak hesaplanmıştır. Yani üretim kapasitesi %8.3 arttırılmıştır. Diğer taraftan çimento nakliyesinde kullanılan kamyon seferinde(sayısında) artış meydana gelmiştir. 1 kamyon yaklaşık olarak 27 ton çimento taşıma kapasitesine sahip olduğu için günlük olarak 12 kamyon daha fazla nakliyat işinde kullanılmıştır. Bu etkenler (enerji tüketimindeki azalma) ve nakliyat için kullanılan kamyon sayısındaki artış dikkate alınarak KAİ değerleri aşağıda verilen (2.4) ve (2.5) denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır.

$$FKA_{(n1)}tCO_2 eq = Faaliyet verisi \times CO_2eşdeğeri \quad (2.4)$$

$$TKA_{(n toplam)} tCO_2 eq = FKA_{n1} + FKA_{n2} + FKA_{n3} + \dots \quad (2.5)$$

Burada;

FKA; Faaliyet Karbon Ayak İzi

TKA: Toplam Karbon Ayak İzi

Sunulan bu yüksek lisans tez çalışmasında uygulanan optimizasyon çalışmalarının KAİ 'e olan etkileri incelenmiştir. İlk olarak enerji tüketimine bağlı olarak oluşan KAİ değerine ait emisyon faktörleri elde edilmiştir (ÇŞİB, 2021). Hesaplamalar için 2021 yılına ait Türkiye şebeke elektriği verisi kullanılmıştır. Hesaplamalarda, TR elektriği için emisyon faktörü 0.59 kg CO₂ eşdeğeri/kWh ve dağıtım/iletim kaybı %13.30 olarak alınmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

Sunulan bu yüksek lisans tez çalışmasında, çimento değirmenlerinde iyileştirme maliyetinin minimum tutularak üretimin sürekliliğini aksatmayacak şekilde üretim ve enerji değerlerinde optimizasyon amaçlanmıştır. Çimento değirmenlerinden belli aralıklarla değirmen geri dönüş (DGD), değirmen seperatör giriş (DSG), değirmen filtre (DF), değirmen çıkış (DÇ) ve ürün (DÜ) hattından olmak üzere 5 farklı noktadan alınan numunelerin laboratuvarda elek cihazı ile 32 – 45 - 90 mikron incelik tayinleri yapılmış 45 mikron elek bakiyesi sonuçlarına göre formül (4.1), (4.2), (4.3) ve (4.4) kullanılarak değirmen seperatör verimleri hesaplanmıştır.

$$CL = \frac{Rg - Rp}{Rg - Rm} \quad (4.1)$$

$$f = \frac{100 * (100 - Rp)}{CL * (100 - Rm)} \quad (4.2)$$

$$g = \frac{100 * Rp}{CL * Rm} \quad (4.3)$$

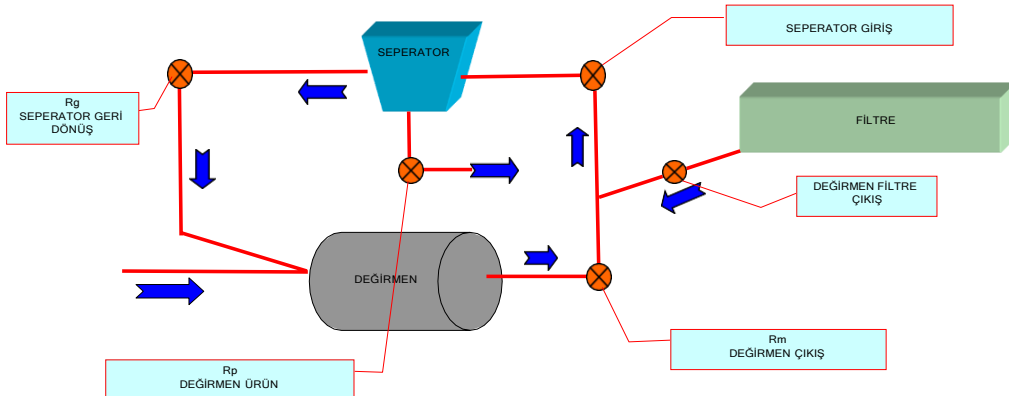
$$eff (verim) = f - g \quad (4.4)$$

Burada;

Rg : Seperatör geri dönüş 45 mikron elek bakiyesi

Rm : Değirmen çıkış 45 mikron elek bakiyesi

Rp : Ürün 45 mikron elek bakiyesi



Şekil 3.9 Çimento Değirmeni Seperatör Verimlilik Tespiti İçin Numune Alma Noktaları

Otomatik blaine (özgül yüzey) cihazı ile blaine değerleri tespit edilmiş, değirmen çıkışı ürün numunelerinden (DÜ) harç laboratuvarında kalıp dökülmüş ve beton presinde kırılarak dayanım sonuçları elde edilmiştir. Numunelerin alındığı andaki üretim verileri de indas otomasyon programından alınmıştır. Numunelerin kimyasal analizi için önce Claisse Eagon 2 cihazı ile cam tablet hazırlanmış ve bu cam tabletler de Panalytical Zetium XRF cihazı ile okutularak kimyasal analizler elde edilmiştir.

Çalışma sırasında elde edilen ve çalışmanın yorumlanmasına yardımcı olan veriler;

- Seperatör verimi
- Değirmen ürün incelikleri
- Ürün blaine değerleri
- Ürün dayanım değerleri
- Üretim ton/saat değerleri
- Indas otomasyon değerleri
- Enerji tüketim değerleri

3.1. Karakterizasyon Yöntemleri

Bu çalışmada optimizasyon öncesi ve sonrasında sentezi elde edilen çimento malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri, XRD cihazı (Traçim Çimento Fabrikası Kalite Kontrol Bölümü'nde bulunan Panalytical marka Cubix-3 Cement model X-Ray Diffraction System), XRF cihazı (Vezirhan Çimento Fabrikası Kalite Kontrol Bölümü'nde bulunan Panalytical marka Zetium model), partikül boyut cihazı (Traçim Çimento Fabrikası Kalite Kontrol Bölümü'nde bulunan Malvern mastersizer), SEM/EDX, MAPPING(Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan ZEISS marka Supra 40 VP model), FTIR (Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Kimya mühendisliği Laboratuvarındaki Agilent Cary 360 marka IR cihazı ve ATR (Attenuated Total Reflectance)) ve CHN-S analiz yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, yine Vezirhan Çimento Fabrikası Kalite Kontrol Bölümü'nde bulunan Astek marka elek cihazı ile incelik, Astek marka blaine cihazı ile özgül yüzey, otomasyon programı Indas ile proses parametreleri ve Astek marka basınç dayanım cihazı ile dayanım değerleri elde edilmiştir. Optimizasyon öncesi ve sonrası her iki çimento değirmeninin farklı bölgelerinden alınan numunelerin Panalytical marka XRD cihazında faz analizleri, Malvern mastersizer cihazı ile de partikül

boyut analizleri yaptırılmıştır (Çizelge 3.1). Tüm bu cihazlardan elde edilen sonuçların yorumlanmasıyla optimizasyon çalışmasının başarısı değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimento örnekleri üzerinde gerçekleştirilen karakterizasyon analizleri

Malzeme	Analiz Metodu								
	FT-IR	SEM/ED	XRD	XRF	Partikül Boyutu	CHNS	Blaine	İncelik	Dayanım
1 DSG	❖	❖	❖		❖	❖	❖	❖	
2 DÜ	❖	❖	❖	❖	❖	❖	❖	❖	❖
3 DÇ	❖	❖	❖		❖	❖	❖	❖	
4 DF	❖	❖	❖		❖	❖	❖	❖	
5 DGD	❖	❖	❖		❖	❖	❖	❖	
1 DSG	❖	❖	❖		❖	❖	❖	❖	
2 DÜ	❖	❖	❖	❖	❖	❖	❖	❖	❖
3 DÇ	❖	❖	❖		❖	❖	❖	❖	
4 DF	❖	❖	❖		❖	❖	❖	❖	
5 DGD	❖	❖	❖		❖	❖	❖	❖	

3.1.1. Astek Elek Cihazı

Vakumlu eleme cihazı özellikle her türlü ince ve partikül boyutlu ürünlerin ayrıştırmasını gerçekleştiren ve hassas tane boyut dağılımı belirlenmesinde eleme analizini sağlayan bir ölçüm cihazıdır (<https://www.hira.com.tr>).

Cihaz üzerinde entegre bulunan ekran ve tuşlar ile eleme belli vakum altında yapılır. Operatör inisiyatifine gerek kalmadan kısa sabit sürede ve yüksek eleme kabiliyeti ile tekrarlanabilir elek analiz sonuçları elde edilir. Yapılan çalışmada tüm elek üstü bakiye testleri bu cihazla yapılmış ve Haver-Boecker marka elekler kullanılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Astek elek cihazı

3.1.2. Astek Basınç Dayanım Cihazı

Harç yapılarak kalıplara doldurulmuş ve 24 saat süre sonunda kalıptan çıkarılarak 20 ± 1 °C sabit sıcaklıktaki su banyolarına alınan sertleşmiş beton kalıplar, bu banyolarda standartlarda belirtilen süre kadar kürlendikten sonra basınç dayanım cihazında kırılarak dayanımları tespit edilir (Şekil 3.2). Cihaz, dayanım birimi olarak hem kN/m^2 hem de mPa cinsinden değer verebilmektedir.



Şekil 3.2. Basınç Dayanım Cihazı

3.1.3. Astek Blaine (Özgül Yüzey Alanı) Cihazı

Çimentonun bir gramının kapladığı alanın cm^2 cinsinden değeri blaine olarak ifade edilmektedir. Blaine deneyi, standart koşullarda sabit basınç ile sıkıştırılan çimento tabakasından, havanın geçme zamanının ölçülmesi esasına dayanır. Yüksek blaine değerine sahip olan çimentonun aynı zamanda yüksek inceliğe de sahip olması beklenir ancak tanecik yapılarına bakıldığında hem yüksek hem de düşük incelikte partiküller içerebilmektedir. Yapılan çalışmada blaine cihazı (Şekil 3.3) ile çimento değirmeninin farklı bölgelerinden alınan numunelerin özgül yüzey alanı değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 3.3. Blaine Cihazı

3.1.4. Partikül Boyut Analizleri

Özellikle çimento endüstrisinde yaygın olarak kullanılan partikül boyut analiz cihazları, örnekleri (çimento) oluşturan partiküllerin dağılımlarının (homojen-heterojen dağılımları hakkında bilgi verir) belirlenmesini sağlar. Çimentoyu oluşturan partiküllerin boyut dağılımı ve toplam özel yüzey alanları örneklerin mukavemeti ve gerçekleşecek olan reaksiyonlar (su ile çimento arasındaki) üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu önemli özellikleri nedeniyle partikül boyut analizi geniş bir kullanım (Gıda, ilaç, inşaat, kimya vb. gibi) alanına sahiptir.

3.1.5. SEM / EDX - MAPPING (Taramalı elektron mikroskobu / Enerji dağılımlı X-ışını Haritalaması) Analiz Yöntemleri

SEM/EDX-MAPPING analiz yöntemi malzemelerin yüzey fiziksel özelliklerinin (Şimşek ve diğerleri, 2019) ve yapıdaki kimyasal bileşenlerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Malzemelerin yüzey morfolojisi ve kimyasal bileşenlerinin belirlenmesinde elektrik iletkenliğinden yararlanır. Onun için malzemelerin iletken özelliğine sahip olması gereklidir. İletken olmayan malzemelere ön kaplama işlemi yapılarak iletkenlik özelliği kazandırılır. İletkenlik için malzeme yüzeyi platin, altın ve karbon fiberler (özellikle EDX ve MAPPING analizleri için) kullanılır. Çimento örneklerinin analizinde kullanılan Zeiss/Supra 40 VP (Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı (BARUM) cihazına ait görsel Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. SEM Zeiss/Supra 40 VP cihazı

3.1.6. FT-IR (Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi) Analiz Yöntemi

Yapay ya da doğal olarak elde edilmiş malzemelerin fonksiyonel gruplarının belirlenmesi için FT-IR analiz yöntemlerinden faydalanılır. FT-IR analizleri, sıvı, toz ve katı numuneler üzerinde 3 farklı teknik kullanılarak gerçekleştirilebilir. Çimento örneklerinin FT-IR analizinde kolay ve hassas olan ATR (Attenuated Total Reflection) tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Karataş & Şimşek, 2022).

3.1.7. CHN-S Elementel Analiz Yöntemi

CHN-S cihazının çalışma yöntemi, sıvı, toz ve katı doğal ve yapay örneklerin yüksek sıcaklıklarda yakılması işlemidir. Bu yakma işlemi sonrasında açığa çıkan örnek içerisindeki C (karbon), N (Azot), H (hidrojen) ve S (kükürt) elementlerin değerleri % olarak elde edilir. Ayrıca bu değerler kullanılarak O (oksijen) değeri de hesaplanabilir. Bu tez çalışmasında kullanılan LECO/CHN-S 628 cihazı (Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı (BARUM)) Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

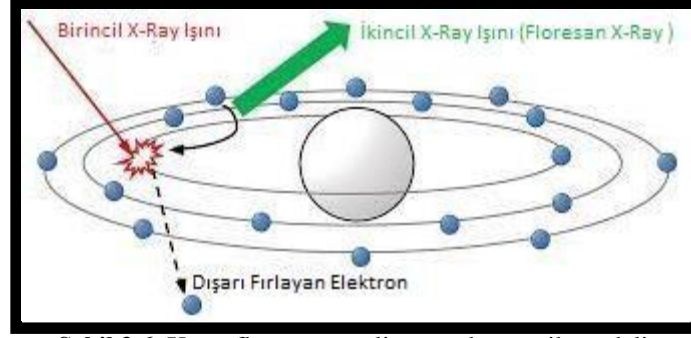


Şekil 3.5. LECO/CHN-S 628 cihazı.

3.1.8. XRF (X-Ray Floresans) Analiz Yöntemi

XRF, "X-Işını Floresans" anlamına gelir ve çok çeşitli materyallerin temel bileşimlerini belirlemek için uzun yıllardır kullanılan bir malzeme analiz tekniğidir. Özellikle metal alaşımların, minerallerin ve petrol ürünlerin bileşimlerini analiz etmede kullanılır. X-ışınları elektromanyetik spektrumun bir parçasını oluşturur ve ultraviyolenin yüksek enerjili bölgesindedirler. Enerjileri kiloelektron volt veya nanometre dalga boyu ile ifade edilir. XRF ile ppm ile % 100 arasında değişen konsantrasyonlarda katı maddeler, sıvılar ve toz elementler

analiz edilebilir (troy-met.com). Tüm XRF cihazları, bir X-ışını kaynağı ve bir dedektör olmak üzere iki ana bileşen etrafında tasarlanmıştır (troy-met.com). X-ışını kaynağı olarak genellikle X-ışını tüpü kullanılmaktadır. Birincil X-ışınları adı verilen yüksek enerjili radyasyon, kaynak tarafından üretilir ve numunenin yüzeyine yönlendirilir. Işın, numunedeki atomlara çarptığında yakın yörüngelerdeki elektronları daha yüksek enerji düzeyine çıkarır. Uyarılan elektronlar ilk enerji düzeylerine döndüklerinde kazanmış oldukları fazla enerji bir dedektör tarafından toplanır ve işlenen ikincil X-ışınları oluşur. Bu ikincil X ışınları yayımına floresans ışımaya adı verilir. Bu ışımaların dalga boyları her element için farklı ve ayırt edicidir (<https://merlab.metu.edu.tr>). Enerjiye karşı X-ışınının yoğunluk noktalarını gösteren bir spektrum oluşturulur. Enerji piki elementi tanımlar. Pik alanı veya yoğunluğu, numunedeki elementin miktarının bir göstergesidir (troy-met.com) (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. X-ray floresans analiz metodu atomik modeli.
Kaynak: (<https://www.horiba.com>)

Bu çalışmada kullanılan XRF cihazı Panalytical marka Zetium modelidir. Cihaz çalışma prensibi yukarıda açıklandığı gibi olup atomik modeli Şekil 3.6.'da verilmiştir. Cihazda hem eritiş tablet hem de toz tablet yöntemleri ile okutma yapılabilmektedir. Optimizasyon çalışması sırasında yapılan tüm analizler eritiş cam tablet yöntemi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. X-Ray floresans cihazı

3.1.9. XRD (X Işınım Kırınım) Analiz Yöntemi

Malzemelerin, parçacık boyutunu, yığın faz yapısının belirlenmesi ve yığın fazdaki dönüşüm kinetiğini araştırmak için XRD analiz yöntemi kullanılır(Şimşek 2015). Bu yöntemin analiz temeli Bragg yasasına dayanır. Ayrıca, XRD analiz yöntemi malzemelerin amorf ve kristal yapılarının belirlenmesinin yanında mineralojik içeriği hakkında da bilgi verir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. XRD cihazı

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tezi kapsamında ilk olarak optimizasyon çalışmaları öncesinde tesis üretim kapasitesi, ürün kalitesi, enerji tüketimi ve değirmen çalışma koşullarını etkileyen parametreler üzerinde ön çalışmalar yapılmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmaları, enerji maliyeti ve ürün kalitesinin incelenmesi ile ilgili çalışmalar alt başlıklar altında detaylandırılmıştır. Ayrıca elde edilen pozitif etkilerin, ekolojinin (insan ve diğer canlılar boyutu ele alınarak) ve canlı hayatının sürdürüldüğü sosyal yaşam alanlarına etkisi yani sosyal hayatın güvenli olarak sürdürülebilirliğine katkısı detaylı olarak ayrı bir başlıkta incelenmiştir. Optimizasyon öncesi ve sonrasında çimento numunelerinin, ürün kalitesine etki eden fiziksel ve kimyasal özellikleri XRF, XRD, Partikül boyut analiz, FT-IR, Elek testi, basınç testi, özgün yüzey alanı, SEM/EDX, MAPPING ve CHN-S analiz metotları kullanılarak incelenmiştir. Yapılan değişikliklerin ürün ve kuruma olan çevresel, ekonomik ve etkileri detaylı olarak tartışılmıştır.

4.1. Optimizasyon Çalışmaları

Çimento değirmenlerinde optimizasyon çalışmasının ilk aşamasında mevcut üretim parametreleri ile elde edilen değerler ve ilk yapılan parametre değişiklikleri ile elde edilen test değerleri Çizelge 4.1 de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.1. II. Çimento değirmeninde normal ve test çalışması verilerinin karşılaştırılması

Çalışma Şekli	Süre	Değ.Bes. ton/saat	Sep. Taze Hava %	Sep.Devr Rpm	Ürün Filtre Fanı %	Geri Dönüş ton/saat	Değ. Motor Amp.	Elevatör Amp.	İncelik 32 µ	Blaine cm ² /g
Normal	10 saat	74,3	30-30	151	92,5	243,2	119,4 118,9	52,5	14,1	2955
Test	8 saat	77,8	82-82	168	97,7	233,9	118,5 117,9	52,5	12,1	3166

Değirmen çalışma parametrelerindeki değişiklikler sonrası haftada bir gün değirmenlerin farklı bölgelerinden alınan numuneler içinden seçilen 13.11.2020 tarihli numunelerin 45 µ incelik test sonuçlarına göre hesaplanan değirmen seperatör verimleri birinci çimento değirmeni için Çizelge 4.2. ve Çizelge 4.3.'de, ikinci çimento değirmeni için Çizelge 4.4. ve Çizelge 4.5.'de gösterilmiştir. Numunelerin alındığı andaki değirmen çalışma parametrelerinin Indas programındaki ekran görüntüleri ise Şekil 4.1. ve 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. I. Çimento değirmeninden alınan numunelerin analiz sonuçları

Tarih	Saat	Numune Noktası	45 µ(%)	90 µ(%)	Blaine(cm ² /g)
CEM I 42,5 R 13.11.2020	15:00	Rg- Seperatör Geri Dönüş	57,3	20,1	677
		Değirmen Filtre	18,7	1,6	2045
		Rm-Değirmen Çıkış	41,4	13,3	1335
		Seperatör Giriş	40,6	13,4	1358
		Rp - Ürün	4,6	0,2	3219

Çizelge 4.3. I.Çimento değirmeni verimlilik tablosu

$CL = \frac{Rg - Rp}{Rg - Rm}$	$f = \frac{100 * (100 - Rp)}{CL * (100 - Rm)}$	$g = \frac{100 * Rp}{CL * Rm}$	$eff = f - g$ (verim) (%)	13.11.2020 15:00
3,31	49,12	3,35	45,77	45 µ
2,93	39,33	0,51	38,82	90 µ



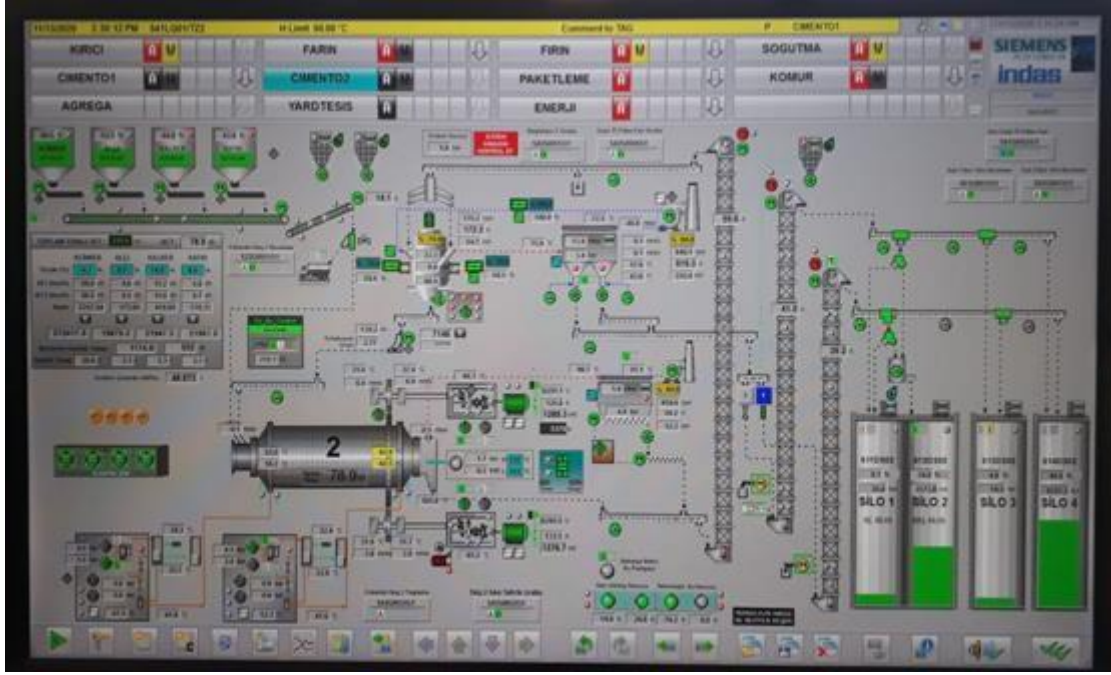
Şekil 4.1. I. Değirmen numunelerinin alındığı andaki CCR ekran görüntüsü

Çizelge 4.4. II. Çimento değirmeninden alınan numunelerinin analiz sonuçları

Tarih	Saat	Numune Noktası	45 µ(%)	90 µ(%)	Blaine(cm ² /g)
CEM II/A 42,5 R 13.11.2020	15:00	Rg- Seperatör Geri Dönüş	55,4	16,9	620
		Değirmen Filtre	17,3	1,7	2484
		Rm -Değirmen Çıkış	37,7	11,1	1645
		Seperatör Giriş	35,3	10,2	1691
		Rp - Ürün	2,4	0,3	4610

Çizelge 4.5. II.Çimento değirmeni verimlilik tablosu

$CL = \frac{Rg - Rp}{Rg - Rm}$	$f = \frac{100 * (100 - Rp)}{CL * (100 - Rm)}$	$g = \frac{100 * Rp}{CL * Rm}$	$eff = f - g$ (verim) (%)	13.11.2020 15:00
2,99	52,32	2,13	50,19	45 µ
2,86	39,18	0,94	38,24	90 µ



Şekil 4.2. II. Değirmen numunelerinin alındığı andaki CCR ekran görüntüsü

Optimizasyon çalışması öncesinde ve çalışma sırasında farklı tarihlerde değirmen numuneleri alınmıştır. Numunelerin alındığı andaki işletme çalışma parametreleri Çizelge 4.6. ve Çizelge 4.7.'de görülmektedir.

Çizelge 4.6. I. Çimento değirmeni Cem I 42,5 R ürün tipi için işletme parametreleri

1.ÇİMENTO DEĞİRMENİ	OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI ÖNCESİ	13.11.2020 16:30	20.11.2020 16:00	27.11.2020 15:00	07.12.2020 10:00	08.01.2021 09:00
ÜRÜN FİLTRE FAN DEVRİ	%92 - 920 rpm	%93 - 930 rpm	%94 - 940 rpm	%92 - 920 rpm	%93 - 930 rpm	%90 - 900 rpm
SEPERATÖR DEVRİ	143 rpm	161 rpm	149 rpm	147 rpm	131 rpm	136 rpm
SEPERATÖR TEMİZ HAVA KLAPELERİNİN AÇIKLIĞI	sağ %50 - sol %50	sağ %90 - sol %100	ağ %97 - sol %10	ağ %50 - sol %10	ağ %35 - sol %10	sağ %80 - sol %100
DEĞİRMEN FİLTRE DEVRİ	%60 - 900 rpm	%65 - 975 rpm	%60 - 960 rpm	%60 - 900 rpm	%60 - 900 rpm	%60 - 900 rpm
DEĞİRMEN GİRİŞ / ÇIKIŞ EMİŞLERİ	giriş 0,2 mbar çıkış 9,8 mbar	giriş 0,3 mbar çıkış 10,8 mbar	giriş 0,2 mbar çıkış 10,5 mbar	giriş 0,2 mbar çıkış 9,0 mbar	giriş 0,2 mbar çıkış 10,0 mbar	giriş 0,2 mbar çıkış 8,8 mbar
FİLTRE GİRİŞ SICAKLIĞI	> 70 °C	72,7 °C	71,8 °C	70,0 °C	69,0 °C	71,5 °C
32 MİKRON İNCELİK	11,8%	9,2%	13,5%	13,4%	12,5%	15,7%
28 GÜNLÜK DAYANIM	55,6 mpa	54,4 mpa	61,6 mpa	57,1 mpa	56,0 mpa	55,0 mpa
DEĞİRMEN TONAJI	76 ton/saat	64,2 ton/saat	88,8 ton/saat	77,8 ton/saat	78,5 ton/saat	94,5 ton/saat
GERİ DÖNÜŞ TONAJI	195,5 ton/saat	185,4 ton/saat	162,1 ton/saat	166,2 ton/saat	166,3 ton/saat	154,6 ton/saat

Çizelge 4.7. II. Çimento değirmeni Cem I 42,5 R ürün tipi için işletme parametreleri

2.ÇİMENTO DEĞİRMENİ	OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI ÖNCESİ	13.11.2020 16:30	20.11.2020 16:00	27.11.2020 15:00	07.12.2020 10:00	08.01.2021 09:00
ÜRÜN FİLTRE FAN DEVRİ	%91 - 910 rpm	%94 - 940 rpm	%95 - 950 rpm	%93 - 930 rpm	%92 - 920 rpm	%90 - 900 rpm
SEPERATÖR DEVRİ	145 rpm	170 rpm	152 rpm	157 rpm	141 rpm	138 rpm
SEPERATÖR TEMİZ HAVA KLAPELERİNİN AÇIKLIĞI	sağ %30 - sol %30	sağ %70 - sol %70	sağ %70 - sol %70	sağ %70 - sol %70	sağ %30 - sol %30	sağ %60 - sol %60
DEĞİRMEN FİLTRE DEVRİ	%60 - 900 rpm	%64 - 960 rpm	%63 - 945 rpm	%60 - 900 rpm	%60 - 900 rpm	%60 - 900 rpm
DEĞİRMEN GİRİŞ / ÇIKIŞ EMİŞLERİ	giriş 0,1 mbar çıkış 8,6 mbar	giriş 0,1 mbar çıkış 8,5 mbar	giriş 0,2 mbar çıkış 8,2 mbar	giriş 0,2 mbar çıkış 7,6 mbar	giriş 0,1 mbar çıkış 8,2 mbar	giriş 0,0 mbar çıkış 9,1 mbar
FİLTRE GİRİŞ SICAKLIĞI	> 70 °C	65,2 °C	64,5 °C	63,8 °C	64,1 °C	66,4 °C
32 MİKRON İNCELİK	11,5%	8,9%	11,7%	12,5%	11,8%	13,5%
28 GÜNLÜK DAYANIM	53,5 mpa	55,7 mpa	55,7 mpa	53,2 mpa	56,1 mpa	54,0 mpa
DEĞİRMEN TONAJI	70 ton/saat	78,9 ton/saat	88,8 ton/saat	82,6 ton/saat	80,1ton/saat	93,5 ton/saat
GERİ DÖNÜŞ TONAJI	234 ton/saat	139,2 ton/saat	162,1 ton/saat	109,3 ton/saat	120,7 ton/saat	109,4 ton/saat

Çizelge 4.8. I. Çimento Değirmeni Optimizasyon Çalışması Sonuçları

D1 CEM I 42,5 R						
	Tarih	Üretim (ton/s)	32 µ İncelik (%)	2 Gün Dayanım (mPa)	28 Gün Dayanım (mPa)	Seperatör Verimi (%)
Optimizasyon Öncesi	Ağu.20	75,8	11,6	28,1	53,9	
	Eyl.20	72,0	11,2	29,5	55,1	
	Eki.20	72,4	12,5	29,6	57,7	30,9
Ortalama		73,4	11,8	29,1	55,6	30,9
Optimizasyon Sonrası	Kas.20	76,9	13,5	28,3	58,7	49,2
	Ara.20	78,4	14,7	29,6	56,3	57,4
	Oca.21	85,3	13,6	29,8	55,2	61,2
Ortalama		80,2	13,9	29,2	56,7	55,9
% Değişim		9,2	17,9	0,5	2,1	81,2

Çizelge 4.9. II. Çimento Değirmeni Optimizasyon Çalışması Sonuçları

D2 CEM I 42,5 R						
Optimizasyon işlemleri	Tarih	Üretim (ton/s)	32 µ İncelik (%)	2 Gün Dayanım (mPa)	28 Gün Dayanım (mPa)	Seperatör Verimi (%)
Optimizasyon Öncesi	Ağu.20	76,4	11,9	25,4	50,8	
	Eyl.20	70,7	11,2	27,5	52,5	
	Eki.20	74,9	11,4	29,0	57,2	49,8
Ortalama		74,0	11,5	27,3	53,5	49,8
Optimizasyon Sonrası	Kas.20	76,0	13,6	27,9	58,3	56,4
	Ara.20	79,2	14,2	28,6	56,0	58,8
	Oca.21	83,0	12,8	28,8	55,2	
Ortalama		79,4	13,6	28,4	56,5	57,6
% Değişim		7,3	17,8	4,1	5,6	15,6

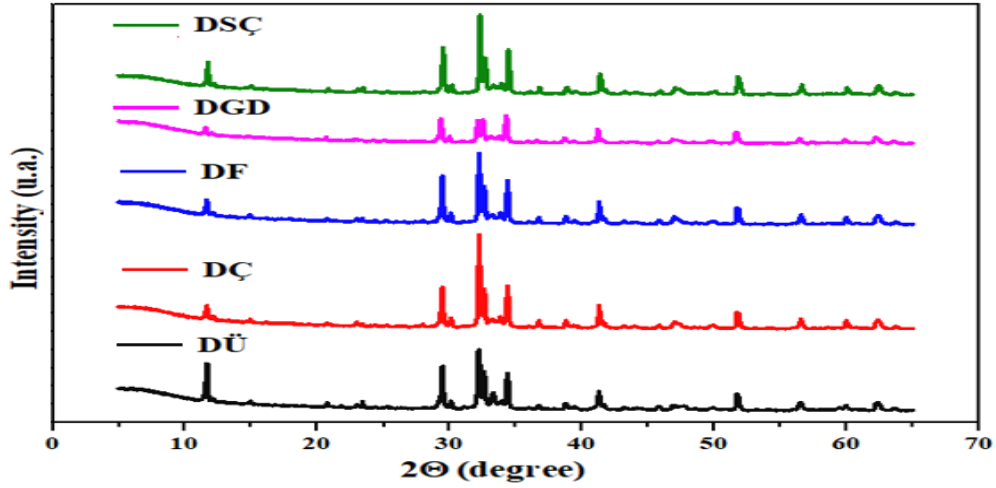
Çizelge 4.10. Çimento Değirmenleri Aylık Enerji Tüketimleri Tablosu

Çimento Değirmenleri	Ağu.20	Eyl.20	Eki.20	Kas.20	Ara.20	Oca.21
Çimento Üretimi (Ton)	92.708	85.930	104.027	106.615	89.508	81.681
Çimento Üretimi (Ort.) kWs / Ton	41,47	44,48	42,62	41,63	40,21	37,45
Çimento Üretimi (CEM I) kWs / Ton	41,23	44,75	43,58	41,56	40,48	36,77

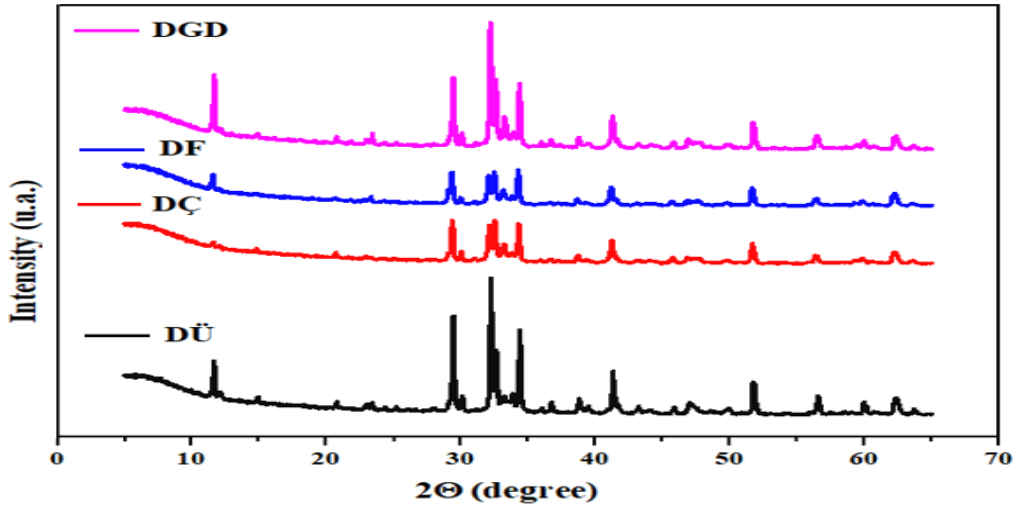
4.1.1. XRD Analiz Sonuçları

Optimizasyon öncesi ve sonrası çimento örneklerine ait XRD analizi, Traçim Çimento Fabrikası Kalite Kontrol Bölümü laboratuvarlarında PANALYTICAL CUBIX-3 Cement X-Ray Diffraction System cihazı ile $2\theta=5^{\circ}-70^{\circ}$ aralığında yapılmış ve analiz sonuçları optimizasyon çalışması öncesi ve sonrası olarak Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiş olup Şekil 4.5.'de faz diyagramları ayrı ayrı gösterilmiştir. Çoklu bileşenlerin faz yapılarının belirlenmesinde XRD analiz yöntemi yaygın olarak kullanılır. Ayrıca çimento içerisindeki

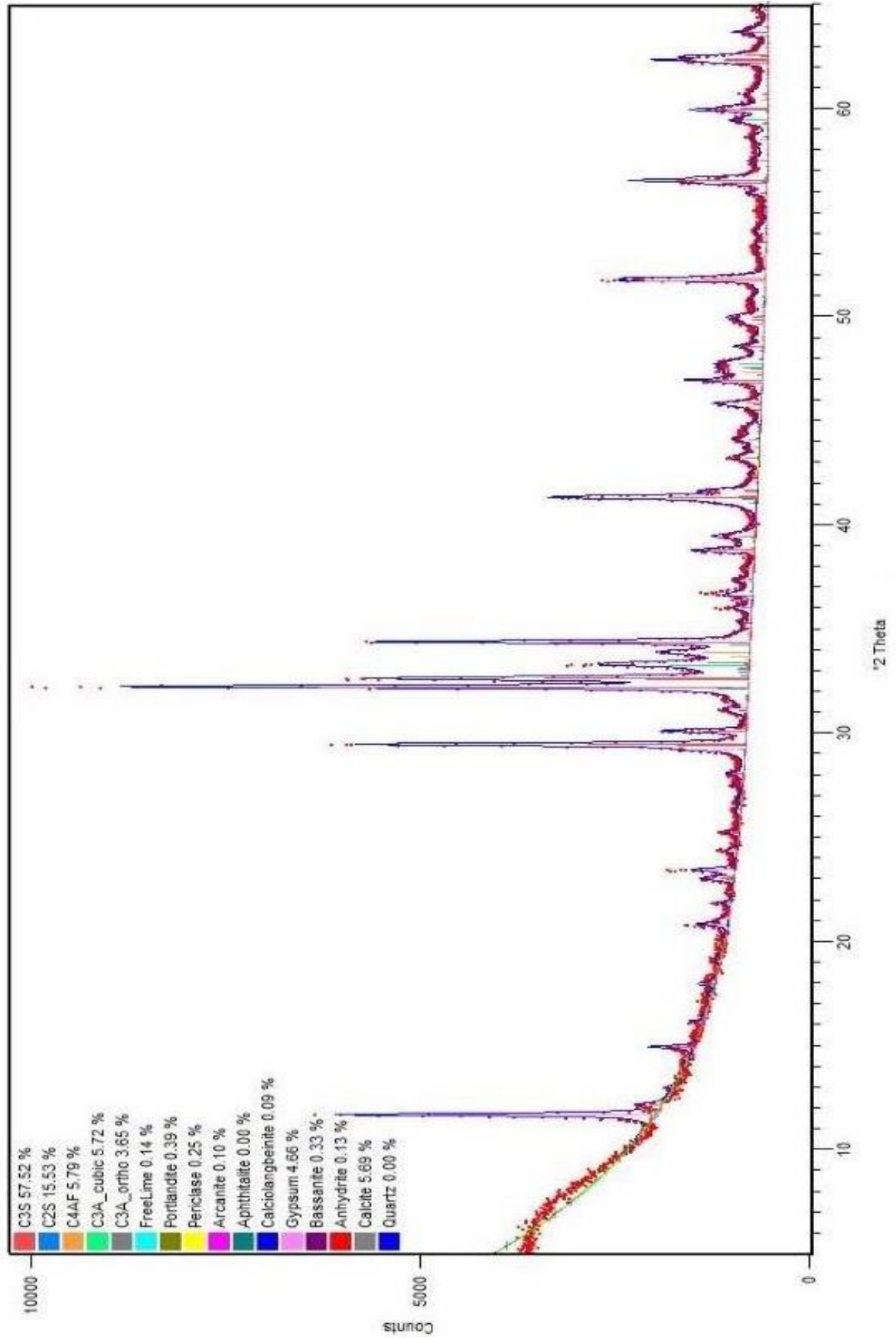
yapıların kantitatif olarak değerleri elde edilebilir (Şekil 4.5). C_3S , C_2S , C_4AF , C_3A_Cubic , C_3A_Ortho , FreeLime, Portland, Periclase, Arconite, Aphthiaite, Calciolangbeinite, Cypsum, Bassanite, Anhydrite, Calcite ve Kuvarz yapılarına ait kantitatif sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca dört ana oksit yapıları olan, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 fazları detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle, C_3S -Alit ($3CaOSiO_3$), C_2S -Belit ($2CaOSiO_3$), C_3A -Trikalsiyum alüminat ($3CaO \cdot Al_2O_3$) ve Brownmillerit ($Ca_2(Al,Fe_{3+})_2O_5$) yapılarına ait 2θ değerleri (Dorum vd., 2013; Springfield, T. 2011), 11.68 (alçı tozu ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) [JCPDS # 33-0311]), 14.89, 20.7 (kalsiyum silikat (Ca_2SiO_4) [JCPDS # 73-2091]) (Öztürk yıldırım & Bulmuş, 2009) , 23.4, 24.5, 26.5, 29.45, 30.05, 32.2, 32.58, 33.26, 33.86, 34.36, 38.7, 41.2, 51.7 ve 63.7 sırasıyla elde edilmiştir. Belirlenen yapılar detaylı olarak optimizasyon sonrası çimento örneği (DÜ) üzerinde gösterilmiştir (Şekil 4.6).



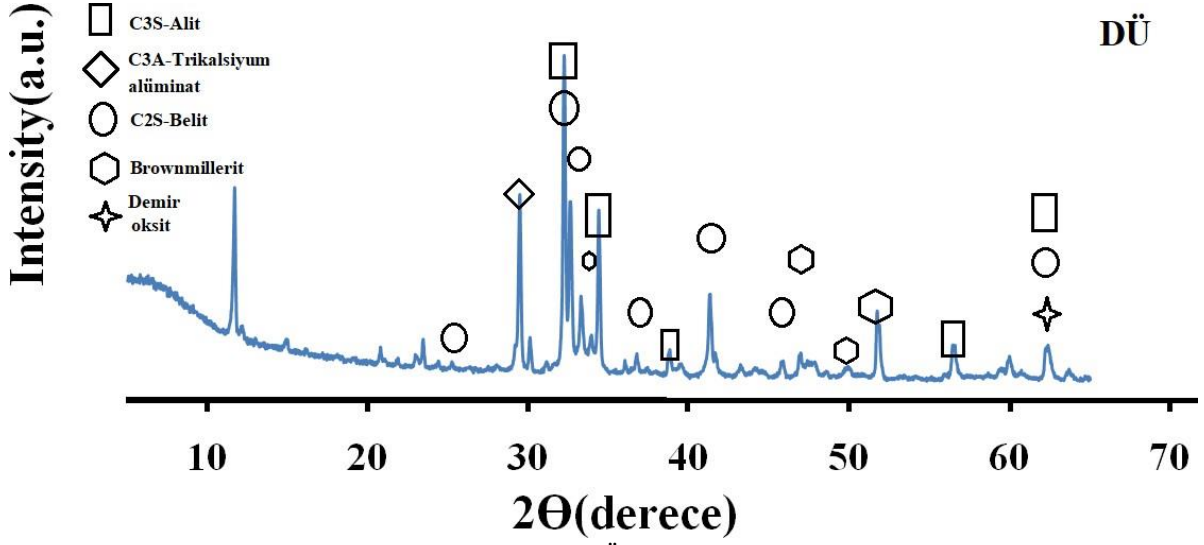
Şekil 4.3. Optimizasyon öncesi numunelerin XRD analiz sonuçları



Şekil 4.4. Optimizasyon sonrası numunelerin XRD analiz sonuçları



Şekil 4.5. Örnek olarak seçilen çimento numunesinde XRD faz analiz sonuçları



Şekil 4.6. Optimizasyon sonrası DÜ numunesinde intensity sonuçları

Çizelge 4.11. Optimizasyon öncesi ve sonrası XRD analiz sonuçları

Malzeme(%)	DSÇ*	DGD*	DF*	DÇ*	DÜ*	DSÇ**	DGD**	DF**	DÇ**	DÜ**
C ₃ S	57.52	66.98	59.44	59.19	57.61	70.51	74.09	67.57	67.96	66.61
C ₂ S	15.53	7.71	13.53	14.23	13.41	3.78	0.00	5.69	7.48	5.70
C ₄ AF	5.79	5.85	5.79	6.13	5.72	8.37	10.16	9.05	9.50	8.58
C ₃ A_Cubic	5.72	7.46	5.90	7.86	5.19	1.84	5.53	0.99	0.46	0.09
C ₃ A_Ortho	3.65	3.67	3.97	2.98	4.17	3.42	1.70	4.26	4.45	4.69
Total Alüminat	9.37	11.13	9.87	10.84	9.36	5.26	7.23	5.25	4.91	4.78
Freelite	0.14	0.00	0.01	0.00	0.15	0.24	0.00	0.03	0.25	0.00
Portland	0.39	0.66	0.39	0.46	0.26	0.45	1.23	0.41	0.43	0.27
Periclase	0.25	0.17	0.36	0.51	0.09	0.16	0.12	0.51	0.46	0.39
Arconite	0.10	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.25	0.30
Aphthiaite	0.00	1.18	0.11	0.46	0.06	0.11	0.88	0.12	0.12	0.12
Calciolangbeinite	0.09	0.04	0.10	0.06	0.05	0.00	0.09	0.00	0.01	0.00
Cypsiium	4.66	5.99	4.60	4.23	5.96	3.51	5.09	3.43	2.56	3.92
Bassanite	0.33	0.00	0.14	0.00	0.83	0.43	0.00	0.25	0.52	0.43
Anhydrite	0.13	0.21	0.14	0.03	0.10	0.00	0.13	0.00	0.00	0.06
Kalsit	5.69	0.00	5.42	3.45	6.29	7.11	0.91	7.36	5.49	8.79
Kuvarz	0.00	0.07	0.01	0.14	0.08	0.05	0.07	0.00	0.07	0.04

*: Optimizasyon öncesi, **: Optimizasyon sonrası

4.1.2. XRF Analiz Sonuçları

Bu yüksek lisans tez çalışmasında çimento örnekleri (optimizasyon öncesi ve sonrası), içeriklerinin belirlenmesi amacıyla yüksek sıcaklıkta (1150°C) % 100 lityum tetraborat flux ile (1:10; çimento örneği/flux)karıştırılarak eritiş yöntemiyle cam tablet haline getirilmiş ve XRF analizleri Panalytical marka Zetium model cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.12.'de verilmiştir.

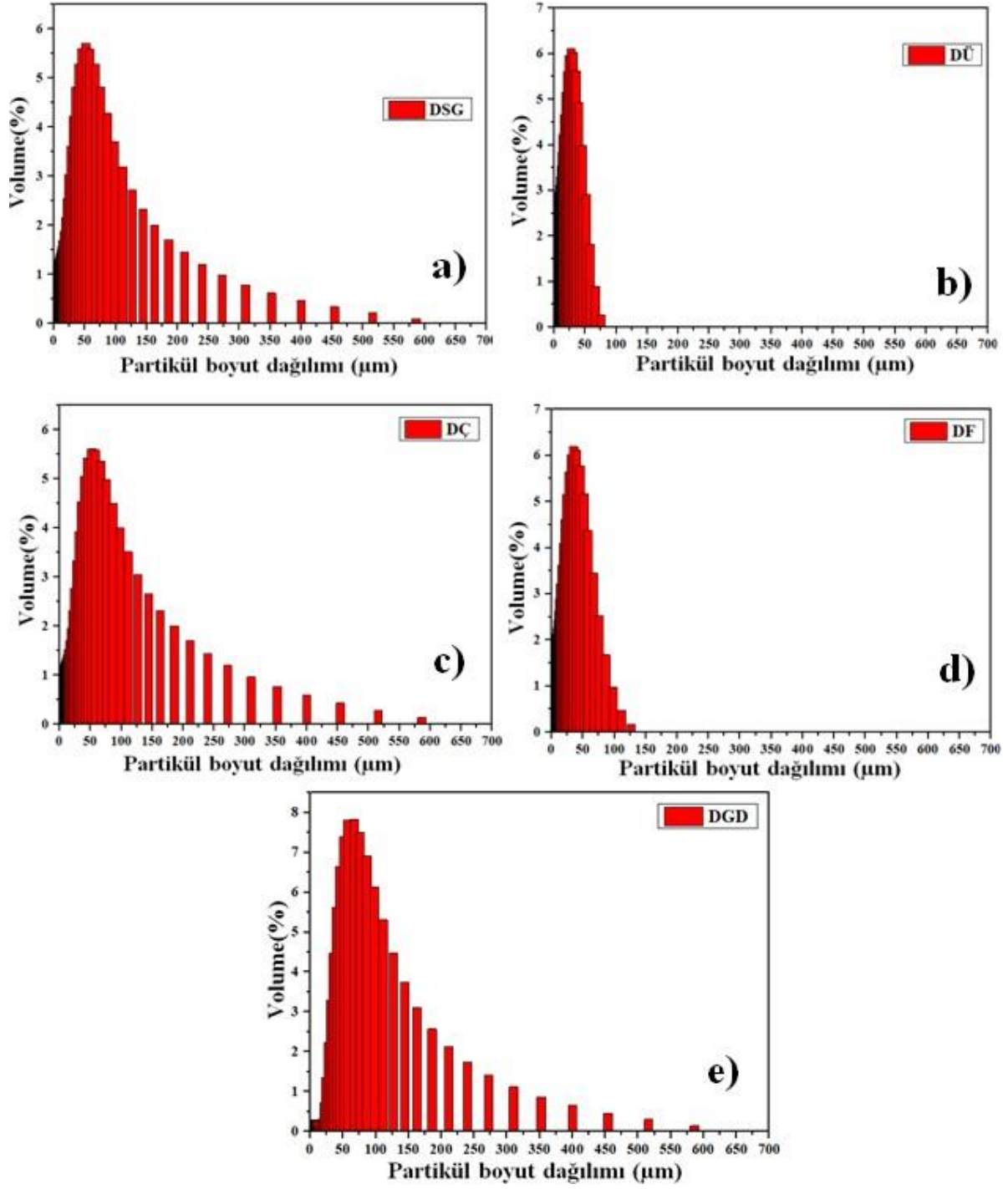
Çizelge 4.12. Optimizasyon öncesi ve sonrası incelik, blaine, XRF analiz sonuçları

CEMI 42,5 R	TARİH	32 µ %	Blaine cm ² /g	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	SO ₃ %	Na ₂ O %	K ₂ O %	Eq. Alk.	L.O.I %	Toplam %
D1 *	29.10.2020	11,0	3261	18,87	5,25	3,12	64,59	1,11	2,41	0,29	0,86	0,85	3,49	100,0
D2 *	29.10.2020	9,8	3295	18,77	5,28	3,27	64,72	1,20	2,44	0,30	0,82	0,85	3,18	100,0
D1 **	26.11.2020	11,8	3294	17,90	5,01	3,48	66,16	0,97	2,52	0,32	0,71	0,79	2,92	100,0
D2 **	26.11.2020	12,9	3160	18,18	5,21	3,52	65,69	0,88	2,50	0,32	0,72	0,80	2,97	100,0

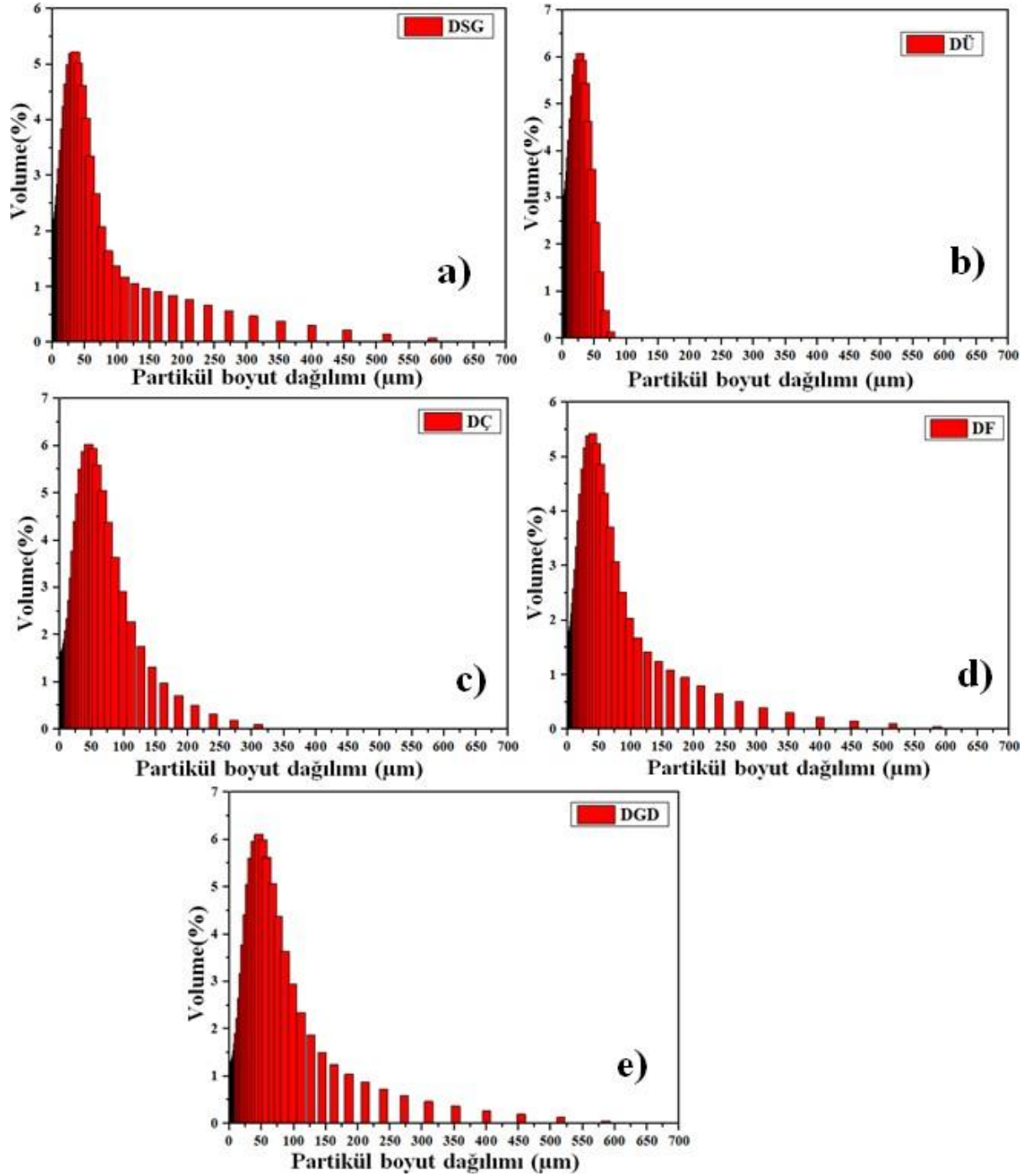
*: Optimizasyon öncesi, **: Optimizasyon sonrası

4.1.3. Partikül Boyut Analiz Sonuçları

Sunulan bu yüksek lisans tezi kapsamında, optimizasyon öncesi ve sonrası çimento örnekleri üzerinde partikül analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.7. ve 4.8.'de gösterilmiştir. Optimizasyon öncesi ve sonrası, değirmen seperatör giriş, değirmen ürün, değirmen çıkış, değirmen fitre ve değirmen geri dönüş kısımlarından alınan örnekler kullanılmıştır. Elde edilen veriler detaylı olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Değirmen parametrelerinde (değirmen giriş çıkış emişleri, seperatör temiz hava klape açıklıkları, filtre giriş sıcaklıkları, vb. gibi) yapılan değişiklikler sonrasında çimento örneklerinin hem partikül boyut dağılımında (Şekil 4.7. – Şekil 4.8. a,b,c,d,e) hem de spesifik yüzey alanlarında (Çizelge 5.13.) önemli derecede iyileştirmeler belirlenmiştir. Optimizasyon sonrası değirmen seperatör giriş, değirmen ürün, değirmen çıkış ve değirmen geri dönüş örneklerinin yüzey alanlarında artışı sırasıyla %81,45, %5,65, %48,83 ve %203,3 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.13.). Ancak değirmen filtre örneğinde ise %7,3 oranında azalma elde edilmiştir. Partikül boyut dağılımı, spesifik yüzey alanı ve partiküllerin homojen olarak elde edilmesi çimentoların kullanım amaçlarına göre önemli avantajlara sahip olmalarına neden olur. Bu parametreler, çimento örneğinin fiziksel ve mekanik özelliklerini direkt olarak etkiler. Çimento üretiminde yapılan optimizasyon çalışmalarında partikül boyut küçültülmesinin üretim ve dayanım artışı için yeterli olmayıp yüzey alanı ile desteklenmesi gerekli olabilir. Çimento ve suyun karıştırılması sonucunda oluşan kimyasal reaksiyon hidrasyon olarak adlandırılır. Bu reaksiyon ekzotermik bir reaksiyon olması sonucu ısı açığa çıkar. Su ve çimento arasındaki reaksiyon boyunca gerçekleşir. Bu bağlamda çimento partikül boyutu, spesifik yüzey alanı ve homojenliği hidrasyon reaksiyonu boyunca önemli etkiye sahip olacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.7. Optimizasyon öncesi değirmen numunelerinde partikül boyut dağılımı sonuçları a) Değirmen seperatör girişi, b) Değirmen ürün, c) Değirmen çıkış, d) Değirmen filtre, e) Değirmen geri dönüş.



Şekil 4.8. Optimizasyon sonrası değirmen numunelerinde partikül boyut dağılımı sonuçları a) Değirmen seperatör girişi, b) Değirmen ürün, c) Değirmen çıkış, d) Değirmen filtre, e) Değirmen geri dönüş.

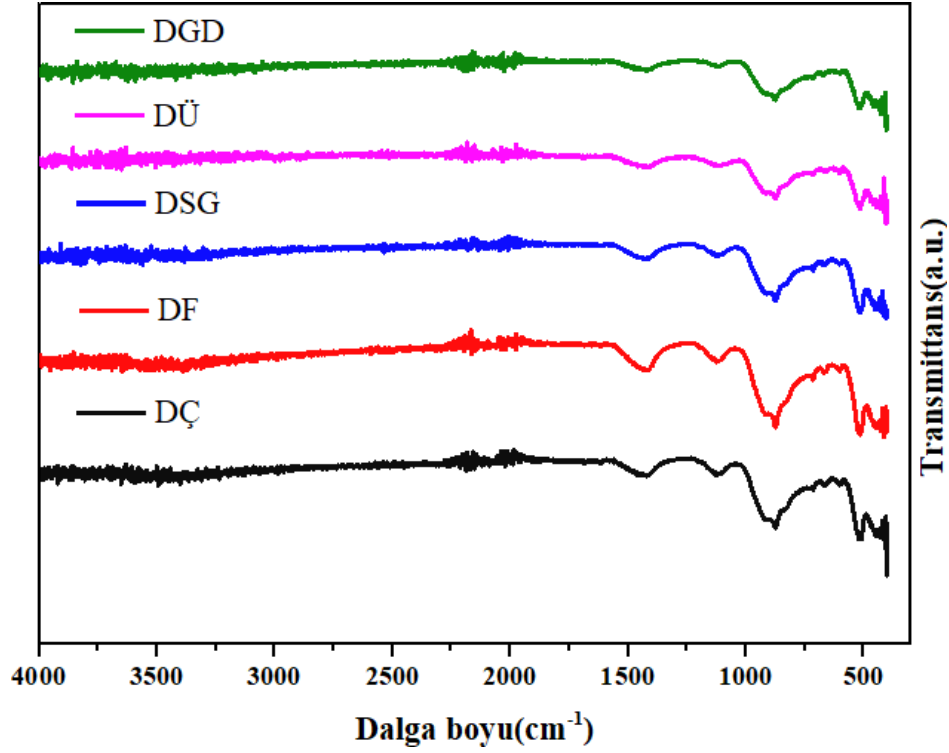
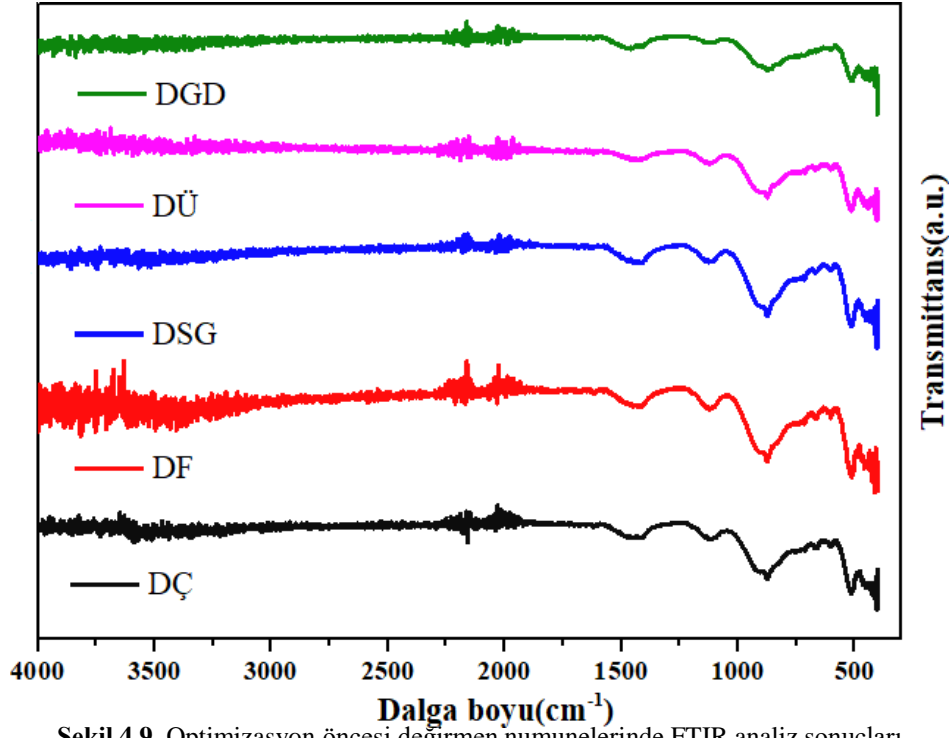
Çizelge 4.13. Elde edilen çimentoların spesifik yüzey alanları

Malzeme	Spesifik yüzey alanı(m²/kg)
1 DSG*	117.0
2 DÜ*	267.2
3 DÇ*	107.5
4 DF*	200.9
5 DGD*	48.03
1 DSG**	212.2
2 DÜ**	282.3
3 DÇ**	160.0
4 DF**	186.2
5 DGD**	145.7

*: Optimizasyon öncesi, **: Optimizasyon sonrası

4.1.4. FT-IR Analiz Sonuçları

Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tezi kapsamında elde edilen çimento malzemelerin FT-IR analizleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Kimya Mühendisliği Laboratuvarındaki Kimya Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Agilent Cary 360 marka IR cihazında; ATR (Attenuated Total Reflection) tekniği kullanılarak 4000-300 cm⁻¹ dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen FT-IR analiz sonuçları Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Optimizasyon öncesi ve sonrası çimento örneklerine ait FT-IR analiz sonuçları hemen hemen hepsinin benzer olduğu belirlendi. Fiziksel olarak yapıda adsorplanan suyun H-OH esnemesi ve H-O-H bükülmesi 3472 cm⁻¹ ve 1639 cm⁻¹ dalga boylarında gözlemlendi. CaCO₃ yapısına ait bant ise 1458 cm⁻¹ belirlendi. Ancak 1353 ile 1573 cm⁻¹ dalga boyları arasında CaO yapısının olduğu öngörülmektedir. Si-O-Si ve Si-O-Al yapılarına atanan dalga boyları ise 1140 cm⁻¹ ve 926 cm⁻¹(kuvars yapıları) olarak belirlendi. 674 cm⁻¹ ve 519 cm⁻¹ dalga boyları Si-O bükülmesine aittir. Ayrıca alkali yapıya ait (750 cm⁻¹) pik bant genişliği ve alanının çok düşük olduğu gözlemlendi. Alkali silika reaksiyonları (alkali-agrega) sonucunda suyu adsorbe edebilen jeller oluşur. Bazı durumlarda bu jeller negatif etkilere neden olabilir (genleşerek beton yapının çatlaması). Alkali yapının miktar ile Si-O-Al (926 cm⁻¹) yapısı arasında bir ilişki olduğu belirlenmiştir (Springfield, 2011).



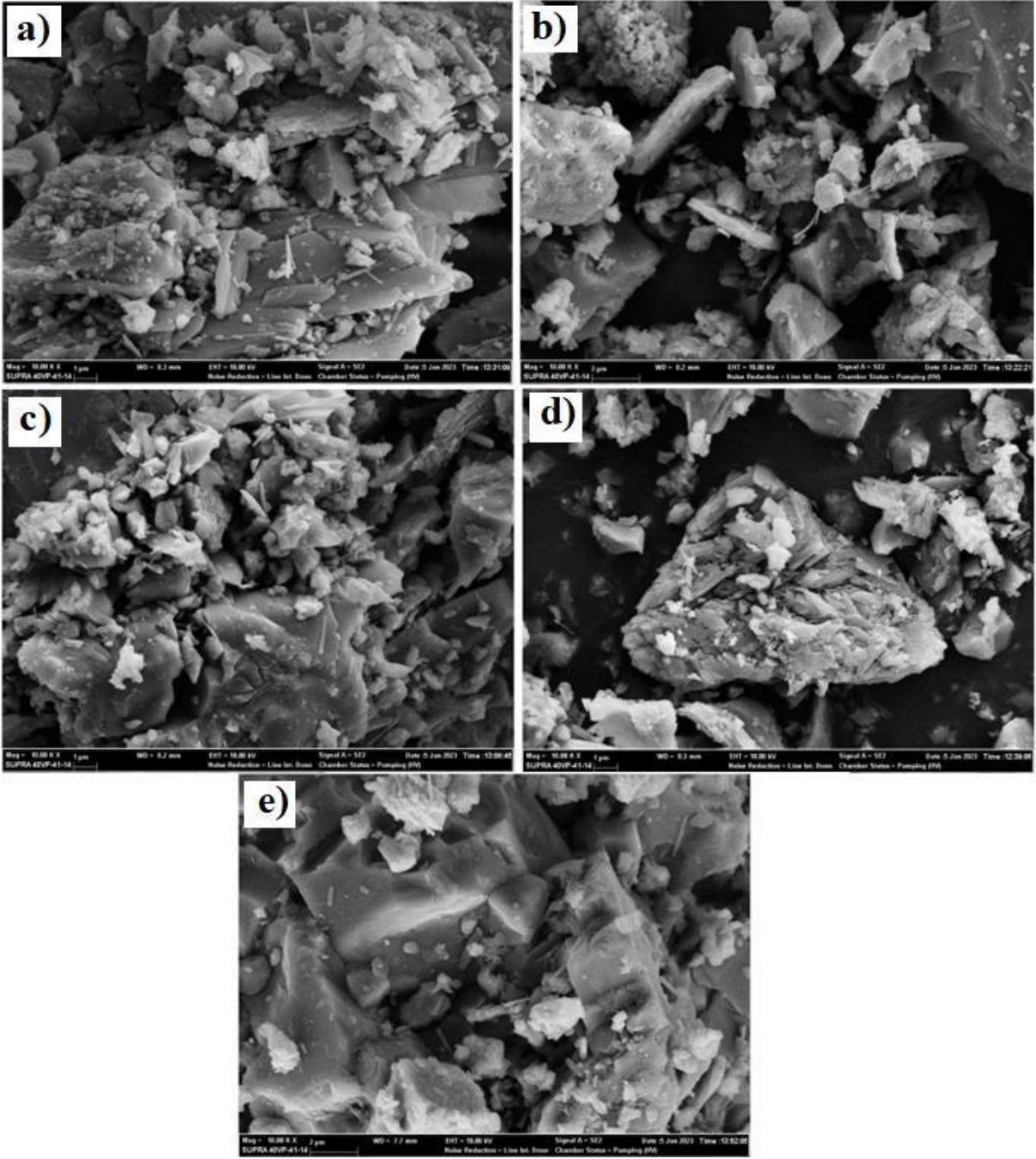
4.1.5. SEM/EDX ve MAPPING Analiz Sonuçları

Elde edilen çimento örneklerinin yüzey topograflarının belirlenmesi, elementel içeriklerinin ve elementlerin haritalandırılmalarının elde edilmesi için SEM/EDX ve MAPPING analizleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı (BARUM) bünyesinde yer alan Zeiss SupraVP 40 cihazıyla yapılmıştır. İlk olarak örneklere iletkenlik kazandırılması için vakumlu ortamda altın (Au elementi plazma haline getirilerek) kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numunelerin SEM analizleri farklı büyütme oranlarında yapılmıştır (Çizelge 4.14. ve Çizelge 4.15.). Çimento örnekleri içerisinde yer alan dört temel oksit yapıya ait Al, Ca, Si, Fe elementleri yanında S, Mg, K ve Na elementlerinin EDX analizleri gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.16.). Ayrıca dört temel oksit yapısındaki elementlerin MAPPING analizleri yapılmıştır elde edilen sonuçlar Çizelge 4.14.'de verilmiştir. Hidratasyon süreçlerinde önemli etkiye sahip olan ve çimentonun ana bileşenlerini oluşturan ana oksitleri iyi anlamak gerekir. Özellikle Portland çimentosunda yer alan oksitlerden CaO, hammadde karışımındaki kalkerden, SiO₂ ve Al₂O₃ ise yapıdaki kilden ileri gelir. Ayrıca kullanılan hammadde bünyesinde bir miktar da Fe₂O₃ vardır. Yani bu oksitler, çimentonun ana bileşenlerini meydana getiren temel oksitlerdir. Ayrıca, SO₃ dışındaki bütün diğer oksitler çimento klinkerini meydana getiren oksitlerdir. SO₃, çimento içerisinde bulunan alçıdan ileri gelir. Diğer taraftan çimentonun yapısına ait MgO (magnezyum oksit) ve alkalilerin yararlı bir fonksiyonu yoktur. Bu oksitler kullanılan hammaddelerde yer alan oksitlerdir. Fazla miktarlarda yer aldıkları takdirde çimento hamurunda ve betonda genişmeye neden olarak zararlı etkileri olmaktadır.

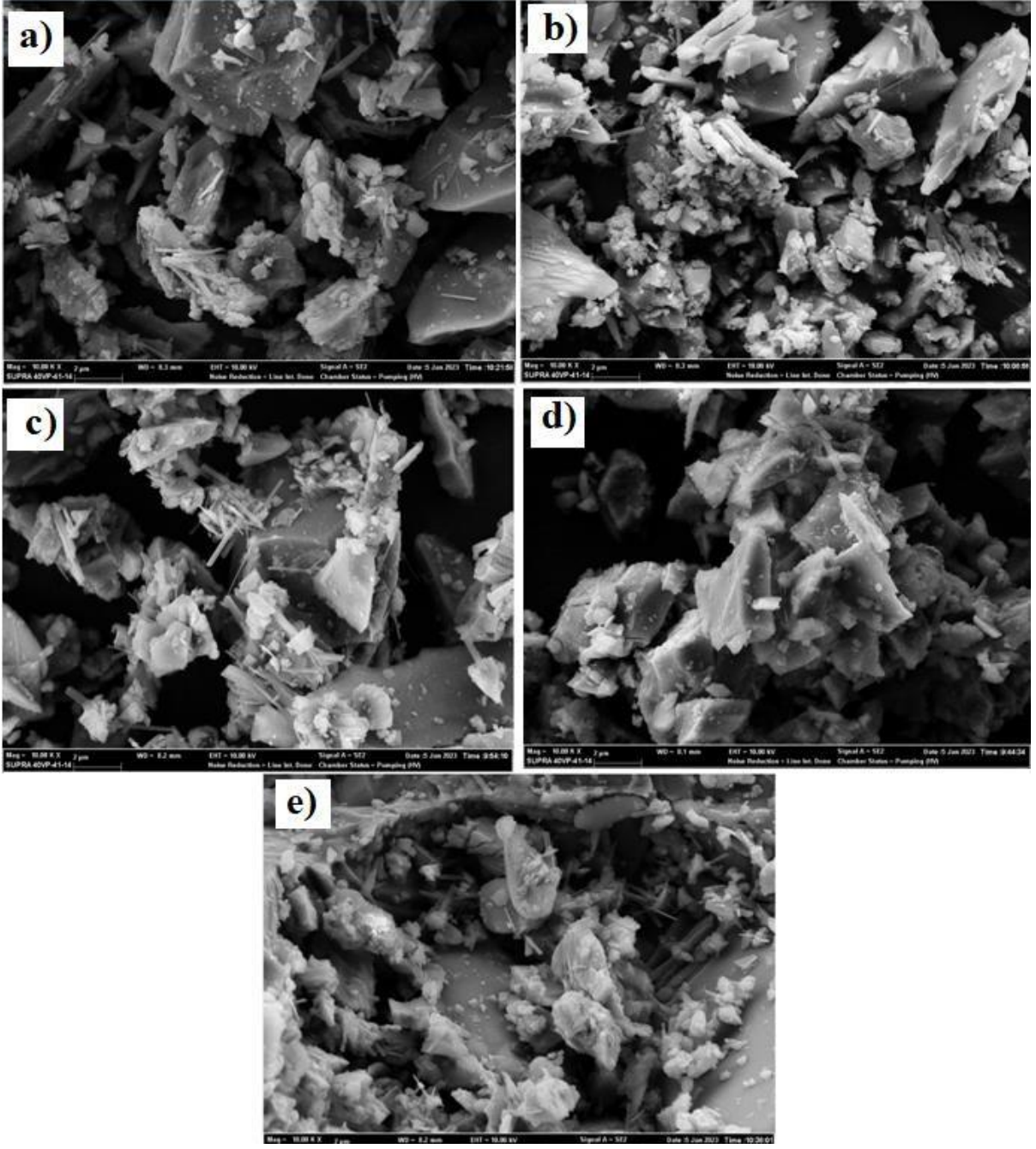
Le Châtelier, Portland çimentosunun hidratasyonunun, suda en çözünür silikat fazından kalsiyum silikat türlerinin çözünmesiyle başladığını belirtmiştir. Bu işlemi, karmaşık, zayıf kristalli kalsiyum-silikat-hidratların (genel olarak C-S-H jeli olarak adlandırılır) çökeltilmesi ve Ca(OH)₂, portlanditin kristalleştirilmesi takip eder (Taylor, 1997). C-S-H jeli, Portland çimento pastalarındaki ana hidratlı bileşendir ve elde edilen harç ve betonların dayanım ve dayanıklılığında ana sorumludur. Trikalsiyum silikat Ca₃SiO₅'in saf olmayan bir formu olan alit, portland çimentolarında bulunan ana fazdır ve element ikamelerinden dolayı biraz değişken bir bileşime sahiptir (Taylor, 1997). Herhangi bir alitenin hidrasyonu, başlangıçtaki hızlı (minor ölçekte) çözülmeye ek olarak zamanla üç ana aşama gösterir: Bunlar; i) indüksiyon (hareketsiz dönem olarak da bilinir), ii) hızlanma; ve iii) yavaşlama (Bullard ve diğerleri 2011). Benzer kinetik profiller, çeşitli heterojen hidrasyon süreçlerinde, (örneğin mineral ayrışması (Nugent ve diğerleri 1998) ve cam değişimi (Cailleteau ve diğerleri, 2008) gerçekleşir. Bu erken yaştaki

hidrasyon davranışını açıklayan iki ana teori vardır. İlki, 'koruyucu tabaka' olarak bilinir ve yoğunluğu ve yapışması zamanla değişen alit parçacıklarının yüzeyleri üzerinde bir C-S-H jel difüzyon bariyerinin çökmesinden oluşur. İkincisi, 'jeokimyasal model' olarak bilinir ve dağlama çukuru oluşumundan basamaklı geri çekilmeye doğru gelişen alit çözünme mekanizması ile ilgilidir (Scrivener ve diğerleri, 2015). Bir asırlık araştırmalara rağmen, bu tür zaman evriminin altında yatan mekanizmalar hala güçlü bir şekilde tartışılmaktadır (Nicoleau ve diğerleri, 2018; Gartner, 2018). C-S-H yapısı hidrate olan ürünlerin yaklaşık %60'ını meydana getirir. Bu yapılar çimentoya bağlayıcılık özelliği ve dayanım kazanmasını sağlar (Cuesta ve diğerleri, 2018). Optimizasyon öncesi ve sonrası çimento örneklerinin SEM analiz sonuçları incelendiğinde C-H ve C-S-H jel yapıları gözlenmiştir (Çizelge 4.14. ve 4.15.) Diğer SEM/EDX ve MAPPING analiz sonuçları EK-1'de verilmiştir. Çimento ve su kullanılarak elde edilen betonun matrisi, C-S-H jelleri (jeller yapıya geçirimsizlik özellik katarlar) ile agregayla birleşmesiyle oluşur. Birçok gerçekleştirilen çalışmada, C-S-H jel agregatlarının, jel gözenek suyu olarak bilinen nano gözenekler içinde suyu (Jennings, 2008) çevreleyen globüller, diskler ve folyolar (Allen ve diğerleri 2007; Masoero ve diğerleri, 2012; . Chiang ve diğerleri, 2013; Cappelletto ve diğerleri, 2013) olarak tanımlanan zayıf kristalli birbirine bağlı nanopartiküller içerdiğini göstermiştir. Bu jel su, C-S-H "yığın" yoğunluğuna bağlı olarak zamanla gelişebilir. Jel içindeki bu suyun, sistemin özelliklerini değiştirmeden giderilemeyeceği için kılcal gözenek suyundan (serbest su olarak bilinir) farklı olduğunu işaret etmekte fayda vardır (Papatzani ve diğerleri, 2015).

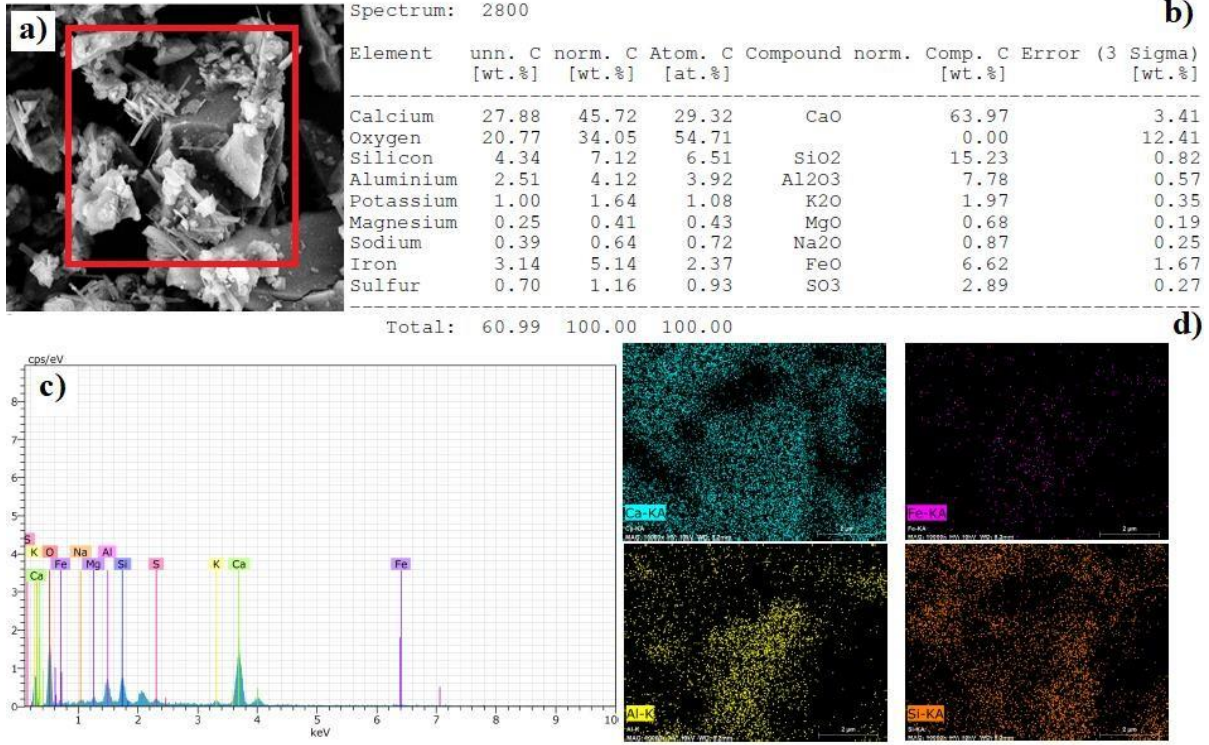
Beton içerisindeki bazik özellik kalsiyum hidroksitten (C-H) meydana gelir. Bu yapının zayıf özelliğinden dolayı beton dayanımına her hangi bir etkisi yoktur. Negatif etkisi nedeniyle beton içerisinde fazla miktarda olması istenmez (fazla olması çimento hamuru ile agrega ara yüzeylerinde ve boşluklarda birikirler). Ayrıca bu yapılar suyla temas ettiği zaman kolay çözünürler. Kolay çözümleri gözenek (poroziteye) oluşumuna neden olur. Ayrıca SEM analiz sonuçları C-A-S-H (etrenjit) yapılarına ait oluşumların sınırlı düzeyde oldukları gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar ile partikül analiz sonuçları birlikte incelendiğinde, optimizasyon sonrası, çimento ürünlerinde önemli iyileştirmelerin elde edildiği belirlenmiştir.



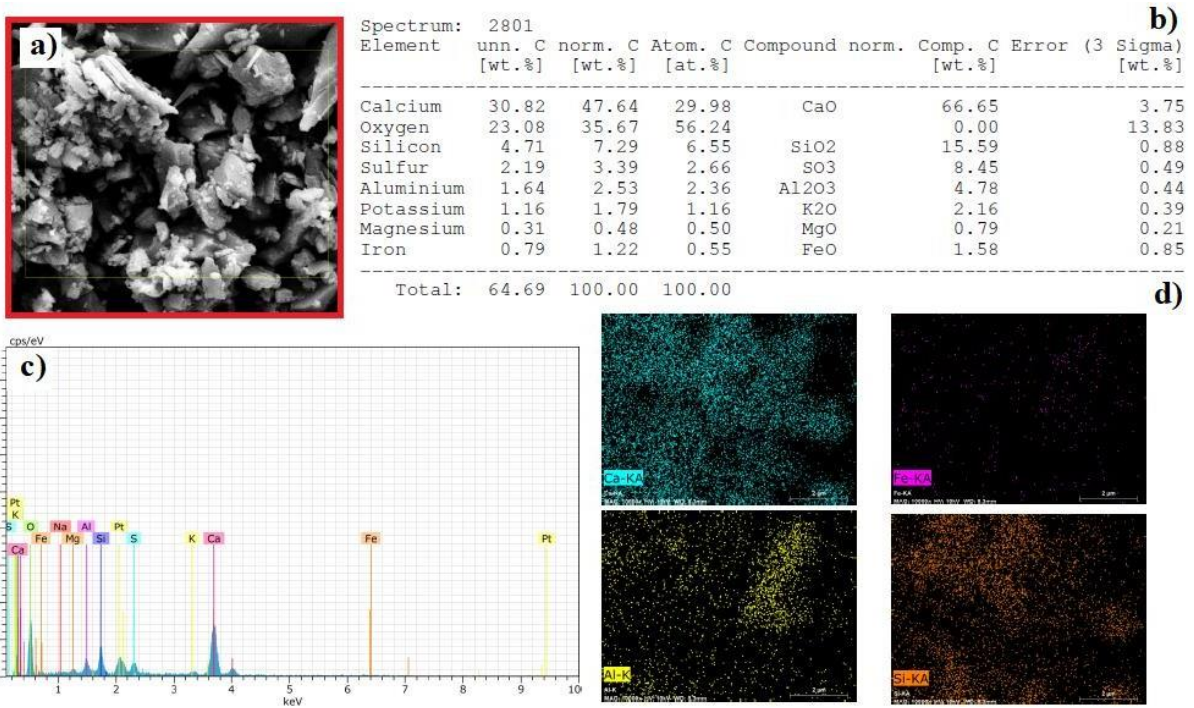
Çizelge 4.14. Optimizasyon öncesi çimento örneklerinin SEM görüntüleri a) DSG, b) DÜ, c) DÇ, d) DF ve e) DGD (10kx).



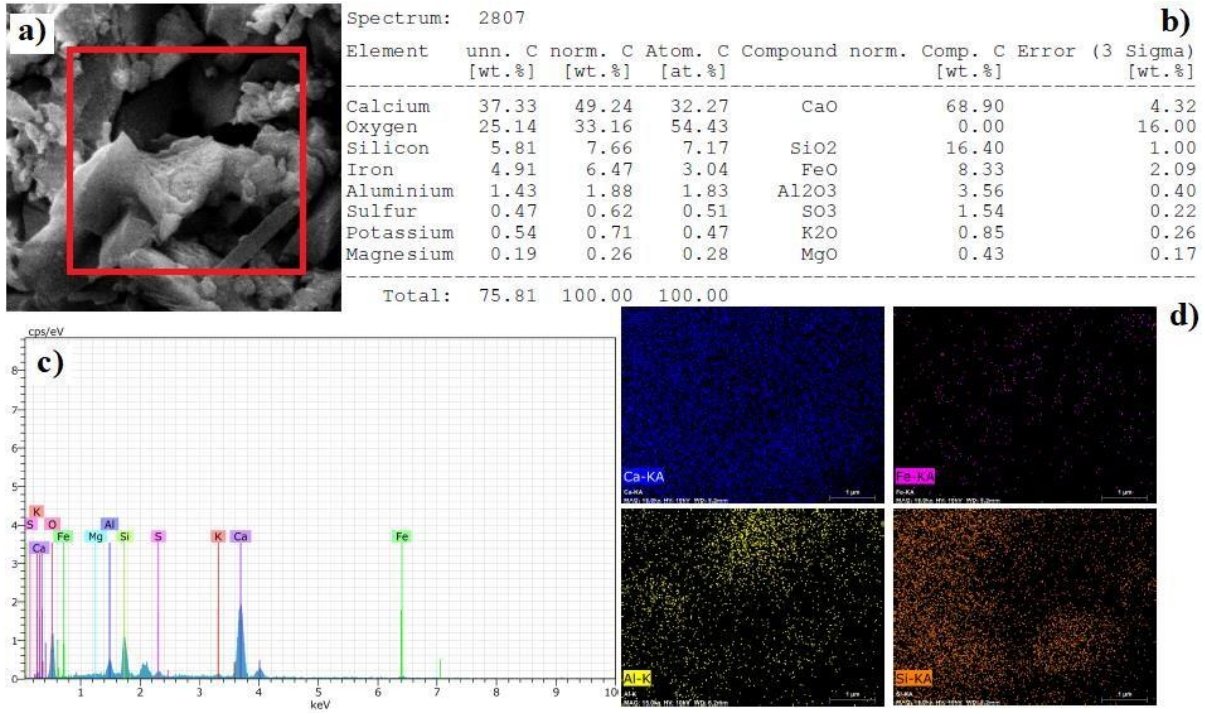
Çizelge 4.15. Optimizasyon sonrası çimento örneklerinin SEM görüntüleri a) DSG, b) DÜ, c) DÇ, d) DF ve e) DGD (10kx).



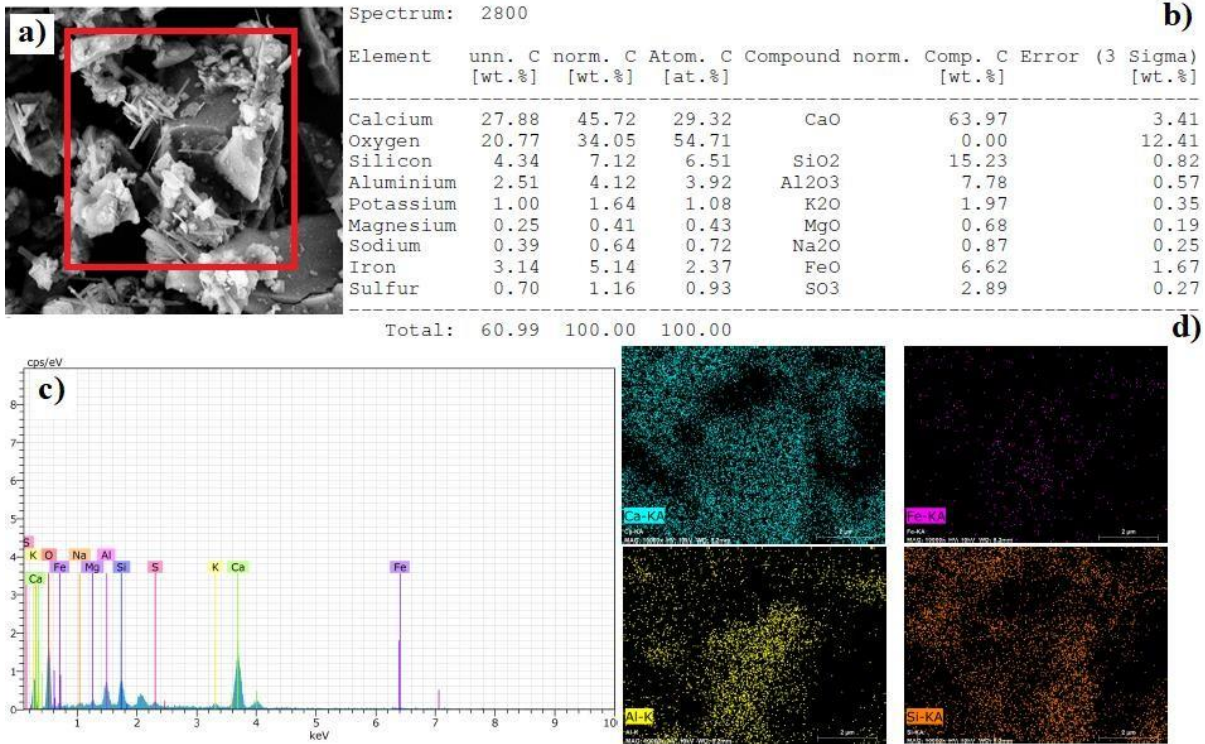
Çizelge 4.16. Optimizasyon sonrası çimento örneklerinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri a) SEM, b) EDX spektrum sonuçları, c) EDX spektrumu ve d) MAPPING görüntüleri.



Çizelge 4.17. Optimizasyon sonrası çimento DÜ örneğinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri a) SEM, b) EDX spektrum sonuçları, c) EDX spektrumu ve d) MAPPING görüntüleri.



Çizelge 4.18. Optimizasyon öncesi DÇ çimento örneğinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri a) SEM, b) EDX spektrum sonuçları, c) EDX spektrumu ve d) MAPPING görüntüleri.



Çizelge 4.19. Optimizasyon sonrası çimento DÇ örneğinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri a) SEM, b) EDX spektrum sonuçları, c) EDX spektrumu ve d) MAPPING görüntüleri.

4.1.6. CHN-S Analiz Sonuçları

Optimizasyon öncesi ve sonrası DSG, DÜ, DÇ, DF ve DGD kısımlarında alınan çimento toz örnekleri üzerinde CHN ve S elementel analizleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı (BARUM) bünyesinde bulunan LECO/CHN-S 628 cihazıyla gerçekleştirilmiştir. CHN analizleri 950°C ve S analizleri ise 1300 °C'de yapılmıştır (He inert ortamda). Elde edilen analiz sonuçları Çizelge 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4.20 Elde edilen çimentoların CHN- S değerleri

Malzeme	C(%)	H(%)	N(%)	S(%)
1 DSG*	0.532	-	-	1.890
2 DÜ*	0.711	-	-	1.060
3 DÇ*	0.477	-	-	4.540
4 DF*	0.585	-	-	1.590
5 DGD*	0.345	-	-	1.480
1 DSG**	0.379	-	-	0.004
2 DÜ**	0.546	-	-	0.124
3 DÇ**	0.382	-	-	0.668
4 DF**	0.450	-	-	0.349
5 DGD**	0.357	-	-	0.240

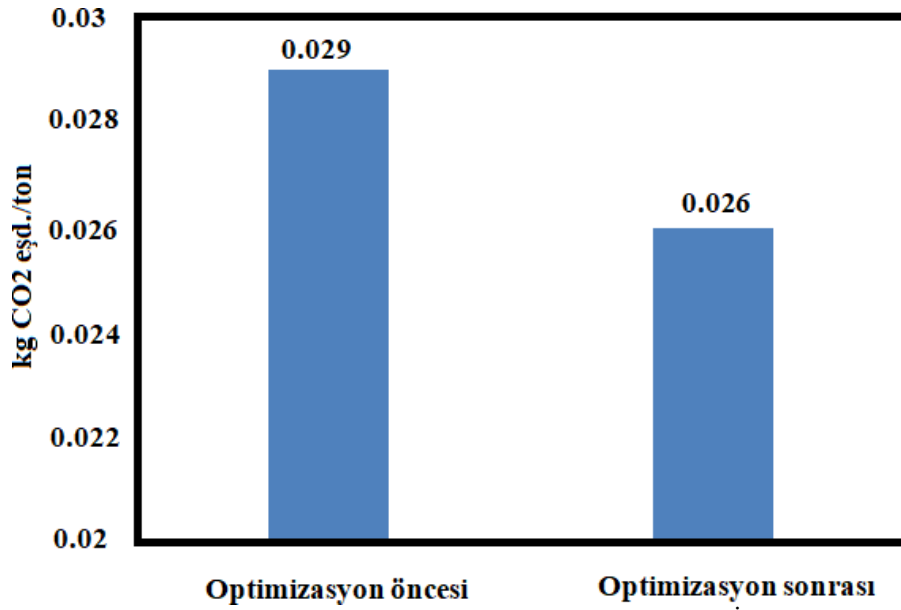
*: Optimizasyon öncesi, **: Optimizasyon sonrası

Optimizasyonda yapılan iyileştirme süreçlerinin özellikle S değerlerinde önemli azalmalara neden olmuştur (Çizelge 4.14). Ayrıca C değerinde de düşüş elde edilmiştir. Emisyon artışına sebep olacak gazların değerlerinde düşüş gözlenmesi sürdürülebilir devamlılık için önemlidir. Ayrıca analiz sonuçları EK-3'te verilmiştir.

4.1.7. KAİ analiz sonuçları

Gerçekleştirilen bu yüksek lisan tez çalışmasının bu bölümünde uygulanan optimizasyon işleminin sera gazı emisyonuna olan etkisi değerlendirilmiştir. KAİ süreç boyunca atmosfere salınan sera gazlarının CO₂ cinsinden değeri olarak tanımlanır (Wiedmann ve Minx, 2008). Sunulan bu çalışmada KAİ izi hesaplamaları uluslararası standartlar ve yöntemler olan ISO 14064 – 1:2006 (ISO, 2006) ve GHG Protokol (GHG Protocol, 2015) standartlarına göre elde edilmiştir. Enerji tüketimine bağlı olarak oluşan sera gazlarının neden olduğu KAİ değerleri Çizelge 4.10'daki verilerin 3 aylık ortalama ve üretim kapasite artışından dolayı kullanılan kamyon sayısındaki artış dikkate alınarak hesaplanmıştır. Enerji tüketimindeki azalmaya bağlı olarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.11'de verilmiştir. Kamyonların ortalama sevkiyat yaptıkları mesafe 150 km olarak alınmış hesaplara gidiş-dönüş

olarak katılmıştır. Yani her bir sevkiyat için mesafe 300 km alınmıştır. Tüketilen mazot miktarı ise her 100 km için 30 L. (30 L/100 km) olarak işleme katılmıştır. Yani günlük üretim kapasite artışından dolayı günlük olarak 12 kamyon için 1080 L fazladan yakıt tüketimi olacaktır. Optimizasyon işlemleri sonrası elektrik tüketimindeki azalmanın ton başına KAİ değerindeki iyileştirmenin %10,34 olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu değer günlük ve yıllık üretim kapasitesi düşünüldüğünde çok önemli olduğu söylenebilir. Ancak kamyon sevkiyat sayısının artışına bağlı olarak oluşan yakıt tüketimi sonucu sera gazı emisyonu artış olacaktır. Ancak bu hesaplama ürün bazında tüm kapsamlar dikkate alındığında sevkiyat dolayısıyla meydana gelen artışın etkisi diğer iyileştirmeler yanında düşük olacağı ön görülmektedir.



Şekil 4.11. Değirmenlerin enerji tüketimine bağlı olarak KAİ değerleri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çimento üretiminde, saatlik üretim ve kalite değerlerine direkt etki eden parametreler, incelik, blaine, dayanım ve katkı yüzdesi değerleridir. Bu değerlerin her zaman sabit kalması beklenemeyeceği gibi her işletmede farklılık gösterebilir. Bu parametrelerin değerleri kalite standartları dikkate alınarak işletme şartlarına göre belirlenerek üretim yapılabilir.

Yapılan bu çalışmanın temel amacı çimento değirmenlerinde ürün kalitesini düşürmeden daha az enerji tüketimiyle üretim kapasite artışının sağlanmasıdır. Yani, çimento değirmenlerinin üretim kapasitesinin teorik kapasite değerlerine çıkarılması çalışmanın temel hedefiydi. Optimizasyon öncesi ve sonrası analiz sonuçları detaylı olarak incelenmiş, kapasite artışı, ürün kalitesi, enerji tüketiminin azaltılması konularında önemli iyileştirmeler gözlenmiştir.

Seperatör temiz hava klapelerinin açıklığının %30-50 seviyelerinden %80-100 seviyelerine artırılması değişikliğiyle seperatör geri dönüş tonajının 200 ton/saat değerlerinden yaklaşık 150 ton/saat değerlerine çekilmesi sağlanmış, incelik değerlerinde her iki değirmende yaklaşık %18'lik artışla daha az öğütme süresi ve dolaylı olarak daha az enerji tüketimi sağlanmıştır. 28 günlük dayanım değerlerinde yaklaşık %4 artış gözlenmiştir (bu artış 2-2,5 mPa dayanıma denk gelir). Her iki değirmen için, saatlik üretim değerleri incelendiğinde 73-74 ton/saat üretim değerlerinden 79-80 ton/saat üretim değerlerine ulaşılmıştır. Böylece daha iyi kalitede ve düşük enerji tüketiminde yaklaşık %8 kapasite artışı sağlanmıştır.

Sunulan bu yüksek lisans tezinde yapılan optimizasyon çalışmaları, hem ürün kapasite artışına, hem de enerji tüketiminin azaltılmasına önemli katkı sağlamıştır. Bu gelişmelere ek olarak ürün kalitesi korunmuş hatta artışlar gözlenmiştir. Diğer taraftan yapılan bu iyileştirmelerin sürdürülebilir ekonomiye ve doğaya pozitif katkıları olduğu belirtilmiştir. Son olarak inşaat sektörünün ana maddesi ve canlıların yaşam alanlarının inşa edilmesinde kullanılan ana malzeme olan çimento kalitesinin sosyal yaşama etkileri vurgulanmıştır. Bir başka ifadeyle canlıların güven ortamında yaşamlarını sürdürmeleri için çimento kalitesinin her açıdan olumlu katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

6. DEĞERLENDİRME

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında bilyeli değirmenlerde yapılan optimizasyon çalışmasındaki iyileştirmelere ek olarak aşağıda verilen pozitif gelişmeler, diğer hedefler olarak sıralanabilir,

- Üretim kapasitesinde önemli artış sağlanması,
- Enerji tüketiminde iyileştirmeler yapılması,
- Değirmenlerin duruşa alınmadan optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesi (değirmenlerin durdurulmasına bağlı olarak meydana gelebilecek ekonomik kayıpların minimuma indirilmesi).
- Çimento kalitesindeki iyileştirmelerin sosyal hayata pozitif etkilerinin değerlendirilmesi
- Enerji tüketimindeki iyileştirmelerle biyosfere verilen sera gazı emisyonlarının azaltılması,
- Ayrıca KAI değerlerinin elde edilmesi
- Elde edilen iyileştirmelerin optimizasyon öncesi ve sonrası maliyet analizi yapılabilir.

KAYNAKÇA

- Allen, A. J., Tomas, J. J. & Jennings, H. M.** (2007). Composition and density of nanoscale calcium-silicate-hydrate in cement. *Nat. Mater.* 6, 311–316
- Anon A.**, (2010). Classifiers, Erişim: 04.11.2022. <http://www.bikudo.com/airclas>
- Arslanhan, M.**, (2016). Çimento üretim proseslerinde eritiş metoduyla hazırlanmış numunelerin WDXRF analizleri ve hata etkilerinin incelenmesi. *Master's thesis, Bursa Teknik Üniversitesi*, Bursa.
- ASTM C 150/C150M-21: Standard specification for port land cement
- Astrom, K. and Hagglund, T.**,(2006).Advanced PID control. Research Triangle Park: Instrumentation, Systems and Automatic Society
- Avşar, H.** (2006). Control, optimization and monitoring of Portland cement (PC 42.5) quality at the ball mill. *Master's thesis, İzmir Institute of Technology*. İzmir.
- Azapagic, A.,& Perdan, S.** (2000). Indicators of sustainable development for industry: A general framework. *Process Safety and Environmental Protection*, 78(4), 243. doi:<https://doi.org/10.1205/095758200530763>.
- Cappelletto, E.** et al. (2013).Comb-Shaped Polymers as Nanostructure Modifiers of Calcium Silicate Hydrate: A ²⁹Si Solid-State NMR Investigation. *J. Phys. Chem. C* 117, 22947–22953
- CEMBUREAU. (1997), Alternative Fuels in Cement Manufacturing: Technical and Environmental Review. Brussels, The European Cement Association: 24.
- Chiang, W.-S.** et al. (2013). Microstructural changes of globules in calcium–silicate–hydrate gels with and without additives determined by small-angle neutron and X-ray scattering. *J. Colloid. Interface Sci.* 398, 67–73
- Cuesta, A., Zea-Garcia, J.D., Londono-Zuluaga, D.** et al. Multiscale understanding of tricalcium silicate hydration reactions. *Sci Rep* 8, 8544 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26943-y>
- Çimento Üretimi Sektörel Uygulama Kılavuzu.** Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sanayiden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Belirlenmesi ve Azaltılmasına Yönelik Uygulamanın Kolaylaştırılmasının Sağlanması Projesi.

Çolak, G. & Atılgan Türkmen, B. (2023). Kurumsal Karbon Ayak İzi Analizi: Bir Kimya Fabrikası için Örnek Hesaplama. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 9 (1), 191-201. DOI: 10.21324/dacd.1120858

Çolak, S. S., (2018). Çimento Öğütme Uygulamalarında Bilya ve Malzeme Özelliklerinin Bilya Aşınma Sonuçları Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, Ankara.

ÇŞİB. (2021). Elektrik Enerjisinin Birincil Enerji Ve Sera Gazı Salımı Katsayıları. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü, Erişim: 22.06.2022 <https://meslekihizmetler.csb.gov.tr/elektrik-enerjisinin-birincil-enerji-ve-sera-gazi-salimi-katsayilari-2021-yilindan-itibaren-kullanilmak-uzere-guncellenmistir-duyuru-411795>.

Dagci, O.H., Efe, M.O., Kaynak, O. (2001). A non linear learning control approach for a cementmillingprocess. (CCA '01). *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications page(s): 498-503*

Dorum, A. , Koçak, Y. , Yılmaz, B. & Uçar, A. (2013). Uçucu kül katkılı çimento hidrasyonuna elektrokinetik özelliklerin etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2 (3), <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6685/88569>

Dünya çimento üretimi ve tüketimine ilişkin genel değerlendirme. (2014). Çimento cam seramik ve toprak ürünleri ihracatçıları birliği.

Efe, M. O. and Kaynak, O.,(2002). Multi variable non linear model reference control of cement mills. 15th Triennial World Congress, Barcelona.

Erdem, A., Ergün, Ş.L., Benzer, H., (2005). Modelleme yardımıyla çimento öğütme devresi tasarımında Morrell ve Mann yönteminin sınanması. *Madencilik Dergisi*, 46(4), 3 - 17.

Erenoğlu, T., Koç, İ., Şengül, Ö., Tarhan, M., Taşdemir, M. A., (2007). Doğal ve Endüstriyel Mineral Katkılar İçeren Betonların Tasarımı, Mekanik Özellikleri ve Dürabilitesi. *7. Ulusal Beton Kongresi TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul*, 291-300

Ergin, H., Gür, O.,(2001). Çimento öğütme devrelerinin simülasyonla tasarımı ve optimizasyonu. *4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu 1, İzmir*.

Garetti, M., & Taisch, M. (2012). Sustainable Manufacturing: Trends and Research Challenges. *Production Planning Control*, 23(2-3), 83.

GHG Protocol (2015). "GHG Protocol Scope 2 Guidance." [Erişim 09.01.2023, https://ghgprotocol.org/scope_2_guidance].

Godwin, P.S., Supparaj, P., (2010). Evolutionary Design of Intelligent Controller for a Cement Mill Process. *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887) *Volume 1 – No. 10*

Gülşen. S., (2016). Çimento Öğütme Prosesinin Modellenmesi Gözlemleyici Ve Üst Denetleyici Tasarımı *Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*

ISO 14064-1:2006. Greenhouse gases — Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals. Geneva, Switzerland.

Jadot, F., Bastin, G., Wertz, V., Magni, L., (1998). Global state feedback stabilisation of cementmills. *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control, Volume 3, Issue, Page(s):3168 – 3170*

Jennings, H. M., (2008). Refnements to colloid model of C-S-H in cement: CM-II. *Cem. Concr. Res.* 38, 275–289

Karataş, C., & Şimşek, Ş. (2022) Corrosion resistance of commercial glazes of floor tiles. *Materials Testing*, 64(12), 1860-1870. <https://doi.org/10.1515/mt-2022-0124>.

Karbassi, A. R., Jafari, H. R., Yavari, A. R., Hoveidi, H., & Kalal, H. S. (2010). Reduction of environmental pollution through optimization of energy use in cement industries. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 7(1), 127-134.

Kuleli, Ö., (2009). Çimento mühendisliği el kitabı. *TÇMB – AR-GE Enstitüsü, Ankara.*

Labahn, O., (1971). *Cement Engineers' Handbook*, Bauverlag,

Li, X., Yu, H., Yuan, M., (2012). Modeling and optimization of cement raw materials blending process. *Mathematical Problems in Engineering*. [doi:10.1155/2012/392197](https://doi.org/10.1155/2012/392197)

Masoero, E., Del Gado, E., Pellenq, R. J.-M., Ulm, F.-J. & Yip, S. (2012). Nanostructure and Nanomechanics of Cement: Polydisperse Colloidal Packing. *Phys. Rev. Lett.* 109, 155503

Nakamura G., Aizawa T. and Nakase, K. (1986). Optimization of cement manufacturing process. *Onoda Cement Co., Ltd., 1-1-7, Toyosu Koto-ku, IFAC Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, Tokyo, Japan.*

Öztürk yıldırım, S & Bulmuş, T. (2009). X-ışını toz kırınım yöntemi ile bir seri çimento örneğinin nitel analizi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 25 (1-2) 183 - 196.

Papatzani, S., Paine, K. & Calabria-Holley, J. A. (2015). Comprehensive review of the models on the nanostructure of calcium silicate hydrates. *Constr. Build. Mater.* 74, 219–234

Prasath, P., Recke, B., Chidambaram, M. and Jorgensen, J. B., (2010). Application of softconstrained MPC to a cement mill circuit. *9th International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, Leuven, Belgium.*

Ramasamy, M., Narayanan, S. S. and Rao, Ch. D. P. (2005). Control of ball mill grinding circuit using model predictive control scheme. *Journal of Process Control*, 15(3), 273-283

Ramezani, A., Ramezani, H. B., Moshiri. (2007). The Kalman Filter Information Fusion for Cement Mill Control Based on Local Linear Neuro - Fuzzy Model. *Proceedings of 4th International Conference on Innovations in Information Technology*, pp. 183 –187

Sahasrabudhe, R., Sistu, P., Sardar G. and Gopinath, R., (2006). Control and optimization in cement plants. *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 26, no. 6, pp. 56-63, doi: 10.1109/MCS.2006.252832.

Springfield, T. (2011) Application of FTIR for quantification of alkali in cement. M.Sc. Thesis, University of North Texas, May USA.

Subbaraj, D. P., Anand, P. G. (2010). Evolutionary design of intelligent controller for a cement mill process. *International Journal of Computer Applications*, 1(10), 111-120.

Şimsek, V. (2015) Synthesis, characterization and investigation catalytic activity in the glycerol esterification reaction of acidic catalyst. Ph.D. Thesis, Gazi university graduate school of natural and applied sciences, January Turkey.

Şimsek, V. (2008) "Application of mercury porosimetry to three dimensional(3D) stochastic network model and researching network size effect on structure of porous media", MSc Thesis, Gazi University Graduate School of Natural and Applied Sciences.

Şimşek, V. & Murtezaoğlu, K. (2023). 3D Stochastic Network Modeling and Investigation of Network Size Effect on the Porous Media Structure of Ion Exchange Catalyst Amberlyst-35 with Computer Programs. *Gazi University Journal of Science*, 1-1. DOI: 10.35378/gujs.1011056.

Şimşek, V., Pat, Z. & Mürtezaoğlu, K. (2019). Reactive RED 120 Boyarmaddesinin Silika Esaslı Gözenekli Malzeme Üzerine Absorpsiyon Koşullarının İncelenmesi . *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi 6. Cilt* - Prof. Dr. Fuat Sezgin Bilim Yılı Özel Sayısı, 237-246. DOI: 10.35193/bseufbd.603274

Toraman Ö., Sönmez Y., (2012). Mikronize öğütmede havalı ayırıcıların tasarım değişkenleri. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1(2), 30-36.*

Tsamatsoulis, D. C., (2014). Optimizing the controls system of cement milling: process modeling and controller tuning based on loop shaping procedures and process simulations. *Brazilian Journal of Chemical Engineering, 31, 155-170.*

TS EN 197-1: Çimento-Bölüm 1 : Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. *Türk Standartları Enstitüsü (2012).*

Türkay, M. (2011). Optimizasyon Modelleri ve Çözüm Metodları.

United Nations. (1987). The Brundtland Commission, Our Common Future, The Report of the World Commission on Environment and Development Oxford University Press, Oxford

Van Breusegem, V., Chen, L., Bastin, G., Wertz, V., Werbrouck, V., & de Pierpont, C. (1996). An industrial application of multi variable linear quadratic control to a cement mill circuit. *IEEE Transactions on Industry Applications, 32(3), 670-677.*

Walchandnagar Industries Ltd., In technical collaboration with Magotteaux International S. A., Belgium. Separators.

Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A definition of ‘carbon footprint’. *Ecological economics research trends, 1, 1-11.*

Winston, W.L. (2003), Operations Research: Applications and Algorithms, 4. baskı, International Thomson Publishing, Belmont, CA.

Yıldız, N. (2015). Klinker Üretimi. *Madencilik ve Yer Bilimleri Dergisi, 88-91.*

Erişim: 18.09.2021. <https://www.hira.com.tr/Tr/Urun/Vakumlu-Eleme-Cihazı-Alpin-Air-Jet-Eleme-Sistemi>

Erişim: 22.09.2021. troy-met.com/haber/15/x-sini-fluoresans-xrf-nedir

Erişim: 05.10.2022. <https://slideplayer.com/slide/12697794/>

Erişim: 05.10.2022. <https://www.thecementgrindingoffice.com/separators>

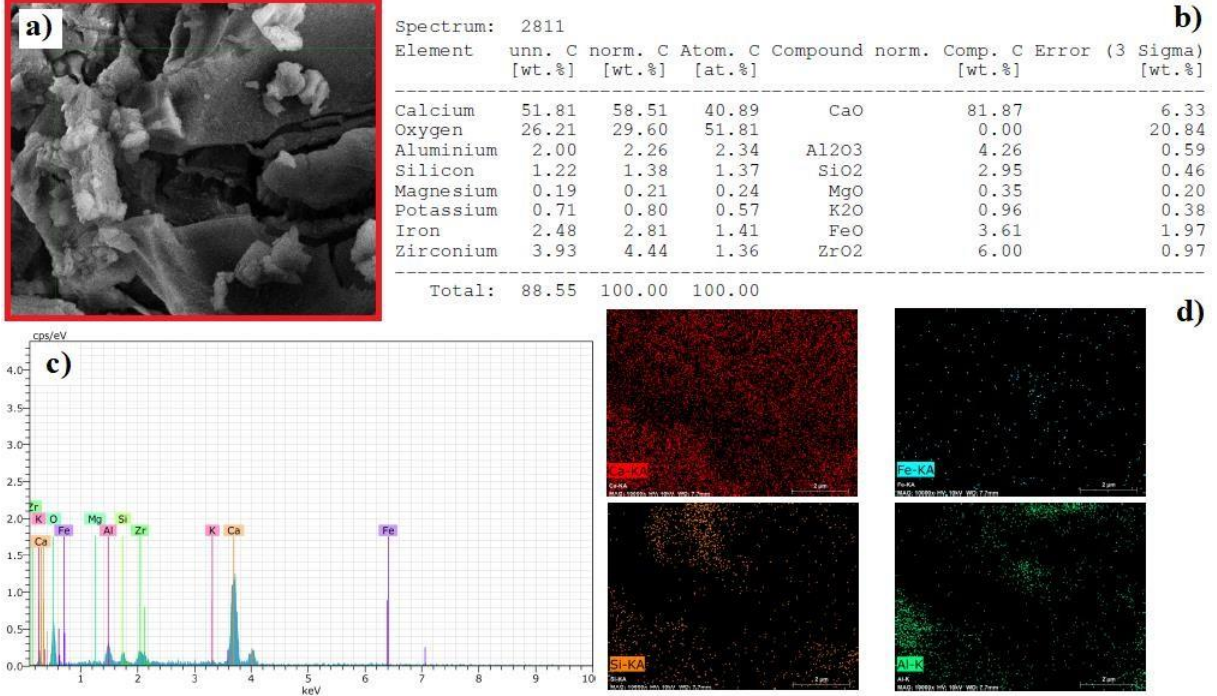
Erişim: 07.12.2022. [https://merlab.metu.edu.tr/tr/x-isini-floresans spektrometresi](https://merlab.metu.edu.tr/tr/x-isini-floresans-spektrometresi)

Erişim: 04.03.2021. <https://www.tcma.org.tr/tr/istatistikler/kapasite>

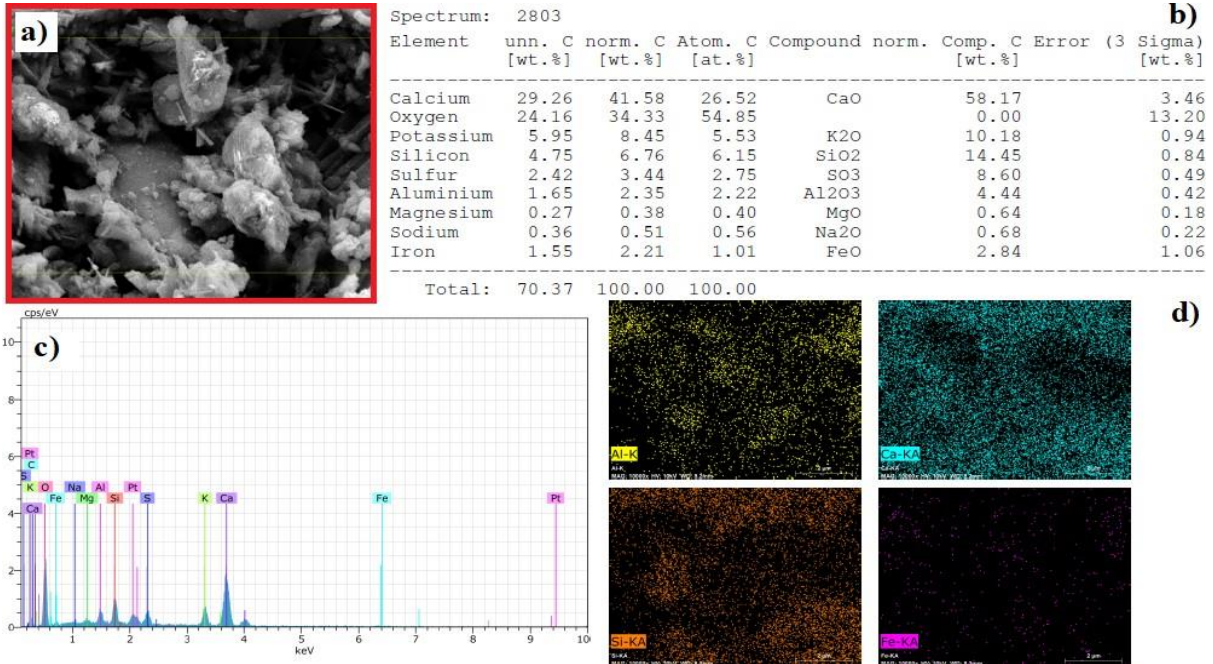
Erişim: 12.01.2023. <https://www.horiba.com/deu/scientific/technologies/energy-dispersive-x-ray-fluorescence-ed-xrf/what-is-x-ray-fluorescence-xrf/>

EKLER

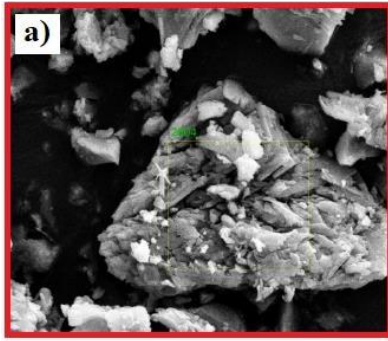
EK-1: Optimizasyon öncesi ve sonrası DGD, DF ve DSG çimento örneklerinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri a) SEM, b) EDX spektrum sonuçları, c) EDX spektrumu ve d) MAPPING görüntüleri.



EK-1.1. Optimizasyon öncesi DGD çimento örneğinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri a) SEM, b) EDX spektrum sonuçları, c) EDX spektrumu ve d) MAPPING görüntüleri.

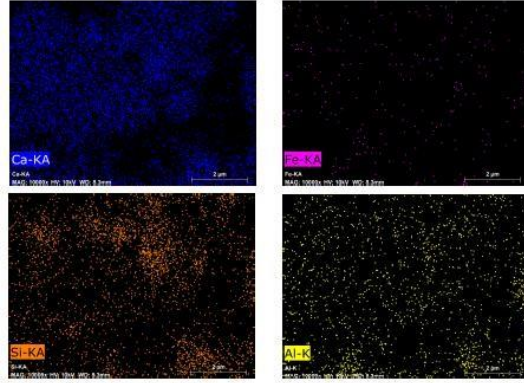
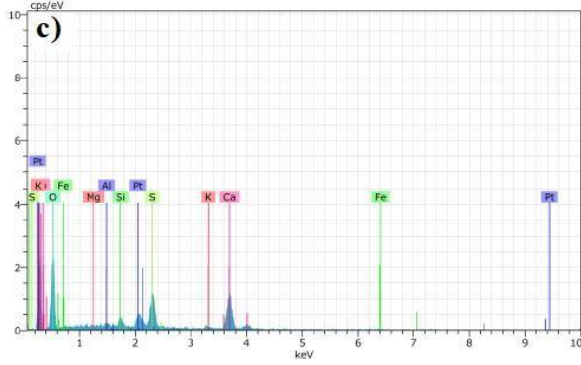


EK-1.2. Optimizasyon sonrası DGD çimento örneğinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri a) SEM, b) EDX spektrum sonuçları, c) EDX spektrumu ve d) MAPPING görüntüleri.

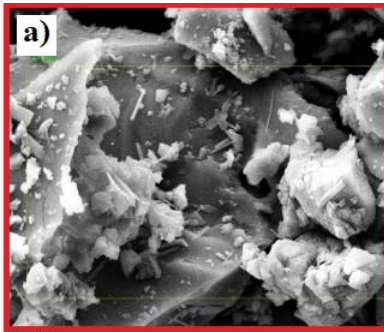


Spectrum: 2805

Element	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Compound	norm. Comp. C [wt. %]	Error (3 Sigma) [wt. %]
Oxygen	22.28	40.70	61.44		0.00	12.08
Calcium	21.04	38.43	23.16	CaO	53.78	2.69
Sulfur	7.41	13.53	10.19	SO3	33.79	1.09
Silicon	1.65	3.02	2.60	SiO2	6.46	0.44
Aluminium	0.44	0.80	0.72	Al2O3	1.51	0.22
Potassium	0.82	1.50	0.93	K2O	1.81	0.32
Magnesium	0.10	0.18	0.18	MgO	0.31	0.14
Iron	1.00	1.82	0.79	FeO	2.35	0.90
Total:	54.74	100.00	100.00			

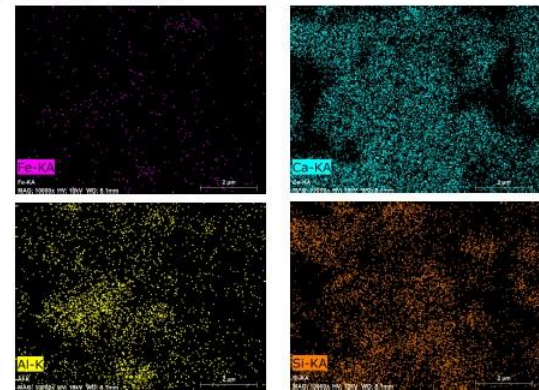
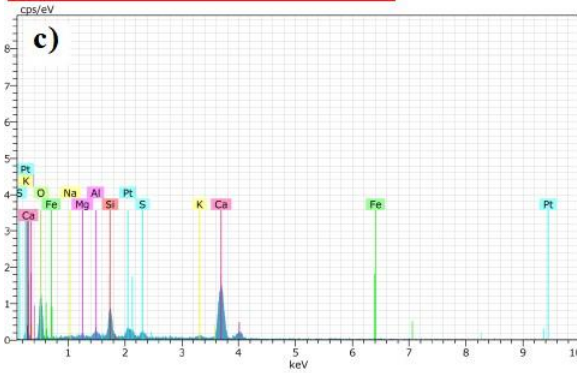


EK-1.3. Optimizasyon öncesi DF çimento örneğinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri a) SEM, b) EDX spektrum sonuçları, c) EDX spektrumu ve d) MAPPING görüntüleri.

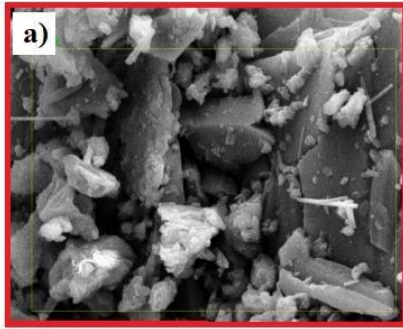


Spectrum: 2799

Element	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Compound	norm. Comp. C [wt. %]	Error (3 Sigma) [wt. %]
Calcium	32.78	51.21	32.92	CaO	71.66	3.94
Oxygen	21.84	34.13	54.95		0.00	13.98
Silicon	5.18	8.10	7.43	SiO2	17.32	0.95
Sulfur	1.04	1.63	1.31	SO3	4.06	0.33
Aluminium	0.57	0.89	0.85	Al2O3	1.68	0.26
Potassium	0.84	1.31	0.87	K2O	1.58	0.33
Iron	1.31	2.04	0.94	FeO	2.62	1.08
Magnesium	0.29	0.46	0.48	MgO	0.76	0.20
Sodium	0.15	0.24	0.26	Na2O	0.32	0.17
Total:	64.00	100.00	100.00			

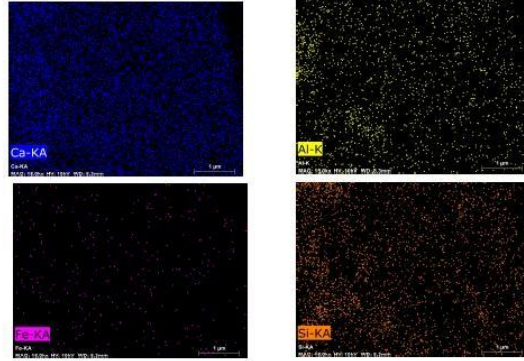
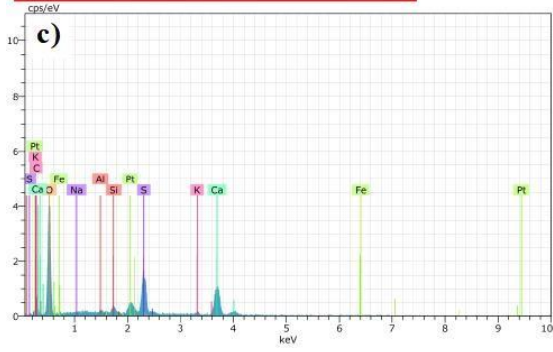


EK-1.4. Optimizasyon sonrası DF çimento örneğinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri a) SEM, b) EDX spektrum sonuçları, c) EDX spektrumu ve d) MAPPING görüntüleri.

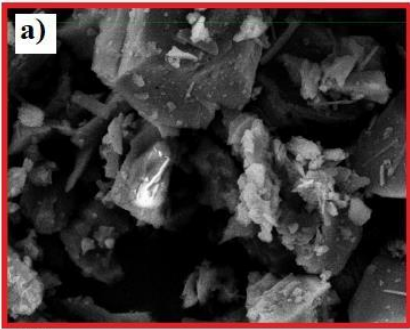


Spectrum: 2809

Element	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	norm. Comp. C [wt.%]	Error (3 Sigma) [wt.%]
Oxygen	24.81	42.91	63.24		0.00	12.04
Calcium	20.90	36.15	21.27	CaO	50.58	2.66
Sulfur	9.67	16.73	12.30	SO3	41.78	1.33
Silicon	1.35	2.33	1.96	SiO2	4.99	0.38
Sodium	0.06	0.10	0.10	Na2O	0.13	0.13
Potassium	0.50	0.87	0.52	K2O	1.05	0.26
Iron	0.24	0.41	0.17	FeO	0.53	0.45
Aluminium	0.29	0.50	0.44	Al2O3	0.95	0.19
Total:	57.82	100.00	100.00			

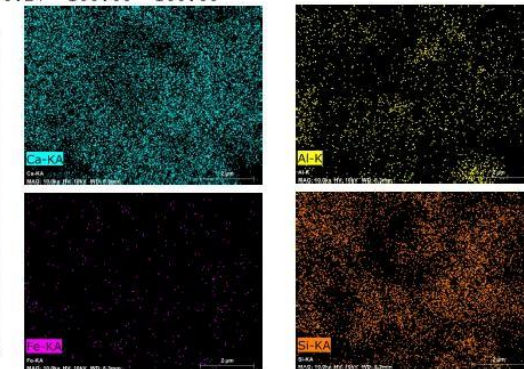
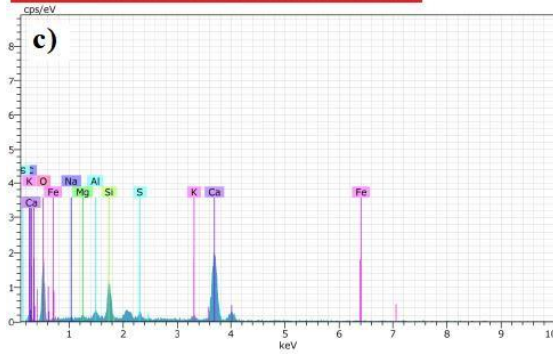


EK-1.5. Optimizasyon öncesi DSG çimento örneğinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri a) SEM, b) EDX spektrum sonuçları, c) EDX spektrumu ve d) MAPPING görüntüleri.



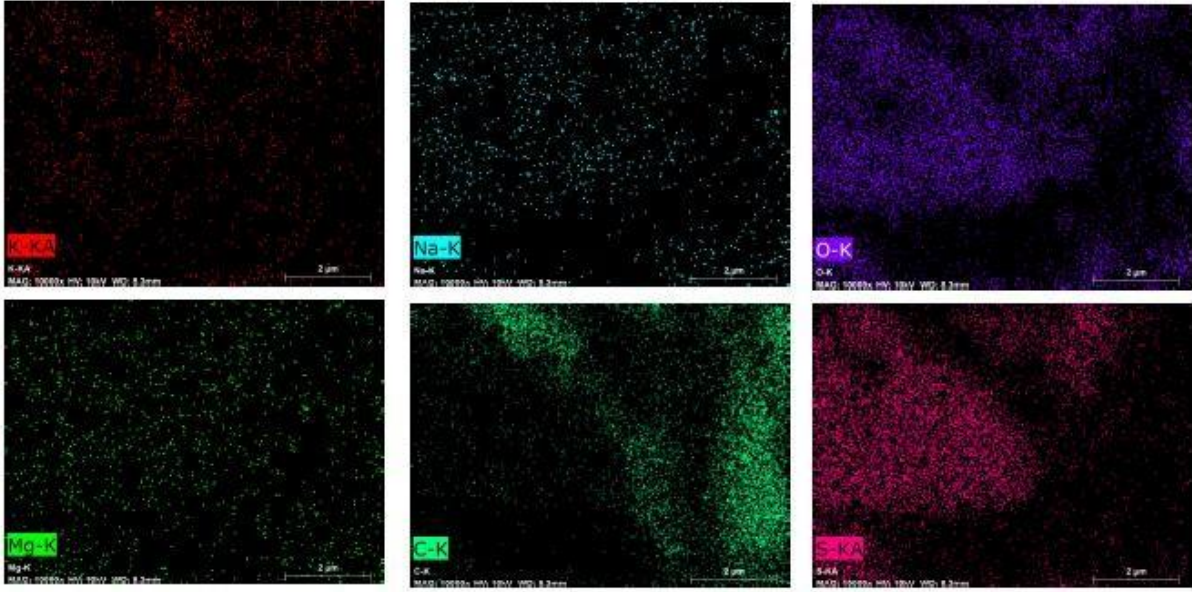
Spectrum: 2802

Element	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	norm. Comp. C [wt.%]	Error (3 Sigma) [wt.%]
Calcium	36.24	51.56	33.19	CaO	72.15	4.20
Oxygen	23.89	33.99	54.80		0.00	14.13
Silicon	6.03	8.58	7.88	SiO2	18.35	1.02
Aluminium	0.67	0.96	0.92	Al2O3	1.81	0.26
Potassium	1.06	1.52	1.00	K2O	1.83	0.35
Magnesium	0.31	0.44	0.47	MgO	0.73	0.20
Sodium	0.02	0.03	0.03	Na2O	0.03	0.10
Sulfur	0.77	1.10	0.89	SO3	2.75	0.27
Iron	1.28	1.83	0.84	FeO	2.35	1.00
Total:	70.27	100.00	100.00			

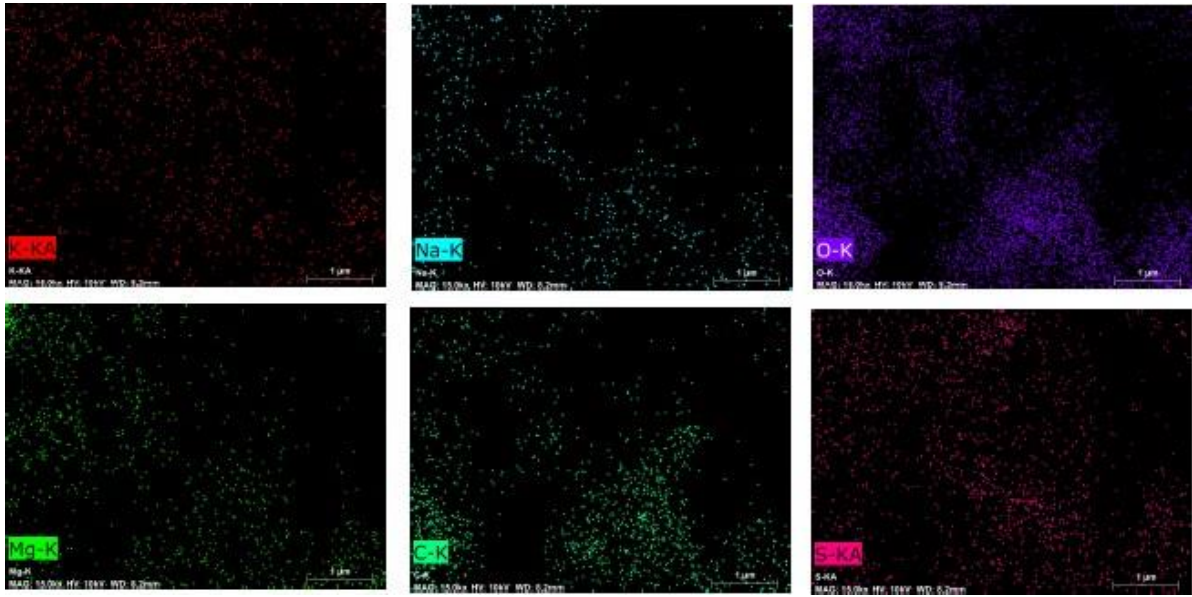


EK-1.6. Optimizasyon sonrası DSG çimento örneğinin SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri a) SEM, b) EDX spektrum sonuçları, c) EDX spektrumu ve d) MAPPING görüntüleri.

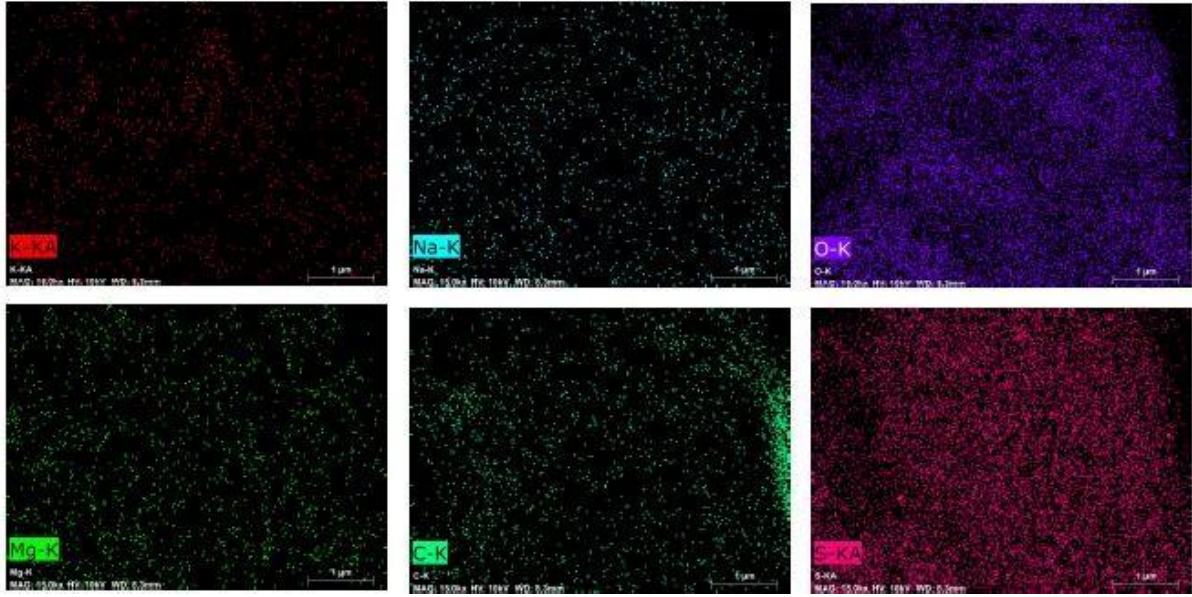
EK-2: Optimizasyon öncesi ve sonrası DÜ, DÇ, DGD, DF ve DSG çimento örneklerine ait K, Mg, S, Na, C ve O elementlerinin MAPPING analizleri görüntüleri



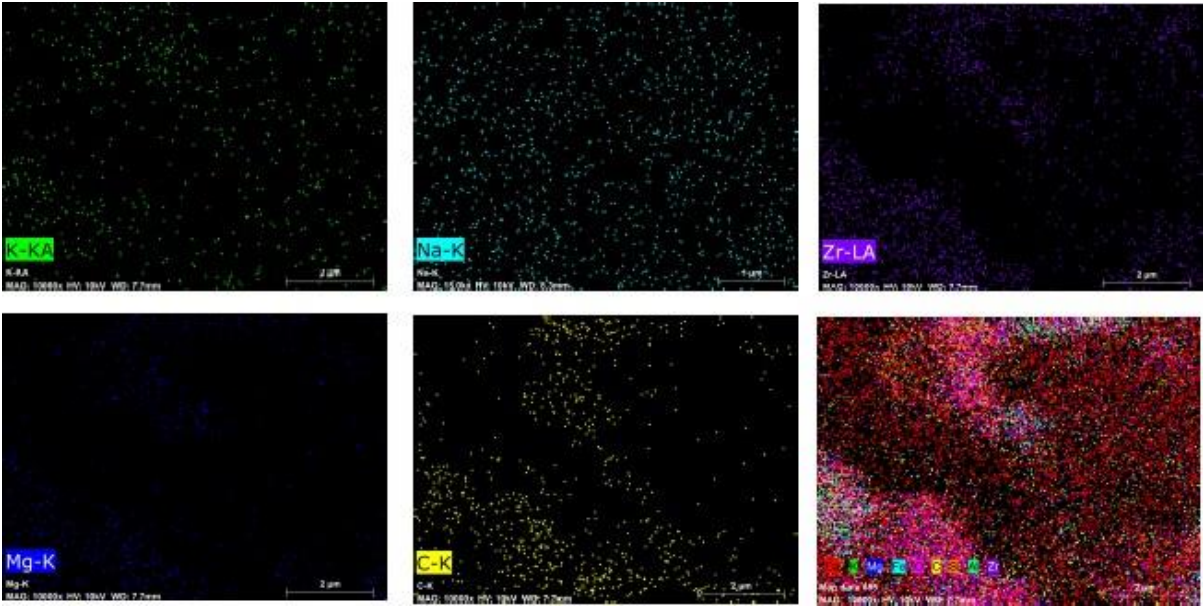
EK-2.1. Optimizasyon öncesi DF çimento örneğine ait K, Mg, S, Na, C ve O elementlerinin MAPPING analiz görüntüleri.



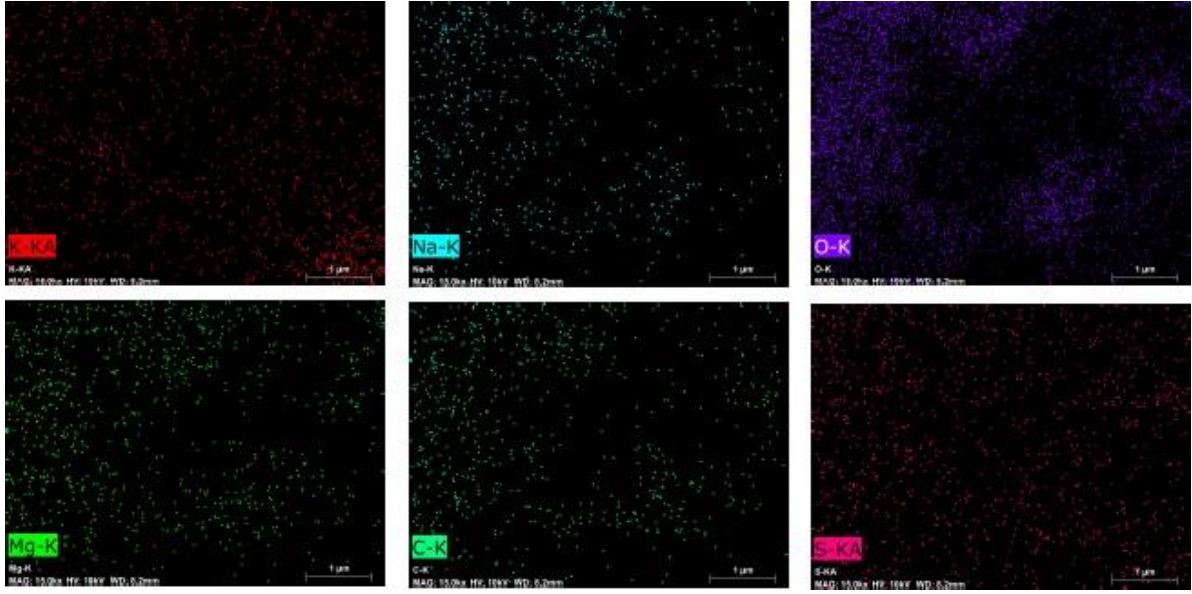
EK-2.2. Optimizasyon öncesi DÜ çimento örneğine ait K, Mg, S, Na, C ve O elementlerinin MAPPING analiz görüntüleri.



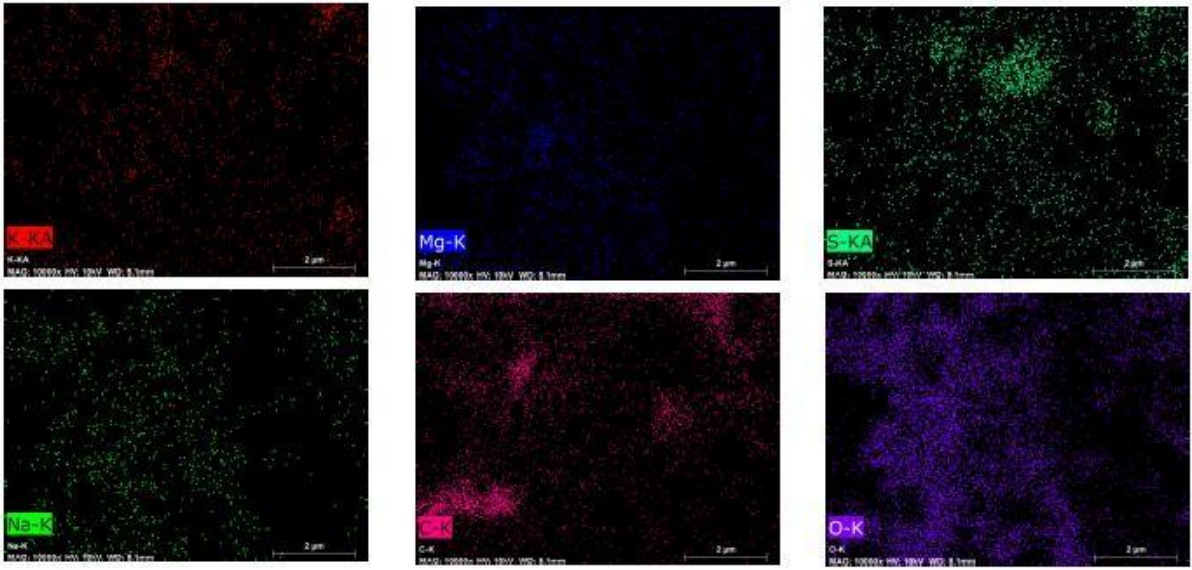
EK-2.3. Optimizasyon öncesi DSG çimento örneğine ait K, Mg, S, Na, C ve O elementlerinin MAPPING analiz görüntüleri.



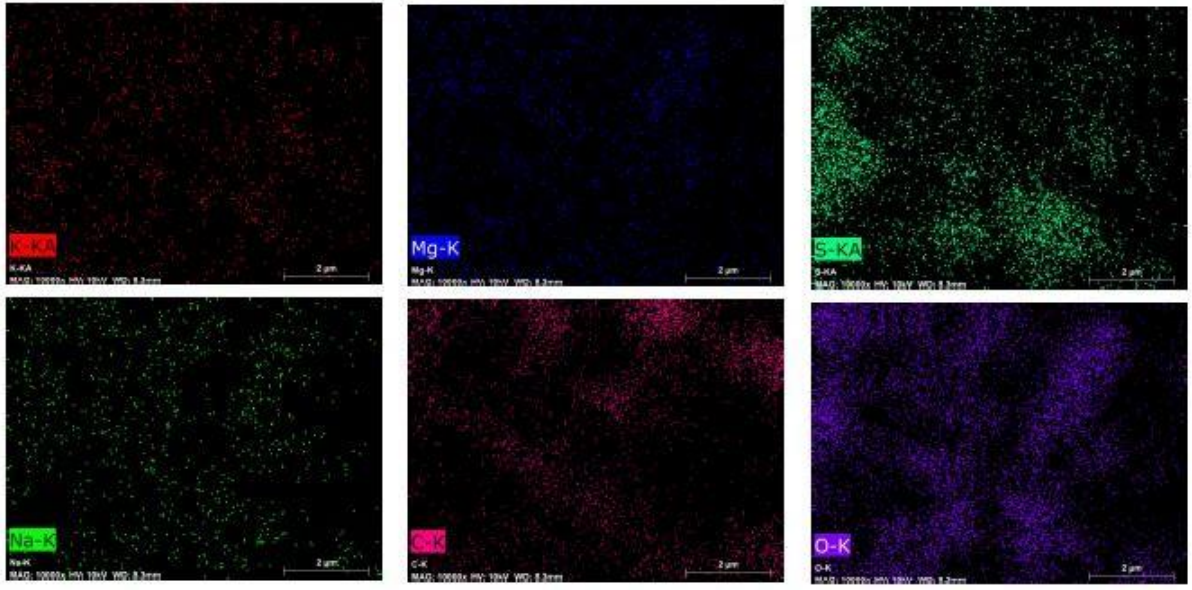
EK-2.4. Optimizasyon öncesi DGD çimento örneğine ait K, Mg, Na, C, Zr elementlerinin ve genel MAPPING analiz görüntüleri.



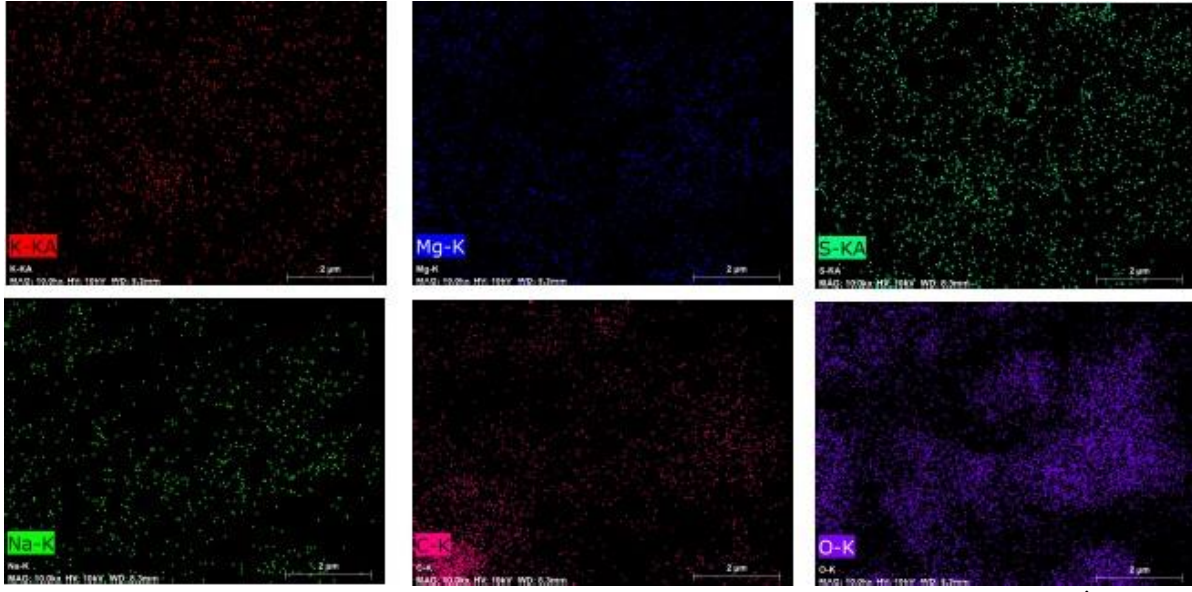
EK-2.5. Optimizasyon öncesi DÇ çimento örneğine ait K, Mg, S, Na, C ve O elementlerinin MAPPING analiz görüntüleri.



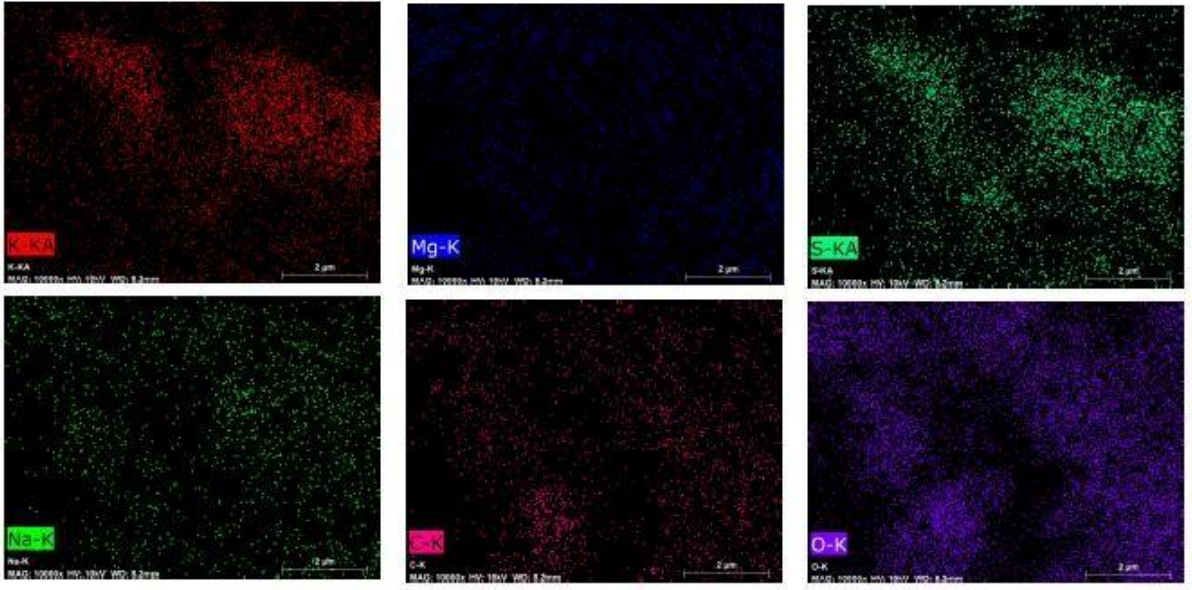
EK-2.6. Optimizasyon sonrası DF çimento örneğine ait K, Mg, S, Na, C ve O elementlerinin MAPPING analiz görüntüleri.



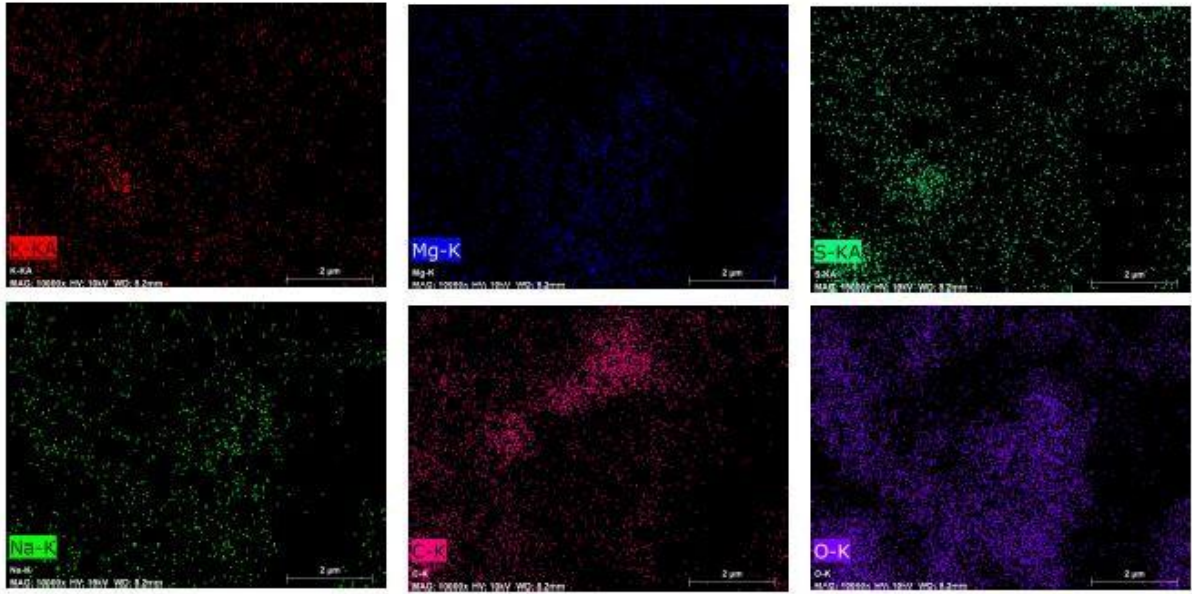
EK-2.7. Optimizasyon sonrası DÜ çimento örneğine ait K, Mg, S, Na, C ve O elementlerinin MAPPING analiz görüntüleri.



EK-2.8. Optimizasyon sonrası DSG çimento örneğine ait K, Mg, S, Na, C ve O elementlerinin MAPPING analiz görüntüleri.



EK-2.9. Optimizasyon sonrası DGD çimento örneğine ait K, Mg, S, Na, C ve O elementlerinin MAPPING analiz görüntüleri.



EK-2.10. Optimizasyon sonrası DÇ çimento örneğine ait K, Mg, S, Na, C ve O elementlerinin MAPPING analiz görüntüleri.

EK-3: CHN-S analiz sonuçları

08012021DC

Name	Mass	Method	Analysis Date
08012021DC	0.2065	AR2092_0721	1/10/2023 2:48:12 PM

Nitrogen %
-0.05045



Carbon %
0.47713



Hydrogen %
-0.51537



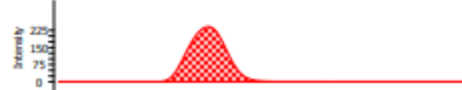
08012021DF

Name	Mass	Method	Analysis Date
08012021DF	0.2058	AR2092_0721	1/10/2023 2:52:37 PM

Nitrogen %
-0.08365



Carbon %
0.58518



Hydrogen %
-0.84315



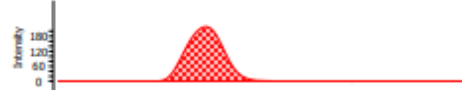
08012021DSG

Name	Mass	Method	Analysis Date
08012021DSG	0.2027	AR2092_0721	1/10/2023 2:57:03 PM

Nitrogen %
-0.06578



Carbon %
0.53288



Hydrogen %
-0.95253



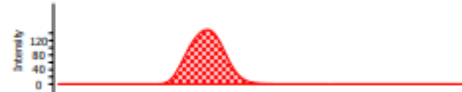
08012021GD

Name	Mass	Method	Analysis Date
08012021GD	0.2062	AR2092_0721	1/10/2023 3:01:28 PM

Nitrogen %
-0.07065



Carbon %
0.34546



Hydrogen %
-1.0044



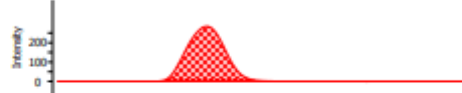
08012021U

Name	Mass	Method	Analysis Date
08012021U	0.2021	AR2092_0721	1/10/2023 3:05:54 PM

Nitrogen %
-0.03204



Carbon %
0.71186



Hydrogen %
-1.0274



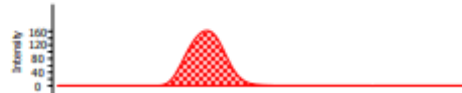
13102020DC

Name	Mass	Method	Analysis Date
13102020DC	0.2038	AR2092_0721	1/10/2023 3:10:19 PM

Nitrogen %
-0.07963



Carbon %
0.38261



Hydrogen %
-1.0856



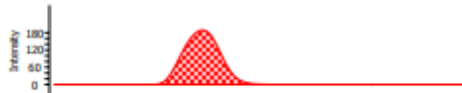
13102020DF

Name	Mass	Method	Analysis Date
13102020DF	0.2054	AR2092_0721	1/10/2023 3:14:44 PM

Nitrogen %
-0.06331



Carbon %
0.45119



Hydrogen %
-1.0861



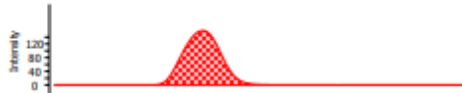
13102020DSG

Name	Mass	Method	Analysis Date
13102020DSG	0.2023	AR2092_0721	1/10/2023 3:19:08 PM

Nitrogen %
-0.05885



Carbon %
0.37988



Hydrogen %
-1.1460



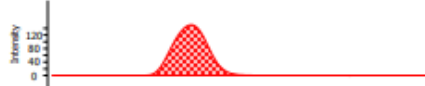
13102020GD

Name	Mass	Method	Analysis Date
13102020GD	0.2004	AR2092_0721	1/10/2023 3:48:27 PM

Nitrogen %
-0.11059



Carbon %
0.35725



Hydrogen %
-1.2603



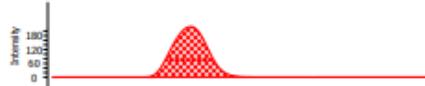
13102020U

Name	Mass	Method	Analysis Date
13102020U	0.2006	AR2092_0721	1/10/2023 3:53:31 PM

Nitrogen %
-0.02913



Carbon %
0.54664



Hydrogen %
-1.1641



08012021DC

Name	Mass
08012021DC	0.2518

Sulfur %
0.668



08012021DF

Name	Mass
08012021DF	0.2525

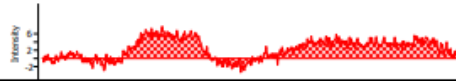
Sulfur %
0.349



08012021DSG

Name	Mass
08012021DSG	0.2528

Sulfur %
0.004



08012021GD

Name	Mass
08012021GD	0.2509

Sulfur %
0.240



08012021U

Name	Mass
08012021U	0.2521

Sulfur %
0.124



1/13/2023 3:18:28 PM

Page 1 of 2

13102020DC

Name	Mass
13102020DC	0.2519

Sulfur %
4.54



13102020DF

Name	Mass
13102020DF	0.2523

Sulfur %
1.59



13102020DSG

Name	Mass
13102020DSG	0.2502

Sulfur %
1.89



13102020GD

Name	Mass
13102020GD	0.2581

Sulfur %
1.48



13102020U

Name	Mass
13102020U	0.2584

Sulfur %
1.06



1/13/2023 3:18:28 PM

Page 2 of 2