

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TÜRKİYE ÇİMENTO SEKTÖRÜNDEN
KAYNAKLANAN SERA GAZI EMİSYONLARI

Kumru RENDE
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE

2013

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TÜRKİYE ÇİMENTO SEKTÖRÜNDEN
KAYNAKLANAN SERA GAZI EMİSYONLARI

Kumru RENDE
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman
Doç. Dr. Hasan SADIKOĞLU
Yrd. Doç. Dr. Pınar ERGENEKON

GEBZE

2013



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından tarihinde tez savunma sınavı yapılan Kumru RENDE'nin tez çalışması Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Hasan SADIKOĞLU

ÜYE

(2.TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç.Dr. Pınar ERGENEKON

ÜYE

: Prof. Dr. M. Alaittin HASTAOĞLU

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Mahmut ŞEKER

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Tunahan ÇAKIR

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: TÜRKİYE ÇİMENTO SEKTÖRÜNDEN KAYNAKLANAN SERA GAZI EMİSYONLARI

YAZAR ADI: Kumru RENDE

Son yıllarda küresel ısınmanın ciddi bir tehdit oluşturmaya başlamasıyla birlikte, dünya kamuoyunda çevre ve sürdürülebilir kalkınma kaygıları gündemin ilk sıralarına yerleşmiştir. Sera gazları, ısı tutma kapasiteleri nedeniyle küresel ısınmaya neden olmaktadır. Antropojenik sera gazı üretiminde önemli bir pay çimento sektörüne aittir. Küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %5-7'si çimento tesislerinden kaynaklanmaktadır. Ülkemizde de sera gazı emisyonları hızla artmaktadır. 1990 yılında kişi başı CO₂ eşdeğer emisyonu 3,39 ton/kişi iken 2010 yılında 5,51 ton/kişi'ye ulaşmıştır. Ülkemizde 48 adet entegre çimento üretim tesisi bulunmaktadır. TÜİK verilerine göre çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonu miktarının toplam CO₂ emisyonları içerisindeki payı 2010 yılında %8,86'ya yükselmiştir ve bu payın giderek artacağı öngörülmektedir. Çimento üretiminde en büyük CO₂ emisyon kaynağı kalsinasyon prosesidir, bunu yakıt ve elektrik tüketimi takip etmektedir.

Bu çalışmada, Türkiye'de çimento sektörünün mevcut durumu araştırılmış, çimento sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları belirlenmiş ve C# programlama dili kullanılarak Windows ortamında çalışabilen "CO₂ Emisyonu Hesaplama Aracı" adlı bir bilgisayar uygulaması geliştirilmiştir. Uygulama ile herhangi bir tesise ait toplam CO₂ emisyonu miktarı hesaplanabilmekte ve çeşitli senaryolar oluşturulabilmektedir. Çalışma kapsamında, 3 farklı senaryo oluşturulmuştur. Senaryoların sonuçları incelendiğinde, gerekli teknolojik iyileştirmelerin yapılması ve alternatif yakıt kullanımının arttırılması ile sera gazı emisyonlarının yaklaşık %6-17 arasında azaltılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, katkılı çimento üretiminin arttırılması, atık ısıdan enerji üretiminin gerçekleştirilmesi, karbon yakalama ve depolama konusundaki çalışmaların arttırılması ve çeşitli yasal düzenlemeler yardımıyla istikrarlı sınırlamalarının yapılması ile sera gazı emisyonlarının azaltılması sağlanabilecektir.

SUMMARY

TITLE: THE GREENHOUSE GASSES PRODUCED by TURKISH CEMENT INDUSTRY

AUTHOR: Kumru RENDE

In recent years, with the start of serious threats due to global warming, the concerns regarding the environment and sustainable development took their places at the top of the world public opinion agenda. Greenhouse gases cause global warming due to their heat retention capacity. A significant share of anthropogenic greenhouse gas belongs to the cement industry. About %5-7 of global greenhouse gas emissions arise from cement plants. In our country, the greenhouse gasses have been increasing rapidly, too. In 1990, CO₂ emissions were 3,39 per person, however in 2010, this number increased to 5,51. There are 48 cement plants in Turkey. According to the TÜİK greenhouse gas inventory report, the CO₂ emissions from the cement sector in the total greenhouse gas emissions in 2010 increased to %8,86. The most important emission source is the calcination process followed by the fuel and electricity consumption.

In this study, the current state of the cement sector in Turkey is identified, the greenhouse gas emissions from the cement sector are determined, and a computer application named "CO₂ Emissions Calculation Tool," which runs on the Windows environment, has been developed in the C# programming language. With the help of this application, total CO₂ emissions of any quantity in a cement plant can be estimated and consequently various scenarios can be created. Within the scope of this study, three different scenarios are created using the calculation tool. After analyzing the results of the scenarios, it is found that, if the technology transfers implemented and use of alternative fuels and raw materials encouraged, CO₂ emissions can be reduced to %6-17. Also, blended cement production should be promoted, carbon dioxide capture and storage studies should be increased, and by the help of various legal arrangements, carbon dioxide limitations should be made consistently in order to reduce emissions.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tüm aşamalarında engin bilgi birikimini, deneyimini ve ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen ve bana sabırla destek olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hasan SADIKOĞLU'na, çalışmam sırasındaki çeşitli teknik konulardaki desteğini, ilgisini ve yardımını esirgemeyen ikinci danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Pınar ERGENEKON'a, çalışmalarım sırasında sürekli bana destek olan Sayın Dr. Özgen ERCAN'a, değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Alaidin HASTAOĞLU'na, Sayın Yrd. Doç. Dr. Mahmut ŞEKER'e, Sayın Yrd. Doç. Dr. Tunahan ÇAKIR'a, her zaman yanımda olan sevgili eşim Ferhat Şükrü RENDE'ye ve son olarak beni bu günlere getiren aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	ii
SUMMARY	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	14
1.1. Çalışmanın Amacı	17
1.2. Literatür Araştırması	18
2. DÜNYADA ve TÜRKİYE’DE ÇİMENTO ÜRETİMİ	24
2.1. Sektörün Gelişimi ve Günümüzdeki Durumu	24
2.2. Sektörün Türkiye’deki Mevcut Durumu	30
2.2.1. Sektörün Türkiye Sanayisindeki/Ekonomisindeki Yeri	30
2.2.2. Sektörün Maliyet Bileşenleri	31
2.2.3. Sektörde Üretilen Başlıca Ürünler	32
2.2.4. Türk Çimento Sektörü Kapasite ve İstihdam Durumu	33
2.3. Yaygın Olarak Kullanılan Çimento Üretim Süreçleri	36
2.3.1. Kuru Yöntemle Klinker Üretim Süreci	36
2.3.2. Yarı Kuru (Lepol) Yöntemle Klinker Üretim Süreci	39
2.3.3. Yarı Yaş Yöntemle Klinker Üretim Süreci	39
2.3.4. Yaş Yöntemle Klinker Üretimi	40
2.4. Çimento Fabrikalarında Üretim Süreci	40
2.4.1. Hammaddenin Hazırlanması	40

2.4.2. Hammaddenin Öğütülmesi	44
2.4.3. Yakıtın Hazırlanması	47
2.4.4. Klinkerin Pişirilmesi	48
2.4.5. Çimentonun Öğütülmesi	52
2.4.6. Çimentonun Stoklanması ve Paketlenmesi	54
3. SERA GAZLARI ve KÜRESEL ISINMA	57
3.1. Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)	66
3.2. Emisyon Ticareti	68
4. ÇİMENTO ÜRETİM SÜRECİ İLE İLGİLİ EMİSYON KAYNAKLARI ve MEVCUT EN İYİ TEKNOLOJİLER	72
4.1. Çimento Üretim Sürecinde Yer Alan Emisyon Kaynakları ve Türleri	72
4.2. Çimento Sanayi için Mevcut En İyi Teknolojiler	78
4.2.1. Hammadde Tüketimi	79
4.2.2. Enerji Verimliliği	80
4.2.3. Proses Seçimi	83
4.2.4. Genel Teknikler	84
4.3. Sektörün Çevre Mevzuatı Açısından Değerlendirilmesi	88
5. ÇİMENTO ÜRETİMİ SERA GAZI EMİSYON HESAPLAMALARI	91
6. IPCC 2006 METODOLOJİSİ	98
6.1. IPCC 2006 Çimento Üretimi Sera Gazı Emisyon Hesaplamaları	99
6.1.1. Doğrudan Emisyonlar	100
6.1.2. Dolaylı Emisyonlar	108
7. CO ₂ EMİSYONU HESAPLAMA ARACI	110
7.1. Doğrudan Emisyonlar Sekmesi	112
7.2. Doğrudan Emisyonlar 2 Sekmesi	117
7.3. Dolaylı Emisyonlar Sekmesi	119
7.4. Senaryo Oluşturma Sekmesi	122

7.4.1. Genel Bilgi	122
7.4.2. Senaryo Oluşturma Sekmesinin Kullanımı	123
7.5. Senaryolar	126
7.5.1. Genel Bilgi	126
7.5.2. Senaryoların Oluşturulması	128
7.5.1. Senaryolara Göre Hesaplanan CO ₂ Miktarı	132
7.5.2. Senaryoların Karşılaştırılması	137
8. SONUÇLAR	140
9. ÖNERİLER	144
KAYNAKLAR	145
ZGEÇMİř	150

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
BAT	: Best Available Technologies
BMİDÇS	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
CCS	: Carbon Capture and Storage
CF ₄	: Karbontetraflorür
CSI	: Cement Sustainability Initiative
CKD	: Cement Kiln Dust
CFC	: Kloroflorokarbon
CaO	: Kalsiyum Oksit
CaCO ₃	: Kalsiyum Karbonat
CO	: Karbon Monoksit
CO ₂	: Karbondioksit
CH ₄	: Metan
Fe ₂ O ₃	: Demir Oksit
HFC	: Hidroflorokarbon
HCFC	: Hidrokloroflorokarbon
HF	: Hidrojen Florür
HCl	: Hidrojen Klorür
IEA	: International Energy Agency
IPCC	: International Panel of Climate Change

IR	:	Infrared Rays
MgO	:	Magnezyum Oksit
N ₂ O	:	Diazot Monoksit
NO _x	:	Azot Oksitler
NF ₃	:	Azot Triflorür
NH ₃	:	Amonyak
NMVOG	:	Metan Olmayan Uçucu Organik Bileşik
O ₃	:	Ozon
OECD	:	Organisation for Economic Cooperation and Development
PFC	:	Perflorokarbon
PCDD	:	Poliklorlu dibenzo-p-dioksin
PCDF	:	Poliklorlu dibenzofuran
PAH	:	Poliaromatik Hidrokarbon
PM	:	Partikül Madde
RDF	:	Refuse Derived Fuel
SiO ₂	:	Silisyum Dioksit
SF ₆	:	Sülfür Hegzaflorit
SO ₂	:	Kükürt Dioksit
TOC	:	Toplam Organik Bileşikler
TNA	:	Technology Need Assessment
TÇMB	:	Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
TÜİK	:	Türkiye İstatistik Kurumu
TEP	:	Ton Eşdeğer Petrol

UNFCCC	:	United Nations Framework Convention on Climate Change
UV	:	Ultraviolet Rays
VB	:	Visual Basic
VOC	:	Uçucu Organik Bileşik
WBCSD	:	World Business Council for Sustainable Development

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Dünya çimento üretiminde başlıca ülkeler, 2010	27
2.2 Dünya çimento üretiminde başlıca ülkeler, 2011	28
2.3 Bölgeler ve başlıca ülkeler bazında dünya çimento üretim oranları, 2011	29
2.4 Türkiye çimento üretimi, TÇMB üyeleri, 2005-2011	30
2.5 Türkiye çimento üretimi, 2010, 2011, 2012 yılları	34
2.6 Çimento üretim tesislerinin ülkemizdeki dağılımı	35
2.7 Kalsinatör sistemli çimento üretim süreci	38
2.8 Yarı kuru (lepol) klinker üretim süreci	39
2.9 Kapalı hammadde deposu örneği	44
2.10 Dik valsli farin değirmeni örneği	47
2.11 Klinker pişirme süreci	50
2.12 Döner fırın örneği	51
2.13 Basitleştirilmiş çimento üretimi akış şeması	53
2.14 Bilyalı değirmen örneği	54
2.15 Bir çimento fabrikasına ait çimento üretimi akış şeması	56
3.1 Sera gazı konsantrasyonlarındaki artış, 18.yy.dan itibaren	58
3.2 Bir nesnedeki salınımlı elektrik alanın tetiklediği elektromanyetik dalga	59
3.3 CO ₂ ve N ₂ 'nin normal titreşimsel modları	60
3.4 Atmosfer tarafından absorbe edilen radyasyonun verimi	61
5.1 Ülkemizin 1990-2010 yılları arasındaki sera gazı artış eğilimleri	92
5.2 Sektörlere göre sera gazı emisyonları, 1990-2010	93
5.3 Eşdeğer CO ₂ emisyonu dağılımı (%), 2010	94
5.4 Ülkemizdeki sera gazları dağılımı, 2010	94
7.1 “Doğrudan Emisyonlar” sekmesinin ekran çıktısı	116
7.2 “Doğrudan Emisyonlar 2” sekmesinin ekran çıktısı	118
7.3 “Dolaylı Emisyonlar” sekmesinin ekran çıktısı	121
7.4 Küresel çimento üretimi: 2006, 2015, 2030, 2050	123
7.5 “Senaryo Oluşturma” sekmesinin ekran çıktısı	125
7.6 Senaryo 1’e ait toplam CO ₂ emisyonu	133

7.7 Senaryo 1 için kaynak bazında CO ₂ emisyonunun m. ton olarak yıllara göre dağılımı	133
7.8 Senaryo 1 için kaynak bazında CO ₂ emisyonunun yüzde olarak yıllara göre dağılımı	134
7.9 Senaryo 2'ye ait toplam CO ₂ emisyonu	134
7.10 Senaryo 2 için kaynak bazında CO ₂ emisyonunun m. ton olarak yıllara göre dağılımı	135
7.11 Senaryo 2 için kaynak bazında CO ₂ emisyonunun yüzde olarak yıllara göre dağılımı	135
7.12 Senaryo 3'e ait toplam CO ₂ emisyonu	136
7.13 Senaryo 1 için kaynak bazında CO ₂ emisyonunun m. ton olarak yıllara göre dağılımı	137
7.14 Senaryo 2 için kaynak bazında CO ₂ emisyonunun yüzde olarak yıllara göre dağılımı	137
7.15 Toplam CO ₂ emisyonları: S1, S2, S3	138
7.16 Birim CO ₂ emisyonu (ton CO ₂ /ton klinker)	139

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Ülkemizdeki çimento üretim tesislerinin bölgelere göre dağılımı	26
2.2 Çimento sektörü maliyet bileşenleri	32
2.3 Bölgelere göre çimento sektörü tesis kapasiteleri, 2011	33
2.4 Çimento tesislerinde kullanılan enerji	45
2.5 Çimento fabrikaları için uygun olan bazı ikincil yakıtlar	47
2.6 Çimento üretiminde klinkere ilave edilebilen katkı maddeleri	52
2.7 Klinker katkı maddeleri	53
3.1 Sera gazlarının küresi ısınma etkisi potansiyelleri (GWP)	67
3.2 Atmosferik konsantrasyonlar	68
3.3 Türkiye'de Gönüllü Karbon Piyasalarında geliştirilen proje türleri	71
4.1 Temel özelliklerine göre öğütme tekniklerinin karşılaştırılması	81
4.2 Bazı Avrupa Birliği ülkelerinde hammadde olarak kullanılan atıklar	86
4.3 Avrupa Birliği ülkelerinde kullanılan bazı atıkların kalorifik değerleri	88
5.1 Sera gazı emisyonları, 1990 - 2010	91
5.2 Toplam sera gazı emisyonları, 1990 - 2010	92
5.3 Doğrudan sera gazlarının sektörel dağılımı, 1990-2010	95
7.1 Birincil yakıt türlerine ait karbon emisyon faktörleri	114
7.2 Alternatif yakıtlar ve emisyon faktörleri	117
7.3 Yakıt türlerine ait emisyon faktörleri	120
7.4 Çimento sektörünün 2013-2023 projeksiyonu	126
7.5 Türkiye çimento ve klinker üretimi, 2002-2011	127
7.6 Çimento sektörü üretim projeksiyonu, 2023-2050	127
7.7 Çimento üretiminde yakıt enerjisi kullanımı	128
7.8 Senaryo 1 (S1) verileri	130
7.9 Senaryo 2 (S2) verileri	131
7.10 Senaryo 3 (S3) verileri	132

1. GİRİŞ

İklim sistemi, yerkürenin yaklaşık 4,5 milyar yıllık jeolojik tarihi boyunca, milyonlarca yıldan on yıllara kadar tüm zaman ölçeklerinde değişme eğilimi göstermiştir. Son araştırma sonuçlarına göre, küresel ortalama sıcaklıkların geçen 10000 yıldaki herhangi bir yüzyılda 1 °C'den daha fazla değişmesi olası görülmemiştir. Bu dönemde, atmosferdeki CO₂ birikimi yaklaşık 280±10 ppm dolaylarında değişen bir dalgalanma göstermiştir [1].

Ancak 19. yüzyılın ortalarından, özellikle sanayi devriminden itibaren, iklimdeki doğal değişebilirliğe ek olarak, ilk kez insan etkinliklerinin de iklimi etkilediği yeni bir döneme girilmiştir. Özellikle fosil yakıtların yakılması, arazi kullanımı değişiklikleri, ormansızlaşma ve sanayi süreçleri gibi insan etkinlikleri sonucunda, atmosferdeki sera gazı birikimleri hızla artış göstermiştir. Küresel ortalama hava sıcaklıkları, geçen yüzyılda 0,4-0,8 °C arasında artmıştır. Bu ısınma, geçen 1000 yılın herhangi bir dönemindeki artıştan daha büyük ve dikkat çekicidir.

Küresel iklimde gözlenen ısınmanın yanı sıra, en gelişmiş iklim modelleri, küresel ortalama yüzey sıcaklıklarında 1990-2100 döneminde 1,4-5,8 °C arasında bir artış olacağını öngörmektedir. Küresel sıcaklıklardaki artışlara bağlı olarak da, hidrolojik döngünün değişmesi, kara ve deniz buzullarının erimesi, kar ve buz örtüsünün alansal daralması, deniz seviyesinin yükselmesi, iklim kuşaklarının yer değiştirmesi ve yüksek sıcaklıklara bağlı salgın hastalıkların ve zararlıların artması gibi dünya ölçeğinde sosyo-ekonomik sektörleri, ekolojik sistemleri ve insan yaşamını doğrudan etkileyecek önemli değişikliklerin oluşacağı beklenmektedir [1].

Son yüzyılda, dünya nüfusunun hızla artması ve sanayileşmenin yüksek seviyelere ulaşması sonucunda insanoğlunun çevreye olumsuz etkileri önemli boyutlara ulaşmıştır. Dünya kamuoyunun sürdürülebilir kalkınma konusundaki endişelerinin giderek artması üzerine, 1980'lerin sonlarından itibaren Birleşmiş Milletler çatısı altında insanın iklim sistemi üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılmasına yönelik olarak uluslararası düzeyde çeşitli çalışmalara başlanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, ilk olarak 1992 yılında “Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi” (BMİDÇS) imzaya açılmış, bu sözleşme ile başta küresel sera gazları emisyonlarının büyük kısmından sorumlu olan sanayileşmiş ülkeler olmak

üzere, ilgili tüm ülkelere emisyonların azaltılması konusunda sorumluluklar getirilmiştir [2].

Türkiye, iklim değişikliği ile mücadele amacıyla 21 Mart 1994 tarihinde yürürlüğe girmiş olan BMİDÇS'ne 24 Mayıs 2004 tarihinde taraf olmuştur. Sözleşmenin amacı, atmosferde tehlikeli boyutlara varan insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının iklim sistemi üzerindeki olumsuz etkilerini önlemek ve belli bir düzeyde tutulmasını sağlamaktır. Sözleşmeye taraf olan diğer ülkeler gibi ülkemizin de başlıca yükümlülüğü sera gazı salınımlarını sınırlandırarak, sera gazı yutaklarını ve haznelerini koruyarak iklim değişikliğinin etkisini azaltacak ulusal politikaların benimsenmesi ve uygun önlemlerin alınmasıdır. Ülkemiz OECD üyesi olmasına rağmen sosyo-ekonomik göstergeler, sera gazı salınım profili, kişi başına enerji tüketim göstergeleri ve İnsani Kalkınma Endeksindeki yeri göz önüne alındığı zaman orta gelirli gelişmekte olan ülke konumundadır [3]. Bu nedenle, "Sözleşmenin Ek-I" listesinde yer alan diğer ülkelere farklı bir konumda olan Türkiye'nin özel koşulları göz önüne alınarak Ek-II listesinden çıkarılmıştır [4]. 16 Şubat 2005 tarihinde yürürlüğe giren ve şu an yeni dönem görüşmeleri devam eden Kyoto Protokolü ise sera gazı emisyonlarının azaltılmasını veya sınırlandırılmasını amaçlamaktadır. Türkiye, hukuki bağlayıcılığı bulunan Kyoto Protokolü'ne 26 Ağustos 2009 tarihinde taraf olmuştur. Bu süre içinde emisyon azaltım veya sınırlandırma yükümlülüğü bulunmayan ülkemizin, 2012 sonrası uluslararası iklim rejiminde alacağı pozisyon önümüzdeki dönemlerde netleşecektir. BMİDÇS'nin ilgili maddesi sözleşmeye taraf olan ülkelerin sera gazı emisyonlarını azaltmak ve önlemek amacıyla sektörel teknoloji transferi gerçekleştirilmesi, geliştirilmesi, uygulanması ve yaygınlaştırılması çalışmalarını ve işbirliği yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Ülkelerin iklim değişikliği kapsamında azaltım ve uyuma yönelik ihtiyacı olan teknolojileri ve elde edilme yöntemlerini belirlemesi amacıyla mevcut en iyi teknolojilerin ve ülkemiz koşullarında uygulanabilecek en iyi teknolojilerin belirlenmesi, buna bağlı olarak maliyet analizlerinin yapılması ve sera gazı azaltım potansiyelinin belirlenmesi gerekmektedir. Sera gazları, ısı tutma kapasiteleri nedeniyle küresel ısınmaya neden olmaktadır. İnsan faaliyetleri sonucunda atmosfere salınan sera gazı emisyonlarının miktarı daha önce de belirtildiği gibi sanayi devriminden günümüze hızla artmaktadır. Sera gazlarının en önemlisi karbondioksittir. Karbondioksit, daha çok enerji üretim

faaliyetlerinden ve çeşitli sanayi sektörlerinden kaynaklanmaktadır. Bu sanayi sektörleri arasında önemli bir pay da çimento sektörüne aittir.

Çimento sektörü, Türkiye ekonomisinin son yıllarda kaydettiği hızlı büyümenin içinde önemli bir paya sahip olan inşaat sektörünün en önemli girdilerinden biridir. Çimento üretimi esnasında oluşan CO₂ emisyonları, temel olarak doğrudan emisyonlar ve dolaylı emisyonlar olmak üzere ikiye ayrılabilir. Doğrudan emisyonlar, proses kaynaklı ve yakıt tüketiminden kaynaklı emisyonlardır. Dolaylı emisyonlar ise, elektrik tüketiminden ve transportasyondan kaynaklanan emisyonlardır. Çimento üretim sürecinde, en fazla CO₂ emisyonu, kalsinasyon süreci kaynaklı olarak oluşmaktadır. Kalsinasyon kaynaklı emisyonları, sırasıyla yakıt tüketiminden kaynaklı emisyonlar ve dolaylı emisyonlar takip etmektedir. Kalsinasyondan kaynaklanan emisyonları, hammaddenin doğasından dolayı azaltmak oldukça zordur fakat mevcut en iyi teknolojiler değerlendirildiğinde, alternatif hammadde kullanımı ile bu emisyonların az da olsa azaltılabildiği görülmektedir. Bu konu sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Enerji tüketimi açısından bakıldığında ise, Türk çimento sektöründe üretim maliyet kalemleri içinde enerji maliyetlerinin yaklaşık %40'lık pay ile toplam üretim maliyetlerinin en önemli kısmını oluşturduğu görülmektedir. Enerji ihtiyacının hızla arttığı ama kaynakların gittikçe azaldığı dünyada, enerji yoğun sanayi sektörlerinin rekabet gücü açısından enerjinin verimli kullanılması büyük önem kazanmıştır. Günümüzde dünya enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılamakta olan fosil yakıt rezervleri gün geçtikçe tükenmekte, dünya ekonomisinin son yıllarda gösterdiği yüksek büyüme ve nüfus artışları nedeniyle enerji talebinin artmasına bağlı olarak da enerji fiyatları büyük artışlar göstermektedir. Özellikle, enerji konusunda dışa bağımlı ve dış ticaret açığı olan Türkiye gibi ülkelerde enerji verimliliği konusu daha da önem kazanmaktadır. Bu bağlamda mevcut en iyi teknolojiler değerlendirildiğinde atıktan türetilmiş alternatif yakıtların kullanımı, atık ısının proseslerde tekrar kullanılması, atık ısıdan elektrik üretimi gibi çimento sektöründe enerji verimliliğini artırmaya ve sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik birçok uygulama olduğu görülmektedir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmadaki amaç, küresel ısınmaya önemli oranda etkisi olan sanayi sektörlerinden biri olan çimento sektörünün dünyadaki ve ülkemizdeki mevcut durumunun değerlendirilmesi, IPCC metodolojisi kullanılarak çimento üretimi esnasında ortaya çıkan CO₂ emisyonlarının hesaplanması ve çeşitli senaryoların oluşturulmasını sağlayan bir uygulama geliştirilmesidir. Bu uygulama kullanılarak ülkemizdeki CO₂ emisyonları ile ilgili senaryolar oluşturulmuştur. Senaryolarda, 2023, 2030, 2050 yılları için klinker ve çimento üretim miktarları ile ilgili çeşitli öngörülerde bulunularak, sektörden kaynaklı CO₂ emisyonları hesaplanmış ve grafikler vasıtası ile sonuçlar değerlendirilmiştir.

Bölüm 2’de çimento sanayinin dünyadaki ve Türkiye’deki gelişimi, sektörün Türkiye ekonomisi içindeki yeri ve önemi, klinker ve çimento üretim miktarları hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca, çimento üretim proses ve teknolojileri ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Bölüm 3’te sera gazlarından, küresel ısınma tanımından ve küresel ısınma potansiyelinden bahsedilmiştir.

Bölüm 4’te çimento sektöründe teknolojiye ve enerji tüketimine bağlı olarak sektör kaynaklı emisyonların nasıl oluştuğu açıklanmaktadır. Bu bölümde ayrıca, çimento sektöründe mevcut en iyi teknolojilerden bahsedilmiştir.

Bölüm 5’te çimento üretimi ile ilgili sera gazı emisyonlarının nasıl hesaplandığı ve TÜİK verilerine göre ülkemizin 1990-2010 sera gazı emisyon envanteri değerlendirilmiştir.

Bölüm 6’da çimento sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarını hesaplamak üzere IPCC Tier yaklaşımları yardımıyla IPCC 2006 Metodolojisi açıklanmıştır.

Bölüm 7’de “CO₂ Emisyonu Hesaplama Aracı” uygulaması, kullanılan programlama dilinin özellikleri ve uygulamanın nasıl kullanılacağı ile ilgili bilgi verilmiştir. Ayrıca, uygulama kullanılarak farklı girdilerle üç farklı senaryo oluşturulmuştur.

Bölüm 8 ve 9’da, çalışmanın genel bir değerlendirmesi yapılmış, senaryoların sonuçları değerlendirilmiş ve bu tez çalışması baz alınarak ileride çalışılabilecek yeni konularla ilgili önerilerde bulunulmuştur.

1.2. Literatür Araştırması

Sürdürülebilir çimento üretimi ve çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları ile ilgili şu ana kadar birçok çalışma ele alınmıştır. Bu bölümde, çimento üretiminde lider ülke durumunda olan Çin’de ve Avrupa Birliği’ne bağlı ülkelerde çimento sektörünün mevcut durumu ve sera gazı emisyonları, mevcut en iyi teknolojilerin çimento sanayiine uygulanması, çimento sanayiinde enerji verimliliği, düşük CO₂ emisyonu veren çimento üretimi ve emisyon ticareti gibi konularla ilgili literatürde bulunan çalışmalardan örnekler verilmiştir. Ayrıca ülkemizin CO₂ depolama potansiyeli, ülkemizde enerji tüketimi, CO₂ emisyonları, Türk çimento sektöründe ekserji analizleri ile yüksek performanslı ekolojik çimento üretimi, çimento fırınlarında atıktan türetilmiş yakıtların kullanılması gibi çeşitli konularla ilgili literatürde bulunan çalışmalar incelenmiştir.

Literatüre bakıldığında, "Çimento ve Kireç Endüstrileri için Mevcut En İyi Teknolojiler" referans dokümanında, çimento üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanması için mevcut en iyi teknolojilerin (BAT) uygulanması ile fosil yakıt tüketiminin azaltılması, uygun atıkların hammadde ve yakıt olarak kullanılması, düşük organik bileşen içeren hammadde seçimi, enerji verimliliği yüksek ekipman seçimi gibi çözüm yollarından sıkça bahsedildiği görülmektedir. Tüm bu çözüm yolları CO₂ emisyonlarında azalmaya neden olmaktadır.

Dejaa ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada [5], yukarıda bahsedilen çözüm yollarının Polonya çimento sektöründe uygulandığı belirtilmiş, Polonya çimento endüstrisinin 1998-2008 yılları arasındaki gelişimi ve CO₂ emisyonu miktarı değişim nedenleriyle birlikte incelenmiştir. Ülkede çimento sektöründen kaynaklanan emisyonların azaltımına dair potansiyel yollardan bahsedilmiştir. Bu yollar özet olarak şu şekilde sıralanabilir:

1. Enerji verimliliğindeki artışlardan dolayı emisyonların azaltılması
2. Çimento üretiminde atıkların hammadde veya katkı maddesi olarak kullanılması
3. Emisyon ticareti
4. CO₂ yakalama ve depolama
5. CO₂'in betona bağlanması

Gartner tarafından yapılan çalışmada [6], portland çimentosuna denk performansa sahip fakat düşük CO₂ emisyonuna neden olacak yeni bir tür çimento üretimi tartışılmıştır. Günümüzde, çimento sektörü, hızlı bir şekilde, çeşitli endüstriyel yan ürünlerin ve arıtma çamuru veya uçucu kül gibi katkıların kullanılmasıyla katkılı çimento üreterek talebi karşılamaya çalışmaktadır. Yapılan çalışmalarda, gelecek vaat eden düşük CO₂ içeriğine sahip portland çimentosuna alternatif çimentoların;

1. Puzolan bazlı çimentolar
2. Kalsiyum (sülfo) alümina bazlı çimentolar
3. Kalsiyum sülfat bazlı çimentolar olabileceği düşünülmektedir.

Schneider ve diğerlerinin yaptığı çalışmada [7], çimentonun küresel konutlaşma ve modern yapılaşma ihtiyacı için anahtar materyal olarak kalacağı ve sonuç olarak, çimento endüstrisinin küresel olarak büyüyeceğinin açık olduğu belirtilmiştir. Bu büyüme neticesinde ise CO₂ emisyonlarının azaltılmak zorunda kalınacağı düşünülmektedir. Yapılan çalışmaya göre, Uluslararası Enerji Enstitüsü (IEA), çimento endüstrisinde CO₂ emisyonlarını azaltmak için temel yolların; enerji verimliliğini arttırmak ve alternatif materyallerin hammadde kaynağı veya yakıt olarak kullanımını sağlamak olduğunu belirtmektedir. Gelecekteki çimento üretimi için yeni materyallerin çimento bileşenleri olarak rol oynayabileceği düşünülmektedir. Önemli olan üretilecek olan klinkerin portland çimentosu klinkerinin yerini ne oranda tutabileceğidir. Söz konusu çalışmada, tüm bu kapsamda sürdürülebilir çimento üretimi değerlendirilmiştir.

Valderrama ve diğerlerinin yaptığı çalışmada [8], İspanya'da bir çimento üretim tesisinde eski olan 3 üretim hattının yeni bir üretim hattı ile değiştirilmesi ile bir iyileştirme çalışması yapılmıştır. Yeni kurulan üretim hattı, çimento üretimindeki mevcut en iyi teknolojiler (BAT) göz önünde bulundurularak dizayn edilmiş ve sisteme entegre edilmiştir. Yenilenen tesiste yeni fırın sisteminin enerji

verimliliğinden dolayı çok önemli gelişmeler elde edilmiştir. Bu çalışmada, SimaPro 7.2 yazılımı kullanılarak yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılmıştır. SimaPro 7.2 yazılımı, yeni üretim hattının çevresel etkiler konusunda, küresel ısınma %5, asidifikasyon %15, ötfrikasyon %17 ve kümülatif ekserji ihtiyacı %13 olacak şekilde önemli bir azaltım sağlanacağını göstermektedir. Ayrıca, yeni kurulan hattın, insan hayatına % 11, ekosistem kalitesine %11 ve kaynaklara %14 daha az zarar verdiği sonucuna ulaşmıştır.

Pardo ve diğerlerinin yaptığı çalışmada [9], çimento sektörü ile ilgili 3 senaryo çalışılmıştır: BS (Temel Senaryo), mevcut gelişmelerin göz önünde bulundurulduğu senaryo ve iki alternatif senaryo (A1) ve (A2), sırasıyla yakıt ve CO₂ emisyon değerleri ile ilgili olan senaryolardır. BS senaryosunun sonuçlarına göre, termal enerji verimliliğinde ve birim klinker başına oluşan CO₂ emisyonunda, 2002 yılıyla kıyaslandığında, 2030 yılında sırasıyla %11 ve %3,7 azalma olduğu görülmektedir. Sonuçlar, BS senaryosu için termal enerji tüketiminde önemli azaltım sağlayacak birçok iyileştirme yapılabildiğini göstermektedir.

Madlool ve diğerlerinin yaptığı çalışmada [10], çimento tesislerinde farklı bölümlerde enerji kullanımı, spesifik enerji kullanımı, çimento üretim proseslerine ait detaylar ve birçok enerji tasarrufu ölçümleri yapılmıştır. Yapılan enerji tasarrufu ölçümleri uygulama ücreti de düşünülerek ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. CO₂ azaltım miktarı da farklı enerji tasarrufu ölçümleriyle ve geri dönüşüm periyotlarıyla birlikte sunulmuştur. Bu çalışma yüksek lisans ve doktora tezleri kapsamında gerçekleştirilen geniş bir literatür taramasından sonra hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda enerji kullanımının azaltılması (enerji verimliliği) kapsamında birçok sonuç ortaya çıkmıştır. Bunlardan birkaç tanesi aşağıda belirtilmiştir:

1. Çimento sektörü, enerji tüketimi yüksek sektörlerdendir ve bir ülkenin toplam enerji tüketiminin yaklaşık %12-15'ini oluşturmaktadır.
2. Ön ısıtma ve prekalsinasyon (pyro-processing) toplam enerji tüketiminin çok büyük kısmını kapsamaktadır.
3. Döner fırın fanları için hız ayarlama cihazları, sisteme entegre edildiğinde %30'a varan bir enerji tasarrufu 2- 3 yıllık bir geri ödeme süresi ile sağlanabilmektedir.

4. Döner fırınlarda yanma sistemine yapılacak yenilemeler ile 1 yıllık geri ödeme süresi ile %2-10 arasında enerji tasarrufu sağlanabilmektedir.

Moya ve diğerlerinin yaptığı çalışmada [11], Avrupa Birliği ülkelerindeki çimento üretim tesislerinde enerji tüketimi ve CO₂ azaltımını gerçekleştirebilmek için mevcut en iyi teknolojilerin (BAT) maliyet açısından etkinlik analizleri yapılmıştır. Birçok anapara bütçelemesi karar kriteri (geri ödeme periyodu, net bugünkü değer, karlılık oranı) yatırım yapmaya değip değmeyeceğini anlamak amacıyla kullanılmıştır. Çalışma sonucunda klinker üretiminde muhtemel termal enerji iyileştirmelerinin, mevcut en iyi teknolojilerin tümü uygulandığında %10 civarında olacağı sonucuna varılmıştır.

Ke ve diğerlerinin yaptığı çalışmada [12], 2010 yılında Çin'in çimento üretim miktarının yaklaşık 1,9 giga ton olduğu ve bu miktarın dünya çimento üretiminin yaklaşık %56'sını oluşturduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını hesaplamak için birçok metodoloji karşılaştırılmıştır. Oluşan CO₂ emisyonları, üç kategori altında toplanmaktadır: kalsinasyon prosesinden kaynaklanan doğrudan emisyonlar, fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan doğrudan emisyonlar ve elektrik tüketiminden kaynaklanan dolaylı emisyonlar. Çalışmada, bu üç kategori içinde en çok kullanılan metodolojilere ait farklar detaylı olarak araştırılmıştır. Çalışma sonucunda %10-18 oranında bir nispi belirsizlik değerine ulaşılmıştır. Çalışma sonunda, "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" ve "CSI Cement CO₂ and Energy Protocol"ün, özenli bilimsel analizlere dayandığı, kapsamlı ve güvenilir sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır.

Okandan ve diğerlerinin yaptığı çalışmada [13], son 15 yıldır, CO₂ emisyonlarının jeolojik depolanmasının giderek önem kazandığı belirtilmektedir. Bu çalışma, Türkiye'de CO₂ depolamak için muhtemel jeolojik alanların araştırılmasını, kapasitesi 500 MWh'ın üzerinde olan termik santrallerin, çimento fabrikalarının, demir çelik fabrikalarının ve rafinerilerin CO₂ emisyonu potansiyellerinin araştırılmasını kapsamaktadır. Emisyonların hesaplanmasında, IPCC metodolojisi kullanılmıştır. Çalıştırılan modelin sonuçlarına göre, doğal CO₂ depolama alanlarından birisinin Bingöl ilinde yer alan Dodan ilçesi olduğu belirlenmiştir. Diğer muhtemel CO₂ depolama alanlarının ise Trakya Bölgesi'nde, Orta Anadolu ve Türkiye'nin güneybatısındaki derin deniz tuzu formasyonları ve soda madenleri içerisindeki tuz

mağaraları olduğu belirlenmiştir. CO₂ yakalama ve depolama teknolojisi, günümüzde dünyanın birçok ülkesinde olduğu gibi Türkiye'de de araştırma seviyesindedir, uygulamaya henüz geçilmemiştir.

Kaygusuz tarafından yapılan çalışmada [14] öncelikle, Türkiye'nin enerji ve elektrik ihtiyacının hızla arttığı belirtilmiştir. 1990 yılından itibaren enerji tüketimi yıllık ortalama 4,3 artmaktadır. Tahmin edilebileceği üzere, enerji üretimi ve tüketimindeki bu hızlı artış, hem çevresel, hem bölgesel, hem de küresel açıdan büyük oranda emisyonu beraberinde getirmektedir. Küresel çevre sorunlarına gelince, Türkiye'nin CO₂ emisyonları, enerji tüketimiyle birlikte ciddi oranda artmaktadır. 2004 yılındaki emisyonlar, 194 milyon tona ulaşmıştır. CO₂ küresel ısınmaya sebep olan en önemli sera gazıdır. Günümüzde kömür dünya toplam CO₂ emisyonlarının %30-40'ından sorumludur. Ülkemiz de aynı durumdadır ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelerek CO₂ emisyonlarını düşürmek yoluna gitmelidir. Bu çalışmada, tüm bunlar kapsamında ülkemizin sürdürülebilir büyümesi tartışılmıştır.

Söğüt tarafından yapılan çalışmada [15], Türk çimento sektörü ve sektörden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının ekserji verimliliği, ekserji kayıpları ve çevre etkileri 1999-2007 yılları arasındaki klinker üretimi göz önünde bulundurularak araştırılmıştır. Termodinamik analizler yapıldıktan sonra, ekserji kayıpları, gelişmeler ve enerji potansiyelleri açısından klinker üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları belirlenmiştir. Fırının ekserji verimliliği ve gelişme potansiyeli yaklaşık %43,04 olarak belirlenmiştir.

Arkan tarafından yapılan çalışmada [16], yüksek performanslı çimento üretiminin Türk çimento üreticileri için kazanlı olup olmadığını anlamak amacıyla bir fizibilite çalışması yapılmıştır. İndirim oranları, kredi miktarları, faiz oranları, verimlilik gibi birçok parametre etkisi incelenerek çalışılmıştır. Yüksek performanslı çimentodan kasıt, katkılı çimento veya yüksek hacimli mineral katkılı çimentodur. Finansal analiz neticesinde; bir çimento üreticisi için, Türkiye'de yüksek performanslı çimento üretimi yatırımı yapmak uygulanabilir görülmektedir. Toplam yatırım maliyeti yaklaşık 3,5 milyon dolardır.

Kara ve diğerlerinin yaptığı çalışmada [17], dünya nüfusunun hızla artmasının getirdiği en büyük problemlerden birisinin insanların günlük ürettikleri çöp miktarı olduğu ve bu çöpleri bertaraf etmenin gerekli olduğu belirtilmiştir. Atıkların tekrar

milli servetimize katılması anlamında ülkemizde yapacağımız çalışmalar geleceğimize yaptığımız kalıcı bir yatırımdır. Çimento tesislerindeki fırınlarda alternatif yakıtların kullanımı ile maliyetlerin düşürülmesi, fosil yakıtlardan tasarruf ve atık malzemelerin bertarafı sağlanmaktadır. Çimento endüstrisinin atık yönetimine çözüm getirmede önemli bir potansiyeli vardır. Ayrıca atıktan enerji kazanımı, CO₂ emisyonlarının düşürülmesinde önem taşımaktadır. Bu çalışma, kentsel katı atıktan türetilmiş RDF'nin çimento endüstrisinde ek yakıt olarak kullanılmasını ve oluşan emisyonun irdelenmesini kapsamaktadır. Elde edilen sonuçlar ilgili tebliğde verilen değerler ile kıyaslanarak çevreye saygılı optimum RDF kullanım oranı belirlenmiştir.

2. DÜNYADA ve TÜRKİYE’DE ÇİMENTO ÜRETİMİ

“Çimento” ismi, Latince yontulmuş taş kırıntısı anlamındaki “caementum” sözcüğünden gelmektedir. Çimento, su ile karıştırıldığında hidrasyon tepkimeleri sonucu sertleşen, sertleşme sonrası dayanım ve kararlılığını koruyan, öğütülmüş halde kullanılan inorganik bir bağlayıcıdır. Çimentoyu oluşturan ana bileşenler klinker ve alçı taşıdır. Klinker ve alçı taşına belirli oranlarda tras, cüruf, silis dumanı ve diğer bazı maddeler ilave edilerek katkılı çimento üretilmektedir [18].

2.1. Sektörün Gelişimi ve Günümüzdeki Durumu

Çimentonun tarihi antik çağlara kadar uzanmaktadır. Bağlayıcı olarak kullanılan en eski malzemenin kireç olduğu bilinmektedir. Saf kireç taşı ısıtılarak kireç üretilmiş, su ilave edilerek kumla karıştırılmış ve kireç harcı elde edilmiştir. Kireç harcı da bağlayıcı olarak kullanıldığında havada sertleşerek iki tarafındaki kayalar arasında sağlam mekanik bir bağ oluşturmuştur. Tarih boyunca inşaat işlerinde kullanılan bağlayıcı malzemeler medeniyetlerin gelişmesine vesile olmuştur. İlk beton Roma İmparatorluğunda kullanılmıştır. Roma’da “The Castel Sant’Angelo”, MÖ 138’de yapılmıştır. Günümüzde bu binada taşlar aşınmışken, bina beton özelliğini hala korumaktadır. Mısır Piramitleri, Çin Seddi ve değişik zamanlarda yapılan kaleler gibi dönem medeniyetlerini simgeleyen birçok yapıda değişik bağlayıcılar kullanılmıştır.

Çimentonun kullanılması konusunda Avrupa’da yaşayanlar Romalıların gerisinde kalmıştır. Harçlar özellikle kireç kullanılarak hazırlanmış, bu nedenle de sertleşme daha geç gerçekleşmiştir. Harç hazırlamada puzolan kullanımı Avrupa’da yaşayanlarca Orta Çağ’da yeniden keşfedilmiştir.

1756 yılında “Eddystone Deniz Feneri”ni inşa etmekle görevlendirilen John Smeaton, kirecin kimyasal özelliklerini incelemiş, kirecin bağlayıcı özelliği ile ilgili önemli sonuçlara varmıştır. Daha sonra bu çalışmaların ışığı altında Joseph Parker, hammaddesi Londra civarındaki kalkır taşları olan “Roma Çimentosu” adı ile bilinen bağlayıcıyı üretmiş, üretilen çimento kanal ve liman yapımında kullanılmıştır. Aynı

yıllarda İngiliz James Frost tarafından üretilen “İngiliz Çimentosu”, Roma Çimentosu kadar tutulmamıştır.

1824 yılında İngiltere’de duvar ustası Joseph Aspdin, öğütülmüş kil ve kireçtaşını, kireçtaşı kalsine oluncaya kadar ısıtmış, daha sonra da bu karışımı tekrar öğütmüş, öğütülmüş malzemeye su ilave edip karıştırdığında karışımın bir süre sonra sertleştiğini görmüştür. Aspdin, İngiltere’de yaygın olarak binaların yapımında kullanılan, İngiltere kıyısındaki Portland adasında işletilen taşocaklarındaki taşa benzediğinden ürettiği çimentoya “Portland Çimentosu” adını vererek patentini almıştır.

Dünya’da çimento üretim ve satışına 1875’li yıllarda başlanmasına karşın, Türkiye’nin çimento sektörü ile tanışması 1911 yılında olmuştur. Osmanlı döneminde ilk çimento fabrikası 1911 yılında Darıca’da kurulmuş, kurulduğunda yıllık 20.000 ton olan tesis kapasitesi 1923 yılında 40.000 tona çıkarılmıştır [18]. 1950’li yıllarda Ankara, Zeytinburnu, Kartal ve Sivas’ta 4 çimento fabrikası kurulmuştur. Bu fabrikalar yılda toplam 400.000 ton civarında çimento üretmişlerdir. Çimento fabrikaları ile 1938 yılında kurulan Karabük Demir ve Çelik Fabrikaları ülke imar ve sanayileşmesinin lokomotifleri olmuşlardır. Daha sonraki yıllarda yapılan yeni çimento fabrikaları ile 1970 yılında üretim 10 milyon tona ulaşmıştır. Bu yıllarda Türkiye, çimento talebi ile ilgili kendine yetecek konuma gelmiş, daha sonraki yıllarda da ülkemizin dış ticareti çimento ihracatı yönünde değişmiştir.

Ülkemizde 80’li yıllara kadar çimento üretimi devlet eli ile gerçekleştirilmiştir. Üretim artışı, verimlilik, teknoloji transferi, istihdam artışı, küreselleşme gibi kavramlarla tanışıldığı bu yıllarda, hükümetlerin sürdürdüğü ekonomi politikaları doğrultusunda çimento üretim tesislerinin tamamı kısa sürede özelleştirilerek devlet bu sektörden tamamen elini çekmiştir. 1980’li yıllardan sonra da ülkemizde entegre çimento tesisleri ve öğütme tesisleri kurulmaya devam etmiştir.

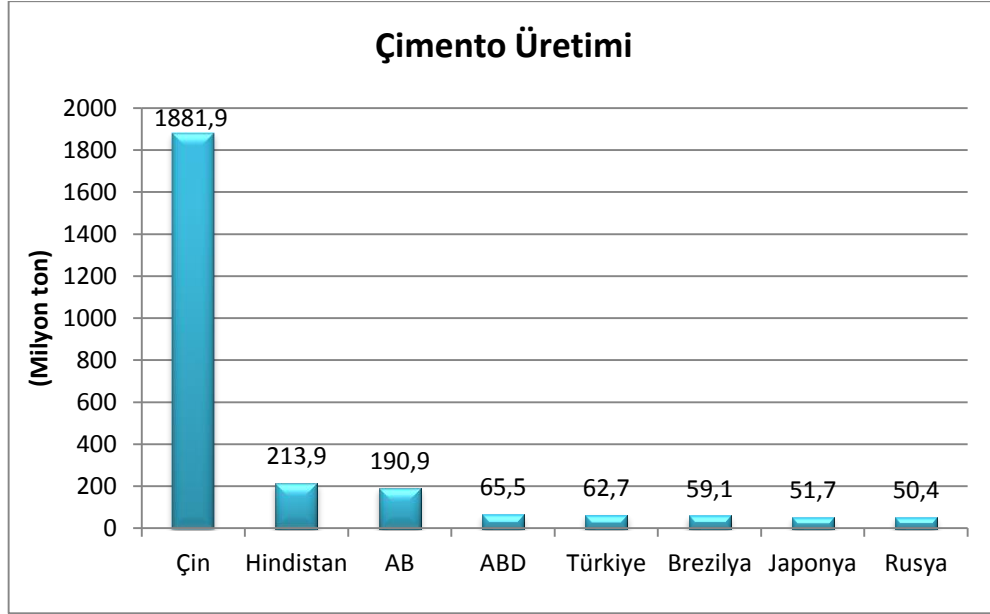
2012 yılında ülkemizde 48’i entegre, 19’u öğütme olmak üzere toplam 67 adet çimento üretim tesisi bulunmaktadır. Çizelge 2.1’de ülkemizdeki çimento üretim tesislerinin bölgelere göre dağılımı gösterilmektedir [19].

Çizelge 2.1 Ülkemizdeki çimento üretim tesislerinin bölgelere göre dağılımı

Bölge	Entegre Tesis	Öğütme Tesis
İç Anadolu	10	4
Marmara	10	3
Karadeniz	7	4
Akdeniz	6	2
G.Doğu Anadolu	6	1
Doğu Anadolu	5	2
Ege	4	3
Toplam	48	19

Dünya Pazarının Genel Durumu ve Türkiye'nin Pazardaki Yeri

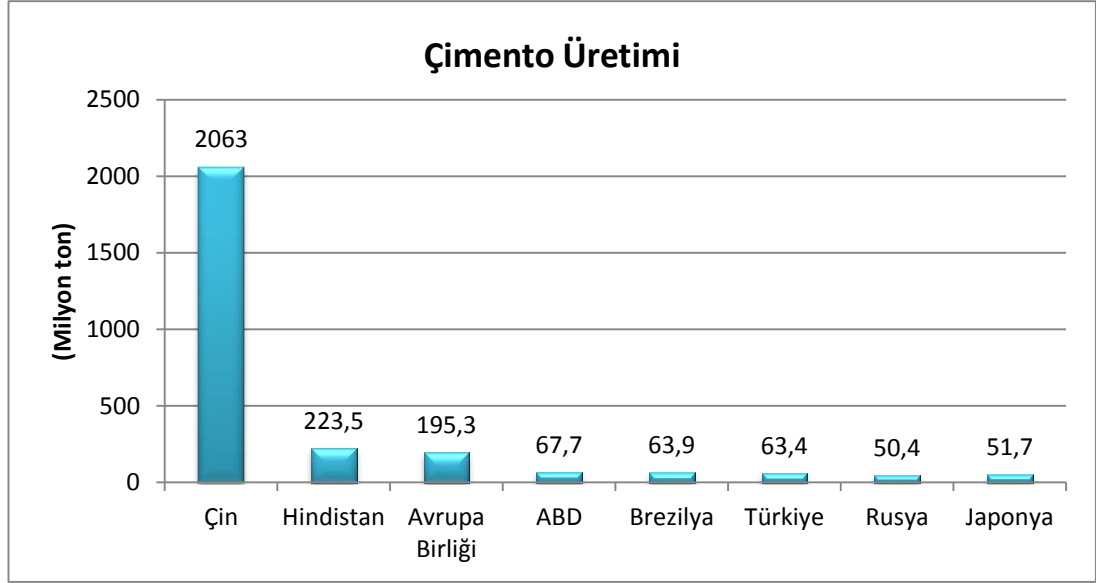
Dünya çimento üretim artışı, daha önceki yıllarda olduğu gibi 2010 yılında da devam etmiş, üretim kapasitesi yaklaşık 3,5 milyon tona, üretim bir önceki yıla göre %9,2 oranında artarak 3,3 milyar tona ulaşmıştır. 2010 yılında 149 çimento üreticisi ülke bulunurken, 17 ülkede herhangi bir çimento üretimi yapılmamıştır. 1.000 modern fabrika Çin'de olmak üzere toplam 2.360 entegre çimento fabrikası bulunmaktadır. Çin, 2010 yılında dünya çimento üretiminin %56,2'sini gerçekleştirmiştir [20]. Avrupa Çimento Birliği (Cembureau) üyesi ülkelerin çimento üretimi ise 2010 yılında dünya toplam çimento üretiminin %8'ini oluşturmaktadır [21]. Türkiye, 2010 yılında TÇMB üyesi olmayan tesisler dahil toplam 66,2 milyon ton çimento üretmiş, TÇMB üyeleri bazında ise yaklaşık 62,7 milyon ton çimento, 52,8 milyon ton klinker üretimi gerçekleştirmiştir [19]. Türk çimento sektörü, 2010 sonu itibarıyla Avrupa'da üretim ve ihracatta ilk sırada, dünyada ise ilk 10 üretici ve ilk 3 ihracatçı ülke arasında yer almıştır [22]. Şekil 2.1'de 2010 yılı dünya çimento üretiminde başlıca ülkeler gösterilmektedir [21].



Şekil 2.1 Dünya çimento üretiminde başlıca ülkeler, 2010

2011 yılında, dünyadaki birçok olgun ekonomide yaşanan belirsizlik ve hassasiyetlerden dolayı küresel ekonomik büyüme, beklentilerden daha düşük olmuştur. Avrupa'daki küresel kriz, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelere de kısmen sıçramıştır. Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya'daki güçlendirme aktivitelerine rağmen küresel büyüme ve dünya ticareti azalma göstermiştir. Bütün ekonomik olumsuzluklara rağmen 2011 yılında dünya çimento üretim miktarının gelişmekte olan ülkelerde %6, gelişmiş ülkelerde %1,65, toplamda %2,7 arttığı görülmektedir [23].

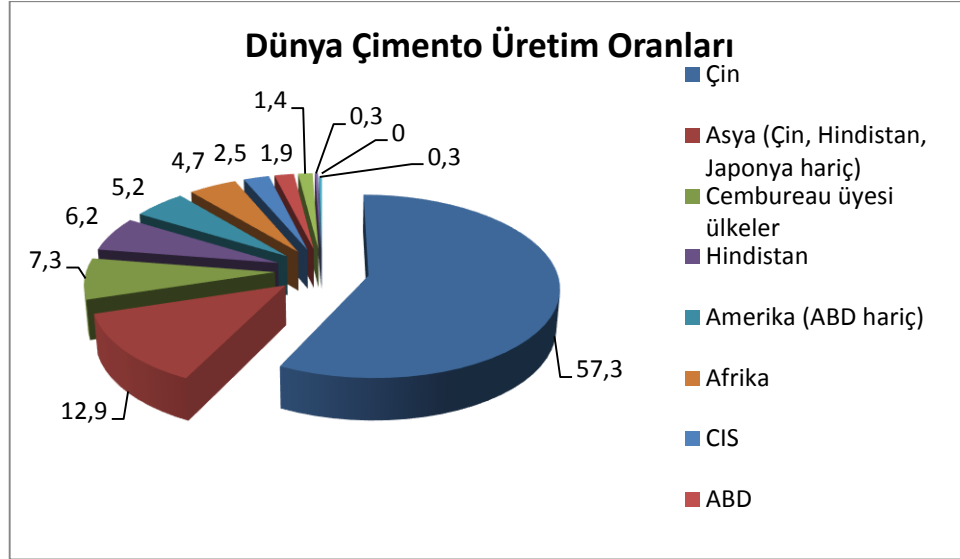
2011 yılı için dünya çimento üretimi 2010 ile kıyaslandığında %7,6 artarak yaklaşık 3,6 milyar ton olarak belirlenmiştir. Çin, 2010 yılına (%56,2) göre artış göstererek 2011 yılında dünya toplam çimento üretiminin %57,3'ünü gerçekleştirmiştir. Çin haricinde, küresel çimento üretimi 2011 yılında %4,9 artış göstererek bir önceki yıla kıyasla daha düşük bir artış göstermiştir. 2011 yılında dünya çimento üretiminde başlıca ülkelerin çimento üretim miktarları Şekil 2.2'de gösterilmektedir [23]. Grafikteki değerler Cembureau tarafından hesaplanmış değerlerdir. Türkiye, 2011 yılında, 63,4 milyon tonu TÇMB üyesi tesislere ait olmak üzere, toplamda 68 milyon ton çimento üretimi gerçekleştirmiştir. Sektör, 2011 yılında 2010 yılına göre artış göstererek dünya çimento üretiminin yaklaşık %1,9'luk kısmını oluşturmuştur [23].



Şekil 2.2 Dünya çimento üretiminde başlıca ülkeler, 2011

2011 yılında, Güney Amerika, Afrika ve Asya'da çimento üretimi %5 ve üzerinde artış göstermiştir. Bu bölgeler, sırasıyla dünya çimento üretiminin %3, %5 ve %78'ini oluşturmaktadır. Avrupa Birliği ülkeleri ise dünya çimento üretiminin %6'sını oluşturmaktadır [23].

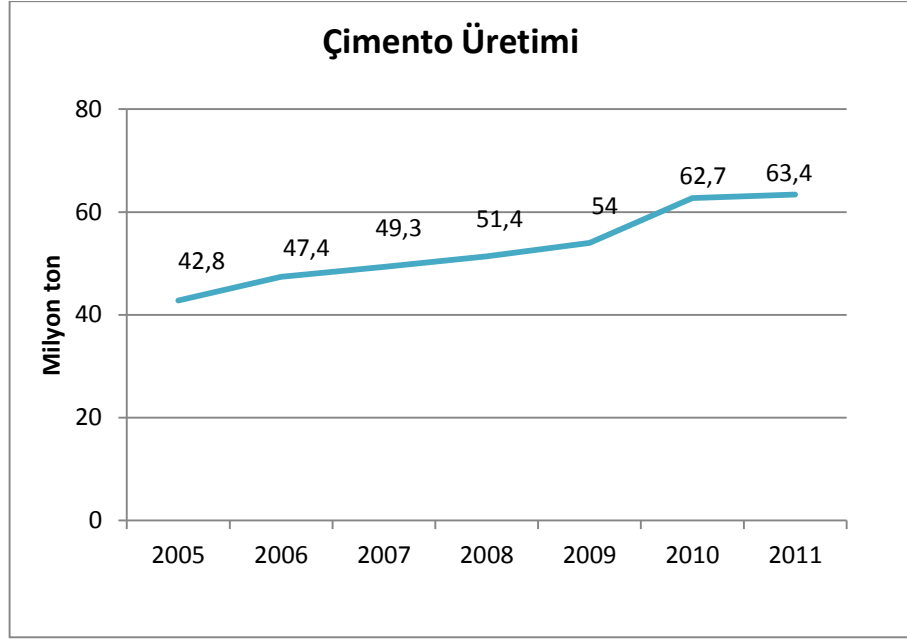
G7 ülkelerinde çimento üretimi, ABD'de %3,3 artış göstermişken; Japonya ve Kanada'da azalmalar görülmüştür. Daha yüksek büyüme oranları Almanya, Fransa ve İngiltere'de tespit edilirken, İtalya'da çimento üretimi büyüme oranı negatifte kalmıştır. Toplamda ise G7 ülkelerindeki çimento üretim artışı 2011 yılında %6,2 olarak belirlenmiştir. G20 ülkeleri içinde ise, yükselen ekonomiler için çimento üretiminde net artışlar olduğu görülmektedir. En yüksek artışların Endonezya, Rusya Federasyonu ve Arjantin'de gerçekleştiği kaydedilmiştir. Çimento üretim seviyelerindeki artışlar Avustralya, Hindistan ve Güney Afrika'da da dikkate değer şekilde fazladır. Buna karşın, ekonomik gerilemenin olumsuz etkileri, gelişmiş ekonomilerin birçoğunda hala gözle görülebilir durumdadır. Bu ülkelerde çimento üretimi sınırlı artışlar göstermiştir. Şekil 2.3'te 2011 yılı bölgeler ve başlıca ülkeler bazında dünya çimento üretim oranları gösterilmektedir [23].



Şekil 2.3 Bölgeler ve başlıca ülkeler bazında dünya çimento üretim oranları, 2011

Türkiye’de, 2011 yılında, bir önceki yıla kıyasla çimento ihracatı düşüş göstermiştir. Ülkemiz, 2010 yılında toplam 19 milyon ton ihracat gerçekleştirmişken, 2011 yılında toplam 14,4 milyon ton ihracat gerçekleştirmiştir. Bu düşüş, genel olarak dış piyasaların durumundan kaynaklanmasına rağmen, iç tüketimdeki artış bu düşüşün negatif etkilerini azaltmıştır [20]. Türkiye’de inşaat sektörü gelecek vaat etmektedir. Öngörüler 2012 yılında, ülke içi çimento talebinin %4-5 artacağını belirtmektedir [19].

2012 yılı Haziran ayı sonuna baktığımızda, ülkemizde, çimento üretiminde geçen yıla oranla %4,38’lik azalma olduğu görülmektedir. Bu dönemde üretilen çimentonun yaklaşık %17’si ihracata gitmiştir. Yine bu dönemde iç satışlarda %1,78 ve ihracatta %14,82 oranlarında daralmalar yaşanmıştır. Sektör, çok sert geçen kış aylarından sonra toparlanmaya başlamış ancak haziran ayı sonunda henüz geçen yılın rakamlarına ulaşamamıştır. Bölgesel olarak baktığımızda ise, üretimde Doğu Anadolu Bölgesi dışında, iç satışta Ege ve Doğu Bölgeleri dışında düşüşler yaşanırken, ihracatta neredeyse tüm bölgelerde düşüşler yaşanmıştır. En sert düşüşler üretimde ve iç satışlarda yaklaşık %9 ile Marmara bölgesinde yaşanmıştır. İhracatta ise Doğu Anadolu Bölgesinde %84 oranında düşüş yaşanmıştır [19]. Şekil 2.4’te ülkemizde, TÇMB üyeleri tesislerin 2005-2011 yılları arası gerçekleştirdikleri çimento üretim miktarları gösterilmektedir [23].



Şekil 2.4 Türkiye çimento üretimi, TÇMB üyeleri, 2005-2011

2.2. Sektörün Türkiye'deki Mevcut Durumu

2.2.1. Sektörün Türkiye Sanayisindeki/Ekonomisindeki Yeri

Ülkemize yarattığı katma değer ve sağladığı istihdam açısından en eski ve önemli sanayi dallarından olan çimento sektörü, sanayimizin en önemli yapıtaşlarından biri olarak nitelendirilebilir. Gerek yılların verdiği bilgi birikimi, gerek zengin hammaddeleri, gerekse uluslararası kalite ve standartlara uyum anlamında kendisini sürekli yenileyen yapısı ile sektör Avrupa ve dünya genelinde önemli yere sahiptir.

Günümüzde sektör, hammadde konusunda tamamen kendi kaynaklarını kullanmakta olup, üretimiyle ülke ihtiyacını karşılayabilmekte ve her yıl ihracat oranlarını artırmaktadır. 2001- 2007 yılları arasında %64 büyüyen Türkiye çimento pazarı, 2008 yılında da küresel krizin etkisine rağmen %2'lik bir büyüme kaydetmiştir.

Türk çimento sektörü, 2010 yılı sonunda Avrupa'da üretim ve ihracatta ilk sırada, dünyada ise ilk 10 üretici ve ilk 3 ihracatçı ülke arasında yerini almıştır [21]. Çimento endüstrisinin, 4 milyar dolarlık iş hacmi ve 900 milyon dolarlık ihracat kapasitesi ile Türkiye ekonomisinde özel bir yeri vardır [19].

2011 yılında, Türkiye ekonomisi %8,5 büyüme kaydetmiştir. Bu yükselen periyot boyunca, inşaat sektörü %11,2 büyüme kaydetmiş, çimentoya olan iç talep de %11 artmıştır. 2010 yılında Türkiye bazında 50 milyon ton iç satış gerçekleşmişken 2011 yılında 55,7 milyon ton iç satış gerçekleşmiştir. Ayrıca 2011 yılında çimento ihracatımızda bir önceki yıla göre %19,1 oranında bir düşüş yaşanmıştır. Bu düşüşteki etken ise en çok ihracat yaptığımız Orta Doğu ülkeleri ve Kuzey Afrika ülkelerinde yaşanan toplumsal olayların ticareti aksatması olarak değerlendirilmektedir. 2011 yılı sonunda ülkemizin çimento ihracatı 12 milyon ton, klinker ihracatı ise 2,4 milyon ton olarak gerçekleşmiştir [19].

Yüksek kaliteli üretimiyle 100'ün üzerinde ülkeye ihracat gerçekleştiren Türk çimento sektörü yeni pazar arayışlarına devam etmektedir. 2011 yılı itibariyle çimento sektöründe en önemli ihraç pazarları Irak, Suriye, Rusya, İsrail ve İtalya olmuştur. 2012 yılında da mevcut pazarlarımızı koruyarak yeni pazarlar geliştirmek ülkemizin başlıca hedefidir. İthalat açısından baktığımızda ise, TÇMB'den alınan bilgiye göre Türkiye'de entegre çimento fabrikaları tarafından 2010 ve 2011 yıllarında klinker ve çimento ithalatı yapılmamıştır [19].

2.2.2. Sektörün Maliyet Bileşenleri

Türk çimento sektöründe maliyet açısından en önemli sorun, enerji maliyetlerindeki sürekli artış olup, bu sorun dünya çimento sektörlerine kıyasla ülkemize maliyet dezavantajı yaşatmaktadır.

Çimento üretiminde hammadde ve yardımcı maddeler ile enerji en önemli maliyet bileşenleridir. Üretimden sonra ihracatta da önemli bir yere sahip olan diğer bir maliyet kalemi ulaşımdır. Özellikle enerji ve ulaştırma maliyetleri sektörün pazardaki rekabetçiliğine zarar vermekte olup, sektör temsilcileri uluslararası rakiplerine göre maliyet dezavantajı yaşamaktadır [22].

Çizelge 2.2 Çimento sektörü maliyet bileşenleri

Türk Çimento Sektörü Sınai Maliyet Bileşenleri	Ortalama Maliyet (%)
Hammadde ve yardımcı maddeler	9,6
Elektrik	21,1
Yakıt	38,0
İşçilik	9,4
Amortisman	7,0
Diğer sabit giderler	13,1
Diğer	1,8
Toplam	100,0

Çizelge 2.2 incelendiğinde en büyük maliyet bileşeninin enerji giderleri olduğu görülmektedir [22]. Çimento sanayi 2010 yılında 4,6 milyon TEP (Ton eşdeğer petrol) tüketim miktarıyla, toplam sanayi enerji tüketiminden %1 pay almış ve en çok enerji tüketen ikinci sanayi dalı olmuştur. Bu durum itibarıyla sektörde enerji verimliliği çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Sektör, maliyet düşürücü modernizasyon yatırımları ile dezavantajlarını minimize etmekte ve ilerlemeye devam etmektedir [19].

2.2.3. Sektörde Üretilen Başlıca Ürünler

Ülkemizde, genel amaçlı çimentolar “CEM çimentosu” olarak adlandırılarak Avrupa Birliği ile uyum içerisinde olan TS EN 197-1 standardına göre üretilmektedir. CEM Çimentosu, hidrolik sertleşmesi kalsiyum silikatların hidrasyonu sonucu oluşan, içindeki reaktif “CaO+SiO₂” oranının en az %50 olması gereken çimentodur. Bileşiminde portland çimentosu klinkeri, kalsiyum sülfat ve çeşitli mineral katkıları vardır. TS EN 197-1 deki “CEM çimentoları”nın ana türleri:

- CEM I Portland Çimentolar
- CEM II Portland Kompoze Çimento
- CEM III Yüksek Fırın Cürufu Çimento
- CEM IV Puzolanik Çimento
- CEM V Kompoze Çimento

Bu türler haricinde gerek klinker üretimi sırasında, gerekse sonradan ilave edilen mineral katkıları sayesinde özel kullanım amaçlı olarak üretilmiş, TS EN 197-1 standardının kapsadığı 5 çeşit daha çimento bulunmaktadır. Bu çimento türleri:

- Sülfatlara Dayanıklı Çimentolar
- Beyaz Portland Çimentosu
- Harç Çimentosu
- Yüksek Fırın Cürufu Katkılı, Düşük Erken Dayanımlı Çimentolar
- Çok Düşük Hidratasyon Isılı Özel Çimentolardır [2].

2.2.4. Türk Çimento Sektörü Kapasite ve İstihdam Durumu

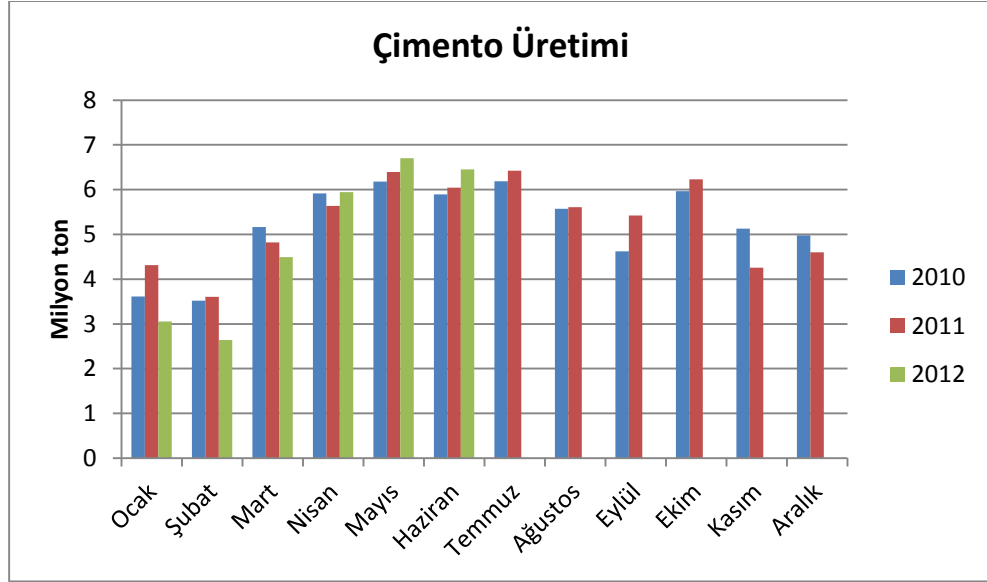
Çimento sektörü 2011 yılı klinker üretme kapasitesi 65,1 milyon ton, çimento öğütme kapasitesi 106,4 milyon ton iken TÇMB üyesi olan fabrikaların 2011 yılı kapasite kullanım oranları, klinker için %90,12; çimento için %63,41'dir. Türk çimento sektörü, dünya çapında ilk 10 içerisinde yer almakta olup 2012 yılının ilk yarısında çimento üretimi 29,3 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Çizelge 2.3'te 2011 yılı bölgelere göre çimento üretim kapasiteleri ve kapasite kullanım oranları gösterilmektedir [19].

Çizelge 2.3 Bölgelere göre çimento sektörü tesis kapasiteleri, 2011

Bölge	Klinker		Çimento	
	Kapasite (ton)	Kapasite Kullanım Oranı (%)	Kapasite (ton)	Kapasite Kullanım Oranı (%)
Marmara	17.481.907	96,82	27.404.66	65,56
Akdeniz	15.869.750	81,76	25.708.64	56,21
İç Anadolu	9.714.773	90,22	15.490.30	64,81
G.Doğu	6.137.000	86,70	10.306.50	65,86
Ege	5.997.123	88,83	8.491.200	68,83
Karadeniz	5.951.080	96,00	11.697.21	71,04
Doğu Anadolu	3.977.000	94,68	7.386.640	53,63
Toplam	65.128.633	90,12	106.485.1	63,41

Not: Kapasite miktarları Türkiye'deki tüm fabrikalar için, Kapasite Kullanım Oranı TÇMB Üyesi fabrikalar için verilmiştir.

Şekil 2.5'te ülkemizde 2010, 2011 ve 2012 yılının ilk 6 ayına ait aylara göre çimento üretim miktarları gösterilmektedir [19]. Şekil incelendiğinde çimento üretiminin mevsimlere ve aylara göre dalgalanmalar gösterdiği; özellikle Ocak ve Şubat gibi kış aylarında üretimin düştüğünü, ilkbahar ve yaz aylarında ise üretimin arttığı görülmektedir.



Şekil 2.5 Türkiye çimento üretimi, 2010, 2011, 2012 yılları

Türk çimento sektöründe 48 adet entegre tesis, 19 adet öğütme-paketleme tesisi olmak üzere toplam 67 çimento üretim tesisi vardır. Bu tesislerde yaklaşık 15,000 kişi istihdam edilmektedir.

Çimento üreticileri, Şekil 2.6'da görüldüğü gibi yoğun olarak Marmara, İç Anadolu ve Ege Bölgesi'nde olmakla birlikte ülkemizin geneline yayılmış durumdadır [19].



Şekil 2.6 Çimento üretim tesislerinin ülkemizdeki dağılımı

2.3. Yaygın Olarak Kullanılan Çimento Üretim Süreçleri

Çimento üretiminde dünyada kullanılan kuru, yarı-kuru, yarı-yaş ve yaş olmak üzere dört ana üretim süreci vardır. Seçilecek olan üretim süreci, büyük ölçüde hammaddelerin durumuna göre (kuru veya yaş) tespit edilir. Dünya klinker üretiminin büyük bir bölümü halen yaş üretim süreçlerine dayalıdır. Ancak Avrupa’da ve ülkemizde üretimin %90’dan fazlası kuru hammaddelerin mevcut olması nedeniyle kuru üretim sürecine dayalıdır.

2.3.1. Kuru Yöntemle Klinker Üretim Süreci

Ülkemizde en çok kullanılan üretim süreci kuru yöntemle klinker üretme sürecidir. 2012 yılında ülkemizde yaş üretim sürecini kullanarak klinker üreten tek fabrika da yeni bir döner fırın yatırımı yaparak kuru yöntemle klinker üretme sürecine geçiş sağlamıştır. Ülkemizdeki şu an 48 entegre çimento fabrikasının 47’si kuru yöntemle, kalan 1 tanesi de yarı kuru yöntemle klinker üretmektedir [19].

Kuru yöntemle klinker üretilirken, hammaddeler akıcı toz şeklindeki farini oluşturmak üzere öğütülür ve kurutulur. Kuru farin ön ısıtıcıya veya prekalsinasyon fırınına veya nadiren uzun kuru fırına beslenir. Ön ısıtma sistemlerinin kuru proseslere entegre edilmesiyle kuru üretim sürecinde kullanılan fırınların enerji tüketimlerinde önemli azalmalar sağlanmaktadır. Ayrıca, ön kalsinasyon sistemlerine sahip yeni fabrikaların kurulması ve mevcut fabrikalarda ön kalsinasyon uygulamasına geçilmesi sayesinde bir taraftan kuru fırınların enerji tüketimlerinin daha da azaltılması sağlanırken diğer taraftan önemli verimlilik artışları kaydedilmiştir [2].

Yaş ya da yarı yaş klinker üretim sürecinde hammaddeye az da olsa ilave edilen suyun ısıl işlem sürecinde ortamdan alınması üretime ek maliyet getirmektedir. Maliyetin düşürülmesi için, daha az yakıt kullanmak, ısı kayıplarını önlemek, ortamdaki ısıнын tamamının faydalı enerjiye dönüştürülmesini sağlamak için diğer üretim süreçleri yerine kuru üretim süreci kullanılması tavsiye edilmektedir. Kuru yöntemle klinker üretme süreci ön ısıtmalı, kalsinatör sistemli ve iki kalsinatör sistemli klinker üretme süreçleri olarak üçe ayrılabilir.

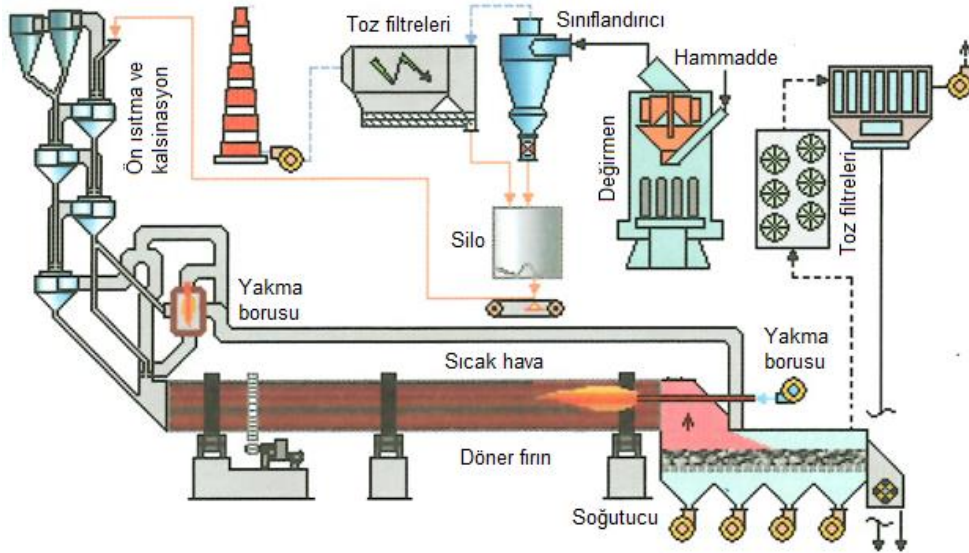
2.3.1.1. Ön Isıtmalı Klinker Üretim Süreci

Bu yöntemde, değişik boyutta siklonların kullanıldığı ön ısıtma işlemleri geliştirilmiştir. En basit ön ısıtma grubu 4 siklondan oluşmakta, gerekli ısı da fırın çıkış gazından sağlanmıştır. Genellikle 4 siklondan oluşan ön ısıtma kulelerine üstten verilen öğütülmüş hammadde, fırından gelen sıcak hava ile temas ettirilerek, kurutma ve ön ısıtmanın yanı sıra hammadde yaklaşık %10 oranında da kalsine edilmektedir. Soğutucudan çıkan ısının önemli bir kısmı fırında, kalan kısmı da kömürün ve hammaddenin kurutulmasında kullanılmaktadır.

Fiziki bazı kısıtlamalar nedeniyle kanalda yakılabilecek yakıt miktarı sınırlıdır. Kanalda kullanılan yakıt miktarı toplam yakıtın ancak %25'i kadardır. Bu sistemde fırın gazının tamamı yakma kanalından geçtiğinden, yanma sonucu alıcı ortama daha düşük NO_x emisyonu salınmaktadır [18].

2.3.1.2. Kalsinatör Sistemli Klinker Üretim Süreci

Bu süreçte soğutucudan siklonlara ısı kanalıyla bağlantı yapılmıştır. Soğutucudan gelen havanın sıcaklığı siklonlara verilmeden önce kalsinatördeki yakma odasında arttırılmaktadır. Bu yöntemde tesiste tüketilen yakıtın yaklaşık %40-50'si fırında, %50-60'ı kalsinatördeki yakma odasında yakılmaktadır. Sıcak hava ile de siklonlarda hammaddenin %90-95 oranında kalsinasyonu sağlanmaktadır. Bu üretim yönteminin kullanımı ile fırın boyları kısalmış, fırınlarda daha az yakıt tüketimi ile yüksek kapasitede klinker üretimi gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.7) [18].



Şekil 2.7 Kalsinatör sistemli çimento üretim süreci

2.3.1.3. İki Kalsinatör Hatlı Klinker Üretim Süreci

Fırın öncesi ön ısıtma siklonları iki ayrı hat olarak yapılmıştır. Her hatta ayrı yanma odası konulabileceği gibi bir tek yanma odası ile iki hattaki hammaddenin tamamının fırın öncesi kalsine edilebilme özelliği vardır.

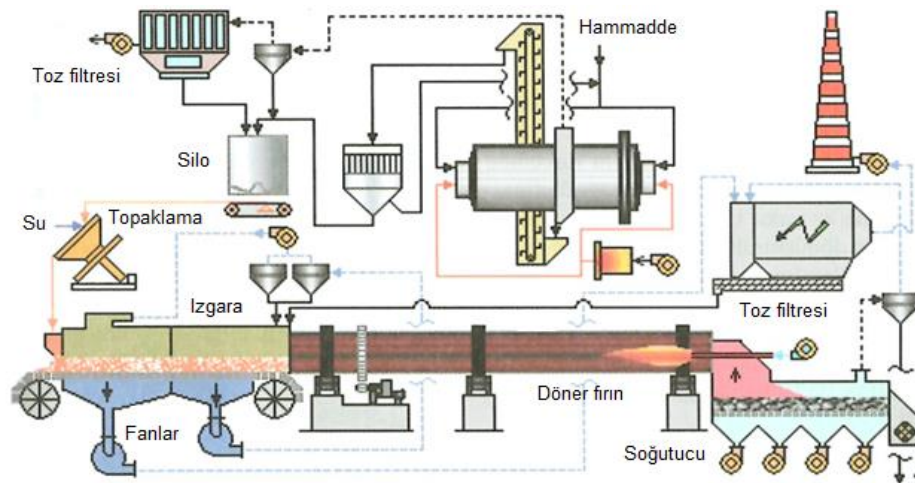
Sistemde yakıt seçme esnekliği, hatta düşük uçuculu yakıtların kullanılma olanağı da vardır. Her iki kalsinatöre soğutucudan gelen sıcak hava bağlanmaktadır. Yöntemde iki kalsinatör hattındaki işlem fanlarla birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Hava akışı, fanlar ve basınç kontrolü ile sağlanmaktadır. Sistemde sıcaklık kontrolü kolay olup hammadde %95 oranında kalsine edilebilmektedir. Temizlenmesi için fırın çıkış gazının yaklaşık %30'unun yan geçişle verilebilme olanağı vardır.

Günümüzde kurulan modern kalsinatörlü klinker üretim tesisleri klasik tesisler haline gelmiştir. Bu yöntemle daha küçük alanlara kısa fırınlarla, düşük maliyetli üretim yapan yüksek kaliteli tesisler kurulabilmektedir [18].

2.3.2. Yarı Kuru (Lepol) Yöntemle Klinker Üretim Süreci

Yarı kuru klinker üretim sürecinde kuru öğütme sonrası yaş öğütmeye göre oldukça az sayılabilecek su ilavesi ile öğütülmüş hammaddeden uygun boyutta topaklar oluşturulmakta ve bu topaklar fırın öncesi ızgara sisteminde kurutma ve ön ısıtma sonrası fırına gönderilmektedir.

Yarı kuru (lepol) klinker üretim yöntemi uzun yıllar çimento fabrikalarında klinker üretiminde yaygın olarak kullanılmıştır [18]. Ülkemizde 2012 yılı itibariyle bu yöntemle klinker üreten bir adet fabrika bulunmaktadır [19]. Şekil 2.8’de yarı kuru (lepol) klinker üretim sürecine ait bir akış şeması gösterilmektedir [18].



Şekil 2.8 Yarı kuru (lepol) klinker üretim süreci

2.3.3. Yarı Yaş Yöntemle Klinker Üretim Süreci

Kuru öğütme işlemi yaş öğütmeye göre daha zor olup fazla enerji gerektirmektedir. Yarı kuru klinker üretim sürecinde hammadde kuru olarak öğütülmekte, öğütülmüş kuru malzemeye %10 civarında su eklenerek topaklar oluşturulmaktadır. Fırın öncesi topaklar haline getirilmiş hammaddenin içerdiği %10 oranındaki nem, ızgarada ortamdan uzaklaştırılmaktadır. Kurutma ve ön ısıtma işlemleri ızgara yerine siklonlarda yapılmaktadır. Filtreleme esnasında birbirine yapışarak topaklar haline gelmiş hammadde uygun bir ekipman ile dağıtılarak ön ısıtma siklonlarına, siklon sonrası da fırına beslenmektedir [18].

2.3.4. Yaş Yöntemle Klinker Üretimi

Bu yöntemde, kurutma, ön ısıtma, kalsinasyon ve diğer işlemler fırında gerçekleştirildiğinden üretim sürecinde uzun fırınlar kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan fırınların uzunluğu 230 metreye, çapı da 6 metreye kadar olabilmektedir. Üretim yönteminde yaklaşık %40 oranında su içeren pülp, öğütme sonrası doğrudan ya da pülp tanklarından fırına pompalanmaktadır [18].

Yaş üretim sürecinde fırın beslemesindeki yaklaşık %36-38 oranındaki suyu buharlaştırmak için yüksek ısı enerjisine ihtiyaç duyulması, hammaddenin kuru ortamda daha homojen karıştırılabilmesi ve taşınabilmesi gibi nedenlerden dolayı 1950'lerden itibaren yaş sistemden kuru sisteme geçilmeye başlanmıştır [24].

2.4. Çimento Fabrikalarında Üretim Süreci

2.4.1. Hammaddenin Hazırlanması

2.4.1.1. Çimento Hammaddeleri

Kalker: En az %90 CaCO_3 içeren kayalar “kalker” ya da “kireçtaşı” olarak isimlendirilmektedir. Ayrıca kalker ifadesi yerbilimciler tarafından, kimyasal bileşiminde %90’a kadar CaCO_3 , mineralojik bileşiminde ise %90’a kadar kalsit içeren kayalar için de kullanılmaktadır. Dünyada değişik formasyon ve şekillerde oluşmuş kalker yatakları bulunmaktadır. Bu yataklar, kökeni, jeolojik ve mineralojik yapısı, kristal şekli, kimyasal içeriği, renk ve sertliğine göre “tebeşir”, “marn”, “traverten” gibi değişik gruplar altında sınıflandırılmaktadırlar.

Marn: %50-70 oranında kalker ve %30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayalara marn denilmekte, kayaçtaki ağırlıklı olan minerale göre “killi marn” ya da “kalkerli marn” olarak isimlendirilmektedir. Çimento klinkeri ortalama %70 kalker ve %30 kil içeren hammadde karışımının öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile elde edilmektedir. Marn doğal olarak bu bileşimi içerdiğinden veya bu bileşime çok yakın özellik taşıdığından en uygun klinker hammaddesidir.

Kil: Kil, kayaç olarak doğal, topraklı, ince taneli ve su ile karışıklarında plastik özellik taşıyan minerallerin genel tanımıdır. Mineralojik yapısında %90’a kadar kil minerali

bulunduran kayalara kil denilmektedir. Kil, silisyum, alüminyum ve sudan oluşmuş, demir, alkaliler ve alkali mineralleri değişik oranlarda içermektedir. Kayalar sıcak-soğuk, rüzgâr, yağmur gibi doğal etkenlerle parçalanarak ufalanmışlardır. Bu süreçte bazı kimyasal ayrışmalar da söz konusu olmuş sonuçta kil mineralleri oluşmuştur.

Tebeşir: Tebeşir, yumuşak oluşu ile diğer minerallerden ayrılmaktadır. Tebeşir, ince taneli, fosilli CaCO_3 çözeltisidir. Yumuşak olduklarından genellikle yaş yöntemle çimento üretim hammaddesi olarak kullanılmaktadır.

Demir Cevheri: Doğada demir cevheri en çok hematit olarak bulunmaktadır. Hematit saf haldeyken %69,94 Fe ve % 30,06 O_2 içermektedir. Hidrotermal damarlarda ve manyetik kayalarda ikincil mineral, volkanik ve birçok metamorfik kayalarda birincil veya ikincil çökelti kayalar içinde oluşmuşlardır.

Boksit: Boksit, değişik alüminyum-demir oksit ve hidroksitlerden oluşan bir karışımdır. Alüminyum silikat içeren kayaların, tropikal koşullar altında yağmur suyunun süzülmesi ve yıkanmasıyla ikincil olarak oluşmuşlardır. Boksit, klinkerin demir oksit ile birlikte sinterlenmesini ve klinkerin sıvı faza geçişini kolaylaştıran Al_2O_3 'ün kaynağıdır.

Kum: Klinker hammadde harmanının hazırlanmasında SiO_2 içeriğini ayarlamak için kum da kullanılmaktadır. Kullanılan kumun yüksek oranda SiO_2 içermesi istenmektedir. Bir çimento fabrikasının var olmasının ve varlığı sürdürmesinin en önemli ögesi ham maddelerini sağlayan ocaklarıdır. Fabrikanın ekonomik ömrü süresince yeterli hammadde sağlanabilirliği hakkında yeterli bilgi sahibi olmadan böylesi büyük bir yatırım yapılamaz. Hammadde taşıma maliyeti çok önemli olduğu için hammaddenin çıkarıldığı ocağa yakın olması gerekir [18]. Ayrıca fabrikanın kurulduğu yerdeki hammadde kaynağı da önemlidir.

Ülkemizde bazı fabrikalara ait ocaklardan marn çıkarken, bazılarında kalkar ve kil farklı ocaklardan çıkmakta, bu durum fabrikalara ek maliyetler yüklemektedir. Fabrika içinde kullanılacak tüm proseslerin hammaddelere göre ayarlanması gerekmektedir. Diğer hammaddeler genellikle kullanım açısından benzerlik göstermektedir.

Alternatif Hammaddeler: Tehlikesiz atıklar, doğal kaynak kullanımını azaltmak için çimento fabrikalarında hammadde olarak kullanılabilir. Hammadde ile aynı

kimyasal ve fiziksel özellikleri taşıyan bir takım tehlikesiz atıkların çimento fabrikalarında kullanımı doğal kaynak kullanımını da azaltmaktadır.

Çimentonun yapısında demir (Fe), alüminyum (Al), silis (Si), kalsiyum (Ca) gibi çeşitli mineraller yer almaktadır. Tehlikesiz arıtma çamurları, fosfojips, pirit külü, uçucu kül, grit gibi malzemeler de yapılarında bu mineralleri içerdikleri için çimento üretimi için alternatif hammadde niteliği taşımaktadır. Türkiye’deki entegre çimento fabrikalarının birçoğunda yukarıda ifade edilen alternatif hammaddeler kullanılmaktadır [25].

Çimento üretiminde en çok kullanılan hammaddeler kalker, alçı taşı ve kil olmakla birlikte sayıları 30’un üstünde hammadde de çimento birleşiminde yer alabilir. Çimento üretiminde kullanılan hammadde oranlarının doğruluğu ve bu oranların tüm üretim boyunca sabit kalması üretilen çimentonun kalitesi için önem arz etmektedir. Bu aşamada toplanan hammadde seçilir, parçalanıp öğütülür ve bir sonraki aşama olan klinker üretimi için istenen incelik ve kimyasal bileşime sahip olacak şekilde hazırlanır. Çimento üretiminde kullanılan kalker, marn, demir cevheri ve uygun diğer hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılıp öğütülmesinden elde edilen klinkerin hammaddesine farin denir. Öğütülen malzeme içindeki taşlar ayıklanır. Böylece farin, döner fırına verilmeye hazır hale getirilmiş olur [2].

2.4.1.2. Hammaddenin Kırılması

Her fabrikanın hammaddelerini çıkardığı bir veya daha fazla ocağı vardır. Hammaddeler ocaklardan delme/patlatma veya ripperleme gibi metotlar vasıtasıyla çıkarılır. Delme/patlatma işleri, maden veya inşaat çalışmalarındakilere benzer biçimde uzman kişiler tarafından yürütülür. İş güvenliğine çok dikkat edilir.

Boyut küçültme işlemleri çimento sanayinin temel işlemlerindendir. Bu işlemler ocakta patlatma ile başlar, kırıcılarda sürer, değirmende bitirilerek hammaddeler bir sonraki aşamaya, kimyasal tepkimeye hazırlanır. Bu işlemler sırasında malzemeler iyice karıştırılır ve tepkimeye girecek özgül yüzey alanlarının büyütülmesi gerçekleşmesi sağlanır.

Kırma işlemi, ocakta yapılabileceği gibi fabrikada da yapılabilir. Kireçtaşı, kil, tras gibi malzemeler ayrı ayrı, bir/iki aşamada kırılarak boyutları cm düzeyine indirilir.

Tane boyu dağılımı daha dar bir alana çekilerek malzemenin homojenliği sağlanır. Malzemenin sertliği ve nemi, kırıcı seçimini belirler. Kırma işlemi, kırılacak malzemenin yapısına göre vurma ya da çarpma, sürtme, kesme ve basma kuvvetlerinin biri ya da birkaçının uygulandığı kırıcılarla gerçekleştirilmektedir. Çimento hammaddelerinin kırılmasında kullanılan kırıcılar aşağıda belirtilmiştir:

- Döner (Gyratory) Kırıcılar
- Çeneli Kırıcılar
- Darbeli Kırıcılar
- Çekiçli Kırıcılar
- Otojen Kırıcılar
- Konik Kırıcılar

2.4.1.3. Hammaddenin Stoklaması ve Harmanlaması

Stok ve harmanlama sahaları genellikle son kırıcı ile tesis arasında yer almaktadır. Harmanlama sahası tesislere, istenilen kimyasal içerikli ve fiziksel boyutta tesis kapasitesine uygun miktarda homojen malzeme besleyebilmeye olanak sağlamaktadır. Harmanlama sahasının diğer bir gerekliliği de acil durumlarda malzeme stok sahası olarak kullanılmasıdır.

Çimento üretim tesislerinde kullanılan kalker, kil, demir cevheri, alçı taşı, kül gibi hammaddeler, kömür, petrokok, fuel oil gibi yakıt, klinker gibi yarı ürün veya çimento gibi ürünün stoklanması gerekmektedir. Çimento tesislerinde bu malzemelerden belirli miktarlarda stoklanması için uygun genişlikte stok alanlarına gereksinim duyulmaktadır [18].

Çimento fabrikalarında yaygın olarak kullanılan açıkta stoklama en az yatırım gerektirdiği için hala kullanılmaktadır. Ancak malzemeyi yukarıdan dökme, vinç, kepçe, dozer gibi makinelerle alma/yükleme gibi elleçleme işlemlerinde çıkan tozlarla baş etmek son derece zordur. Bunun yanında her türlü iklim etkisine açık olan malzemenin (özellikle klinkerin) kalitesinin stoklama süresinde olumsuz etkilenmesi de artık dikkat çekmekte ve istenmemektedir. Artan çevre koruma baskıları yanında kalite bilincinin yükselmesi ve süreci daha iyi denetleyebilme isteği, çimentocuları, tüm malzemeleri yarı-kapalı ya da tam kapalı stok alanlarında stoklamaya

yöneltmektedir. Tam kapalı alanlarda yığınları yukarıdan aşağıya dökme ve yatay serme yolu ile yapmak, daha sonra da eğimli yüzey kazıyıcılarla malzemeyi dikey kesitlerde almak büyük yığınların öğütme öncesinde ön-homojenlendirilmesinde çok yararlı olmaktadır. Şekil 2.9’da bir kapalı hammadde deposu örneği görülmektedir [26].



Şekil 2.9 Kapalı hammadde deposu örneği

2.4.2. Hammaddenin Öğütülmesi

Öğütme, bir sonraki kimyasal tepkimeleri (klinker pişirme) kolaylaştırmak için yapılan bir yüzey artırma işlemidir, özünde boyut küçültme türünden bir fiziksel değişim sürecidir. Çimento üretiminde

- Farin denilen öğütülmüş hammadde karışımının üretiminde (Hammadde hazırlamanın son aşamasıdır),
- Temel ana madde olan klinkerden uygun katkılarla birlikte çimento yapılmasında,
- Kömür, petkok gibi katı yakıtların yakma işlemine hazırlamasında öğütme işlemleri uygulanır.

Çimento sanayinde kullanılan elektriğin 2/3’ si hammadde, klinker ve kömür öğütülmesinde tüketilir [24]. Yaş çimento üretim sürecinde harcanan enerji 1300-1600 kcal/kgklinker arasında değişmektedir. Bu değer, yarı yaş çimento üretiminde 900-1100 kcal/kgklinker arasındadır. Kuru üretim sürecinde 850-900 kcal/kgklinker olan

enerji kullanımı kalsinasyon sistemli üretimde 700-800 kcal/kgklinker'e kadar düşmektedir [18].

Tesislerde hiçbir zaman yedek değirmen kurulması ekonomik değildir. Ancak gerekli kapasite için birden çok öğütme devresi kurulabilmekte, gerektiğinde devrelerden biri durdurularak bakımı yapılabilmektedir. Birinci kademe öğütmede kullanılan değirmenlerin kapasiteleri çok yüksektir. İnce öğütme amacı ile kullanılan değirmenlerin kapasiteleri, istenilen ürün boyutu azaldıkça düşmekte, buna karşın ton başına enerji ve diğer öğütme maliyetleri yükselmektedir [18] .

Çizelge 2.4 Çimento tesislerinde kullanılan enerji

Üretim yöntemi	Özgül enerji tüketimi, kWh/t				Özgül enerji	
	Klinker üretimine kadar		Çimento paketlemesine kadar		Tüketim, kcal/kgklinker	
	Tüketim	Ortalama	Tüketim	Ortalama	Tüketim	Ortalama
Kuru	59-95	80	86-125	110	720-930	805
Yarı yaş	74-102	87	106-143	118	810-990	880
Yaş	60-121	80	99-180	122	1280-1827	1480

Çizelge 2.4 incelendiğinde, kuru proses kullanıldığında klinker başına toplam enerji tüketiminin daha düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle, çimento üretim tesislerinde kuru proses giderek yaygınlaşmaktadır.

Öğütmede kullanılan değirmen türleri aşağıda açıklanmıştır:

Bilyalı Değirmenler: Dönen bir tüp içinde malzeme ve öğütme elemanları birlikte dönerler, malzeme bu sırada sürtünme yolu ile öğütülür. Değirmen mantosunun (tüpün dış yüzeyinin) yükselen tarafında malzeme ve öğütme elemanları birlikte kaldırılır, sonra birlikte aşağı düşerler. Bu yoğun temas malzemeyi ufalar. Çimento sanayinde öğütme elemanı olarak çelik bilyalar, bazen silindir parçaları (silpeps) kullanılır.

Dik Değirmenler: Dik değirmenler aynı kapasitedeki bilyalı değirmene göre daha az yer kaplayan, daha az enerji tüketen değirmen türleridir. Yüksek kapasitelerde üretim yapabildiklerinden röleli dik değirmenlerin bilyalı değirmenlere göre önemli bir maliyet avantajı vardır. Hava süpürmeli olarak çalışırlar, gövdeleri içindeki seperatör ile çalışıp etkin olarak malzeme kurutma işlevi de yaparlar.

Bilyalı değirmenle dik değirmenin toplam güç tüketimi karşılaştırıldığında farin öğüten dik değirmenlerin %10-15 daha az enerji tükettikleri görülmektedir. Bu fark çimento için daha çoktur. Ayrıca bilyalı değirmende malzeme alıkonma süresi 5-10 dk iken dik değirmenlerde bu süre çok daha kısadır. Dünyada çalışan bilyalı değirmen sayısı halen dik değirmen sayısından çoktur. Yeni kurulan farin değirmenlerinin %80'i dik değirmenlerdir. Bilyalı değirmenler daha çok çimento değirmeni olarak kullanılmaktadır [24].

Ülkemizde ise her iki değirmen türü de kullanılmaktadır. Bilyalı değirmenler, çimento öğütmede; dik değirmenler ise hammadde öğütmede daha çok kullanılmaktadır. Fakat tesislerde kapasite artırımı veya tesis yenilemesi olduğunda dik değirmenler daha büyük kapasite ve daha düşük enerji tüketimlerinden dolayı tercih edilmektedirler.

Otojen Değirmenler: Otojen öğütme; kademe boyut küçültme işlemi olup cevherin kendi kendini öğütmesidir. Otojen değirmenlerle öğütme ortamına bir miktar çakıl ilave edilmiş, zamanla ilave edilen çakıl boyutu ve miktarı artırılmıştır. Sonraları öğütücü ortam olarak cevherin kendisi kullanılmaya başlanmıştır.

Roller Pres: Yığın halindeki malzemeyi ezerek ufalama prensibine dayanır. Yüksek basınçlı merdaneli eziciler ters yönde dönen iki merdaneye sahip olup merdanelerden birisi sabit diğeri hidrolik bir sistem aracılığıyla sabit merdaneye doğru itilmektedir. Çimento sanayinde, roller pres bir ön-öğütücü olarak yaygın olarak kullanılmaktadır [24].

Valsli Değirmenler: Valsli değirmenler kömür, fosfat, kalker, bentonit, çimento gibi malzemelerin öğütülmesinde kullanılmaktadır. Bu değirmenlerde öğütücü rulolar sabit ve hareketli bir tabla üzerinde dönmekte, arada kalan malzeme sıkışma ve ezilerek öğütülmektedir. Enerji tüketimi bilyalı değirmenlere göre daha düşüktür. Ürünler arası geçiş esnektir fakat sıkıştırma dinamiklerine bağlı olarak öğütme hızı sınırlıdır [24]. Şekil 2.10'da dik valsli bir farin değirmeni görülmektedir.



Şekil 2.10 Dik valsli farin değirmeni örneği

2.4.3. Yakıtın Hazırlanması

2.4.3.1. Çimento Sektöründe Kullanılan Yakıtlar

Dünyada olduğu gibi ülkemizdeki çimento fabrikalarında da yakıt olarak en çok kömür türleri ve bir petrol türevi olan petrokok (petkok) kullanılır. Doğalgazın bol ve ucuz olduğu kimi ülkelerde doğal gaz kullanılır; akaryakıtlar ana yakıt olarak çok az kullanılır.

Çimento fabrikalarında çeşitli atıklar da, ana yakıtların yanında ikincil (alternatif) yakıt olarak kullanılmaktadır. Başka sanayilerin, konutların atıklarından ısı değeri uygun olanların çimento fabrikalarında yakılarak fosil yakıtlardan tasarruf edilmesi (atmosfere karbondioksit salınımını azaltmakla eşdeğerdir) 1980 sonrası en önemli gelişmelerdendir. İkincil yakıt kullanımı hızla artmaktadır.

Çizelge 2.5 Çimento fabrikaları için uygun olan bazı ikincil yakıtlar

Katı	Sıvı	Gaz
Oto lastikleri Plastik atıklar	Katran	Çöp deposu gazı
Kauçuklu atıklar	Kimyasal atıklar	Piroliz gazı
Kağıt atığı	Atık yağlar	
Odun/kereste atıkları	Petrokimyasal atıklar	
Atıksu arıtma çamurları	Çözücüler	
Evsel atıklar	Boya atıkları	
Kumaş/halı atıkları	Asfalt çamuru	

Çizelge 2.5'te gösterilen atık malzemelerin hepsi günümüzde çimento fabrikalarında ana yakıtla birlikte kullanılmaktadır [24]. Özellikle Avrupa ve Japonya'da atık yakıt kullanımı toplam yakıtın %50-80'ine ulaşmıştır. Atıkların kullanımı, içerdiği maddelere göre özel izinlere bağlıdır. Atıkların külünün de klinker içinde kalması, bazik malzemenin asidik gazları kolayca soğurması ve fırın sıcaklığında organik maddelerin tümünün karbondioksit kadar yanması çimento fırınlarının belediyelerin çöp giderme sorununa çözüm olarak buldukları yakıcılara göre büyük üstünlük sağlamaktadır. Atık kullanımı, olumlu yanlarının yanında işletmeciye sorunlar da getirebilmektedir. Bu nedenle işletmeci sürekli dikkatli olmalıdır [24].

Fabrikaların çoğu yakıt olarak kömür ve karışımlarını kullanır, fırına en az 5500 kcal/kg ısı değeri olan bir yakıt beslerler. Kömürün temizlenmesi ve öğütülüp kullanılabilmesi için değişik kırıcı ve değirmenler kullanılır. Kömürün tam ve hızlı yakılabilmesi için kömür değirmenlerde çok ince öğütülür. Öğütülmüş toz kömür çok tehlikeli bir maddedir, çok hızla tutuşabilir. Bu nedenle, hedef en az öğütülmüş kömür stoku ile çalışmaktır. Bu da kömür değirmenini neredeyse sürekli çalıştırılmasını gerektirir [24]. Ülkemizde, bazı fabrikalar ise, kömürü öğütülmüş şekilde alarak, tesis içinde kömür öğütmek için değirmen kullanmamaktadır.

2.4.4. Klinkerin Pişirilmesi

Klinker, ağırlıklı olarak kalsiyum oksit (CaO), silisyum dioksit (SiO_2) ve az miktarda alüminyum oksit (Al_2O_3) ile demir oksitin (Fe_2O_3) oluşturduğu hammadde karışımının sinterleşme sıcaklığındaki ısı işlemi sonrası soğutulmasıyla elde edilen yarı mamul üründür.

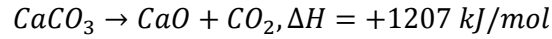
Klinker üretiminde 4 ana ısı işlem bölgesi vardır:

1. Kurutma bölgesi ($\sim 450^\circ\text{C}$)
2. Kalsinasyon bölgesi ($450-900^\circ\text{C}$)
3. Geçiş bölgesi ($900-1300^\circ\text{C}$)
4. Klinkerleşme bölgesi ($1300-1550^\circ\text{C}$)

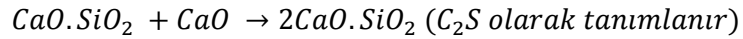
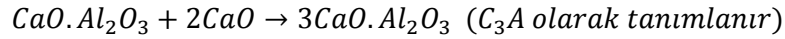
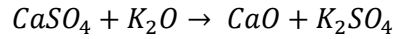
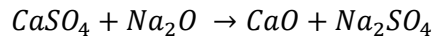
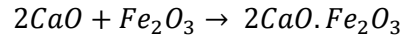
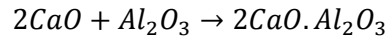
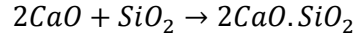
Bu bölgelerden sonra bir de soğutma bölgesi vardır. Dört farklı çimento üretim sürecinde de klinker üretimi esnasında benzer ısı işlem süreçleri uygulanmaktadır.

Farklı olarak yaş üretim sürecinde kurutma, ön ısıtma, kalsinasyon ve sinterleme fırında gerçekleştirilirken, kalsinatörlü tesislerde hammadde %95 oranında kalsine edilerek fırına gönderilmekte, hammadde fırında ağırlıklı olarak sinterlenmektedir.

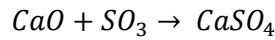
Çimento üretim süreci, kalsiyum karbonatın (CaCO_3) 900 °C civarında ayrışması ile başlar. Kalsinasyon olarak bilinen bu işlem sırasında kalsiyum oksit (CaO) oluşur ve gaz halindeki karbondioksit (CO_2) açığa çıkar. Yaklaşık 850-900 °C’de ayrışma basıncı 1 bardan büyük olduğu için CaCO_3 hızla CaO ve CO_2 ’e ayrışır. Kalsinasyon reaksiyonları aşağıdaki gibidir:



Oluşan kalsiyum oksit, ortamda bulunan diğer oksitlerle tepkimeye girmeye başlar:

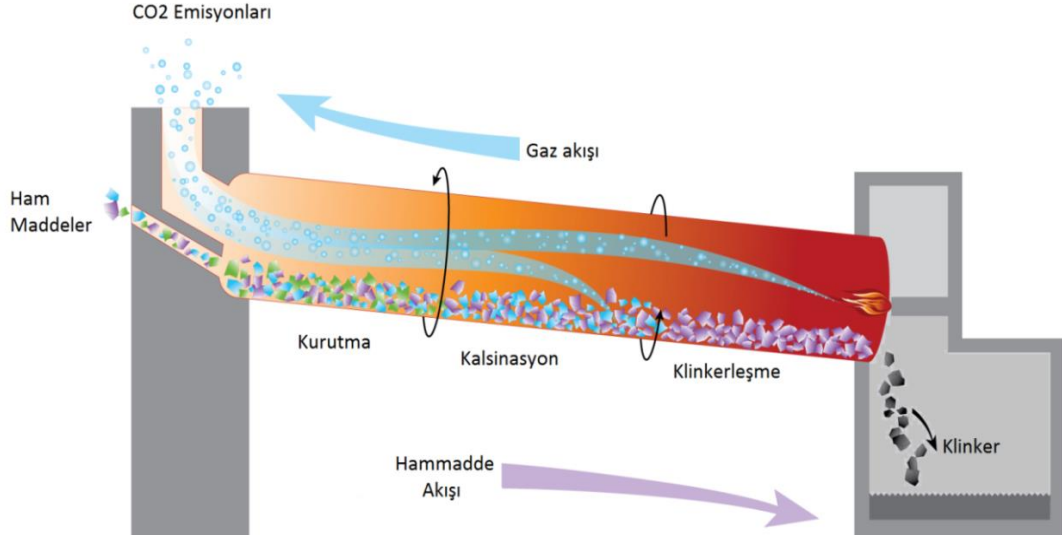


Serbest CaO , anhidrit oluşturmak üzere SO_2 ile tepkimeye girer:



Bu anhidrit, kilden gelen alkalilerle tepkimeye girerek alkali sülfatları oluşturur. Bu reaksiyonları izleyen klinkerleşme süreci esnasında kalsiyum oksit, yüksek sıcaklıkta (genellikle 1400 - 1500 °C) silis, alümin ve demir oksit ile reaksiyona girerek klinkeri oluşturan silikatları, aluminatları ve kalsiyum ferritlerini meydana getirir [27]. Son aşamada klinker, çimentoyu oluşturmak üzere alçı taşı ve diğer katkı maddeleri ile birlikte öğütülür veya değirmenlerden geçirilir. Klinker üretim sürecinde farin olarak da isimlendirilen öğütülmüş hammadde karışımı döner fırına beslenmeden önce ön ısıtma siklonlarından geçirilmektedir. Ön ısıtma siklonlarında sıcak fırın çıkış havası kullanılmaktadır. Ön ısıtıcıda, farin aşağıya doğru

hareket ederken fırın içerisinden gelen sıcak gaz yukarıya doğru hareket eder. Birkaç kademe siklon kombinasyonundan oluşan ön ısıtıcıda, farin ile sıcak gaz temas ederek ön kalsinasyon işlemi gerçekleşir. Şekil 2.11’de klinker pişirme süreci şematik olarak gösterilmektedir [28].



Şekil 2.11 Klinker pişirme süreci

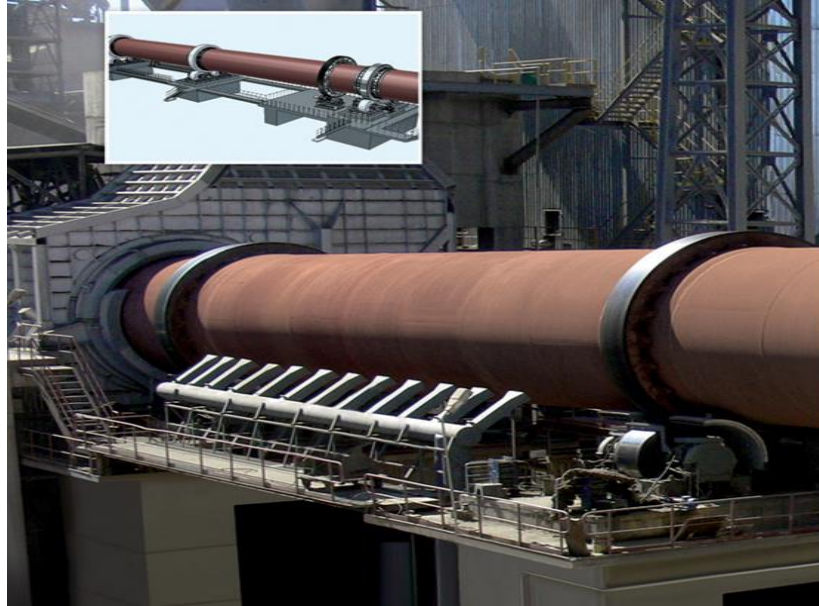
Ön kalsinasyona uğrayan farin döner fırına girer. Toz kömür, doğal gaz, fuel-oil gibi yakıtlar fırın çıkışında bulunan alev borusu vasıtası ile yakılır. Yakılan yakıt ve klinkerleşme reaksiyonları ile birlikte fırın içi sıcaklık 1500-1600 °C’ye çıkar. Fırın içerisinde malzeme çıkışa doğru yaklaştıkça sıvılaşmaya başlar. İnce taneler birleşerek büyük boylu klinker tanelerini oluşturur. Oluşan klinker taneleri fırın çıkışından soğutma ünitesine geçerek ani soğutulur. Ani soğutulan klinker tanelerinin sıcaklığı 100 °C’nin altına düşürülerek klinker stokholünde stoklanır [29]. Çimento tesislerinde üretim maliyetinin düşürülmesi için ısıl işlem sürecinde açığa çıkan enerjinin mümkün olduğunca en az kayıpla sistemde tekrar kullanılması gerekmektedir. Klinker üretiminde ön ısıtma, kalsinasyon ve soğutma süreçleri bu amaca uygun olarak geliştirilmişlerdir.

Döner fırınlar, L/Φ oranı 10-14 arasında, uzunlukları klinker üretim yöntemine bağlı olarak değişen, içi refrakter tuğla ile örülmüş ısıl işlem ekipmanıdır. Yaş klinker üretim yönteminde kullanılan fırınların çapları düşük, uzunlukları 200 metre üzerinde olabilmektedir. Günümüzde yaş yöntemle klinker üretimi yüksek maliyet nedeniyle yerlerini kalsinatörlü üretim süreçlerine bırakmaktadırlar. Döner fırın boyutları $L=40-180$ m, $\Phi=3.25-6.0$ m arasında değişmektedir. Fırın çaplarının mümkün olduğunca 6

metreden daha büyük olması istenmektedir. Çünkü fırın tuğlaları kemer şeklinde örüldüklerinden, örülmeleri zor, üzerindeki olumsuz fiziksel etkiler nedeniyle ömürleri kısadır. Ön ısıtma ve fırın öncesinde kalsinasyon sistemli tesislerde fırın çapı ve uzunluğu aynı üretim kapasitesine sahip klasik sistemlere göre daha küçüktür. Örneğin, klasik bir sistemde günde 4500 ton klinker üretebilmek için gerekli fırın boyutları yaklaşık $L=95$ m, $\Phi=6.0$ m iken, aynı fırın ile ön ısıtma ve fırın öncesi kalsinasyon sistemli tesislerde yaklaşık 2.5 kat daha fazla klinker üretimi yapılabilmektedir [30].

Çimento tesislerinde klinker üretiminde döner fırın;

- Dönme hareketi ile içindeki malzemeyi karıştırmaktadır.
- İçinde ısıtıl işlem gerçekleşmektedir.
- Eğimi ile beslenen malzemeyi giriş bölgesinden çıkış bölgesine doğru taşımaktadır.
- İçinde yakılan yakıt ısı kaynağıdır ve dairesel kesiti ile hava akışı için kanal görevi üstlenmektedir [24]. Şekil 2.12’de bir çimento tesisine ait döner fırın örneği görülmektedir [31].



Şekil 2.12 Döner fırın örneği

Fırında üretilen klinker hemen fırın çıkışında, hava üflenerek hızla soğutulur. Klinkerin dayanıma en büyük katkısı olan C_3S bileşeninin C_2S 'ye dönüşmesini en aza indirmek için klinker sıcaklığının hızla azaltılması gerekir. Klinker fırını yaklaşık

1200-1300 °C’de yüksek miktarda ısı ile terk eder. Bu miktarın yaklaşık 2/3’ni yakma havasını ısıtarak geri kazanarak sürecin özgül ısı tüketimini azaltıp fabrikanın üretim maliyetine olumlu katkıda bulunur. Ürünün soğutulması için dışarıdan verilen hava soğutucu çıkışında 850-900 °C’lere kadar ısındığından, ısıtılan hava proseste gerekli görülen bölgelerde ikincil hava olarak kullanılmaktadır [29].

2.4.5. Çimentoğunun Öğütölmesi

Çimento üretmek için klinkerin içine, öğütölme öncesi ya da sonrası bazı katkı maddeleri eklenmektedir. Katkı maddeleri, çimentoya olumlu özellikler kazandırmalarının yanı sıra üretim maliyetlerini de düşürerek ekonomik çimento üretimini sağlamaktadır. Çimento üretiminde kullanılan katkı maddeleri Çizelge 2.6’da gösterilmektedir [29].

Çizelge 2.6 Çimento üretiminde klinkere ilave edilebilen katkı maddeleri

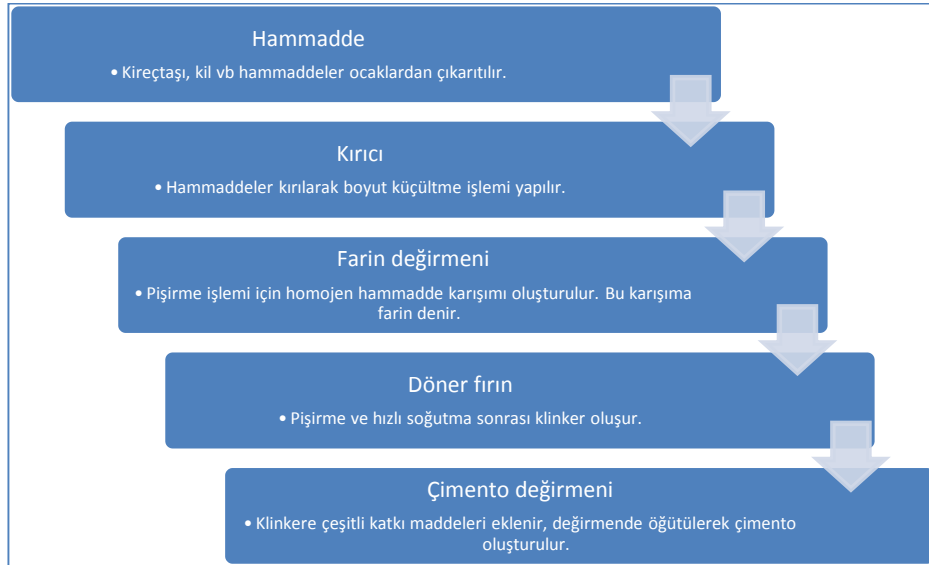
Doğal puzolan (Tras)	Yanmış petrol kumu
Pomza ve perlit	Alçı taşı
Granüle yüksek fırın cürufu	Silis dumanı
Pülverize kül	Pişmiş şisttir.

Cement and Concrete Research Laboratuvarı tarafından yapılmış bir çalışmaya göre, çimento üretiminde klinkere ilave edilebilen katkı maddeleri ve katkı maddelerinin % olarak kullanım aralığı Çizelge 2.7’de gösterilmiştir [18].

Çizelge 2.7 Klinker katkı maddeleri

Kimyasal yapısı	Granüle yüksek fırın cürufu (%)	Yanmış petrol kumu (%)	Doğal puzolan (%)	Pülvarize kül (%)
SiO_2	32,3-40,5	34,3-36,7	53,9-63,2	40,0-
Al_2O_3	7,1-14,0	11,3-11,4	15,2-20,4	24,0-
TiO_2	0,3-1,9	0,6-0,8	0,6-1,2	0,7-1,3
P_2O_5	0,0-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-1,5
Fe_2O_3	0,2-2,4	7,3-10,4	5,2-7,9	5,0-15,0
Mn_2O_3	0,2-1,7	0,1-0,2	0,1-0,3	0,1-0,4
CaO	35,3-45,9	27,3-31,6	2,7-8,5	1,5-8,0
MgO	0,0-11,7	1,8-2,0	1,1-2,7	1,5-3,5
SO_3	0,1-0,3	10,1-11,2	0,0-0,3	0,4-2,5
K_2O	0,2-1,1	2,0-2,1	1,5-6,0	1,0-4,5
Na_2O	0,2-0,6	0,2-0,3	1,5-4,3	0,4-1,5
LOI	0,1-1,9	4,2-8,0	7,1-11,6	0,8-5,0
CO_2	0,1-1,3	2,6-7,0	0,6-4,8	-
H_2O	0,1-1,1	1,0-1,7	-	-
S^{2-}	0,9-2,1	0,1-0,2	-	-
CaO serbest	-	-	-	0,1-1,5

Şekil 2.13'te basitleştirilmiş çimento üretimi akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.13 Basitleştirilmiş çimento üretimi akış şeması

Çimentoyu oluşturan klinker, alçı taşı, tras ve diğer katkı maddeleri, diğer mineraller gibi öğütülmekte, öğütme amacı ile çeşitli değirmenler kullanılarak öğütme

kuru olarak yapılmaktadır. Değirmenler öğütme devrelerine ya da çıkışlarına yerleştirilmiş dinamik ya da statik sınıflandırıcılarla çalıştırılmaktadır. Klinker üretiminde kullanılan değirmenlerin hemen hemen hepsi hammadde öğütmede de kullanılmaktadır. Bilyalı değirmenlerde öğütme, kuru ya da yaş olarak yapılabilir. Çimento üretiminde kullanılan değirmenler;

- Bilyalı değirmenler
- Valsli dik değirmenler
- Dikey rulolu değirmenler
- Yatay valsli değirmenler
- Sarkaç rulolu değirmenler
- Loesche değirmenler
- Atox değirmenler
- Konik yataklı rulolu değirmenler [18].

Şekil 2.14’te bir bilyalı değirmen örneği görülmektedir.



Şekil 2.14 Bilyalı değirmen örneği

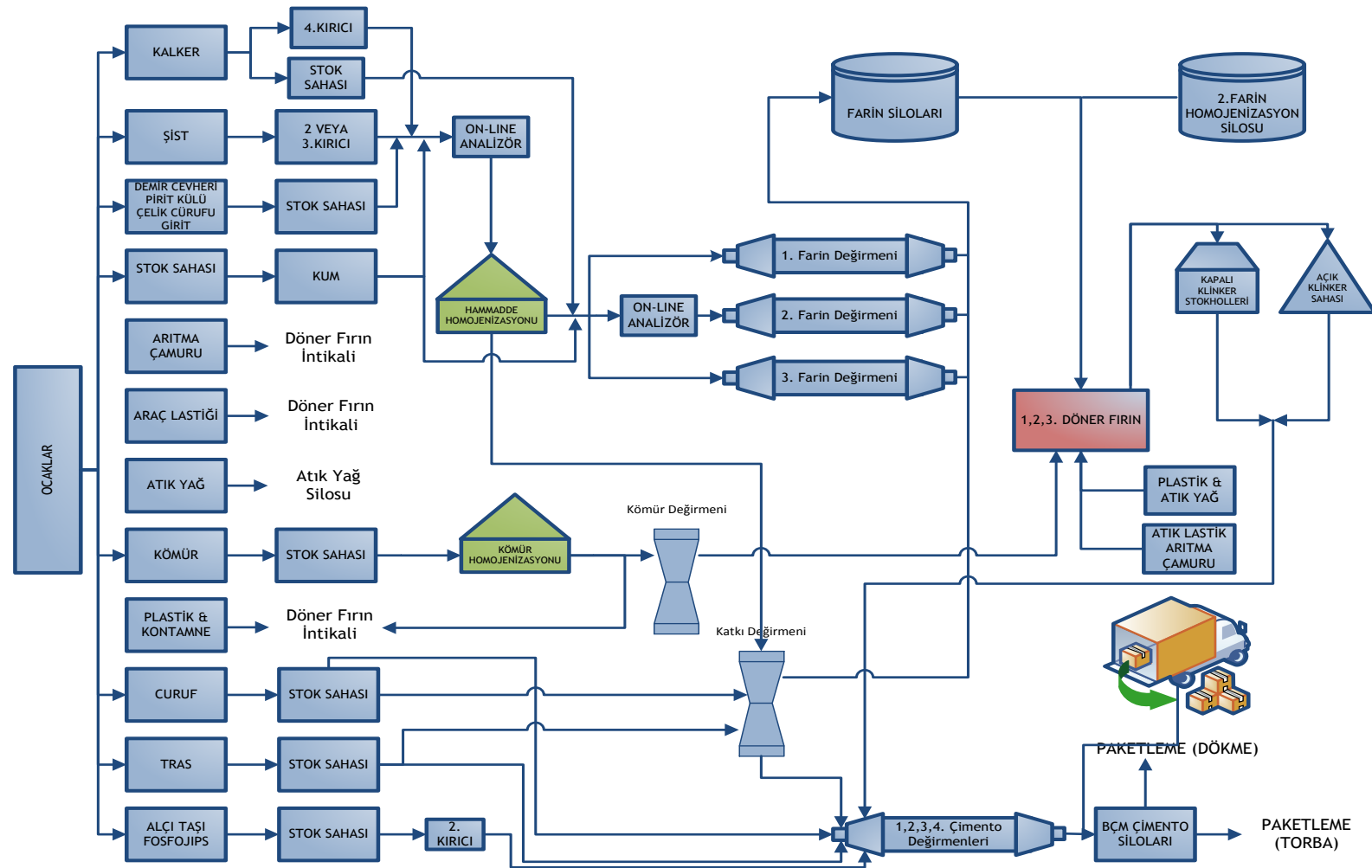
2.4.6. Çimentonun Stoklanması ve Paketlenmesi

Çimento fabrikalarında üretilen klinker doğrudan satışa sunulabilmektedir. Satılan klinker, tüketim yerlerine yakın bölgelerde, kurulu tesislerinde diğer katkı maddeleri eklenerek öğütülüp çimento halinde de satılabilmektedir. Birçok klinker üretim tesisinde çimento hazırlama ve paketleme üniteleri kurulmuştur.

Stoklama: Çimento tesislerinde hammaddenin stoklanması yanı sıra klinker ve mamul hale getirilmiş çimentonun da stoklanabileceği belli alanlara gereksinim vardır. Ancak klinker, alçı taşı ve diğer katkı maddeleri ile çimentonun uygun kapalı alanlarda veya tanklarda stoklanması, stok alanlarının paketleme ve yükleme için gerekli ekipmanla donatılmış olması gerekmektedir. Ayrıca, malzeme stoklanacak kapalı alanların kullanılabilecek faydalı hacmi mümkün olduğunca yüksek olacak şekilde tasarlanmalıdır. Öğütülmüş ya da çok ince boyuttaki malzemenin toz oluşturmalarının engellenmesi ve malzeme kayıplarının önlenmesi için mutlaka kapalı alanlarda stoklanması gerekmektedir.

Paketleme: Çimento, havanın nemini alarak kendi içinde tepkimeye girme özelliği taşımaktadır. Uzun süre bekletildiğinde çimento bu tepkime sonucu katılaşarak kullanılabilmeye özelliğini yitirmektedir. Bunun için çimento, uzun süre stokta bekletilmemelidir.

Çimento genellikle üretilerek uzun mesafelere taşınması ya da ihraç edilmesi yerine klinker olarak taşınmakta ve kullanılacağı ülke ya da bölgede çimento haline getirilmektedir. Bu durumda katkı maddelerinin taşınması gerekmediğinden çimento maliyetleri de düşük olmaktadır [32]. Üretilen çimentolar, dökme yoluyla, paketlenerek, sling-bag veya big-bag şeklinde piyasada satışa sunulabilmektedir. Çimento tesislerinin çoğunda kağıt torbalama üniteleri kurulmuştur. Bu ünitelerin sayısı tesislerin ve torbalama ünitesinin kapasitesi ile ilgili olmaktadır. Şekil 2.15'te bir çimento fabrikasına ait çimento üretimi akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.15 Bir çimento fabrikasına ait çimento üretimi akış şeması

3. SERA GAZLARI ve KÜRESEL ISINMA

Küresel ısınma, sera gazı emisyonlarındaki artışlara bağlı olarak küresel ortalama yüzey sıcaklıklarındaki artışları ifade etmektedir. Küresel ısınmanın en önemli sebebi atmosferde sera etkisi yapan CO₂, CH₄, N₂O gibi sera gazı emisyonlarındaki hızlı artıştır.

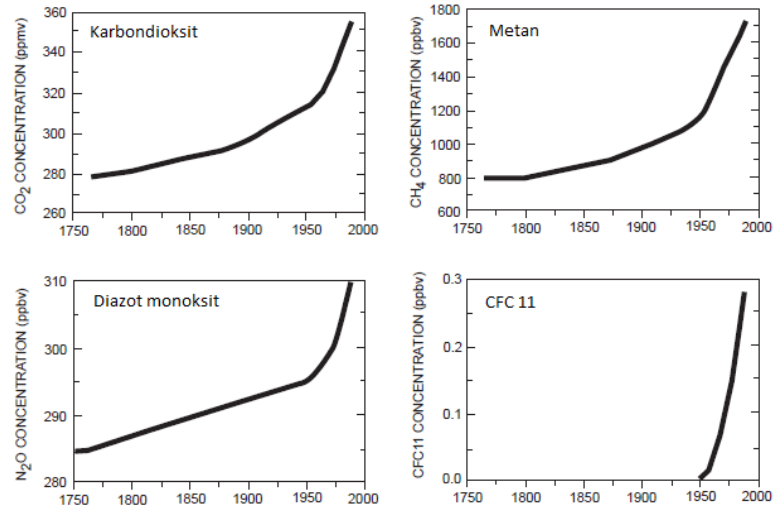
1850’li yıllarda başlayan sanayileşme ile fosil yakıtların yakılması, arazi kullanımı değişiklikleri, ormanların tahribi ve çarpık sanayileşme gibi insan faaliyetleri neticesinde, sera gazları atmosferde birikerek atmosferin kimyasal ve optiksel özelliklerini etkilemekte, uzun vadede ise sera etkisi yüzünden küresel ölçekte iklim değişikliğine sebep olmaktadır. Karşılaştırılabilir bir zaman periyodunda gözlenen tabii iklim değişikliğine ilave olarak doğrudan veya dolaylı olarak küresel atmosferin bileşimini bozan insan etkileri neticesinde iklimde oluşan bu değişiklik de iklim değişikliği olarak tanımlanmaktadır. Küresel iklim değişimi, kuraklık, çölleşme, kara ve deniz buzullarının erimesi, deniz seviyesinin yükselmesi, iklim kuşaklarının yer değiştirmesi ve salgın hastalıkların ve zararlıların artması gibi, dünya ölçeğinde sosyo-ekonomik sektörleri, ekolojik sistemleri ve insan hayatını doğrudan etkileyecek önemli sonuçlara yol açabilecektir.

Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)'nin 2007 yılında yayımlanan dördüncü Değerlendirme Raporu'na göre, küresel ısınma artık tartışmasız bir gerçektir ve bunun önemli bir bölümünden insanoğlu sorumludur. Küresel ortalama yüzey sıcaklığı son yüzyılda 0,74 °C artmıştır. IPCC’nin raporuna göre Akdeniz, iklim değişikliğinden en çok etkilenecek bölgeler arasında gösterilmektedir. Bir Akdeniz ülkesi olan Türkiye'nin, ikliminde gözlenen ve öngörülen değişiklikler dikkate alınarak, küresel ısınmanın özellikle su kaynaklarının zayıflaması, orman yangınları, erozyon, tarımsal üretkenlikte değişiklikler, kuraklık ve bunlara bağlı ekolojik bozulmalar, sıcak dalgalarına bağlı ölümler ve vektör kaynaklı hastalıklarda artışlar gibi öngörülen olumsuz yönlerinden etkilenecektir [33].

Yerkürenin ana ısınma kaynağı güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, güneşten yerküreye radyasyonla transfer olmaktadır ve yerkürenin yüzeyinde ısıya dönüştürülmektedir. Bu güneş radyasyonunu dengeleyebilmek amacıyla, yerküre bu radyasyonu uzaya geri göndermektedir. Yerküre tarafından yansıtılan radyasyona sera

gazları karşı koyar ve yerküreye bu radyasyonu tekrar geri gönderirler. Bu durum, yer yüzeyinin ısınmasına sebep olur ve küresel ısınma denilen durum gerçekleşmiş olur. Aslında, sera gazları tarafından doğal olarak gerçekleştirilen bu durum yer kürenin yüzey sıcaklığını donma noktasının üzerinde tutabilmek açısından önemlidir.

Antropojenik sera gazı emisyonlarındaki artış yerkürenin yüzeyinin ısınmasını hızlandırmaktadır. Doğal olarak oluşan sera gazları; CO_2 , CH_4 ve N_2O dur ve bu gazlar geçtiğimiz yüzyıl içinde, insan faaliyetlerinden kaynaklı olarak oldukça artış göstermiştir (Şekil 3.1). Buna ek olarak CFC-11 gibi kimya endüstrisinden kaynaklanan çeşitli gazlar, son yüzyılda atmosferde çoğalmakta ve küresel ısınmayı arttırmaktadır [41].



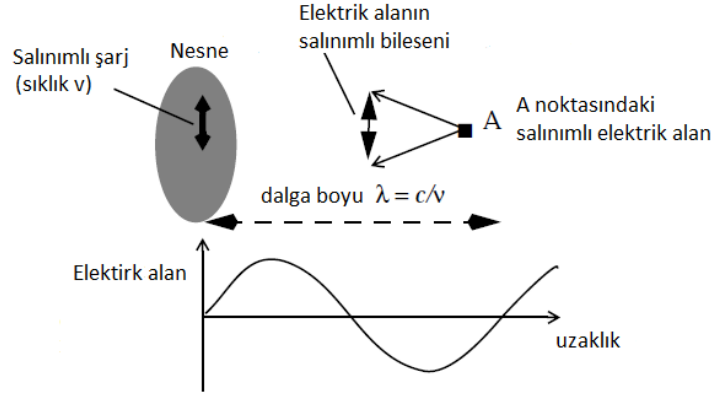
Şekil 3.1 Sera gazı konsantrasyonlarındaki artış, 18.yy.dan itibaren

Bilindiği gibi, sera gazlarındaki artış, küresel ısınmayı arttırmaktadır. Yerkürenin yüzey sıcaklığının geçtiğimiz yüzyıl boyunca yaklaşık 0.6 K arttığı bilinmektedir. Direkt sıcaklık gözlemleri, deniz suyu seviyeleri ve buzulların geri çekilmelerinin uzun süre izlenmesi sonucu bu kanıya varılmıştır. Aynı modeller, önümüzdeki yüzyılda sera gazlarının aynı oranda artması sonucu, 1-5 K arasında sıcaklık artışlarının olacağını öngörmektedir.

Işıma

Işıma, elektromanyetik dalgalarla transfer edilen bir enerjidir. Işıma, bütün nesneler vasıtasıyla olabilir. Bu durumu açıklamak için basit bir model şöyle açıklanabilir: Herhangi bir nesne düşünelim. Bu nesne içindeki şarj edilmiş partiküller, salınımlı bir

elektrik alan oluşturur. Bu salınımlı elektrik alan, salınımlı bir manyetik alanla birlikte dalga boyu $\lambda = c/v$ olan bir elektromanyetik dalga olarak tanımlanmaktadır. Bu elektromanyetik dalga, enerjiyi taşır; şarj edilmiş partikülle birlikte salınımları tetikler. Şekil 3.2’de bir nesnedeki salınımlı elektrik alan tarafından tetiklenen elektromanyetik dalga gösterilmektedir [41].



Şekil 3.2 Bir nesnedeki salınımlı elektrik alanının tetiklediği elektromanyetik dalga

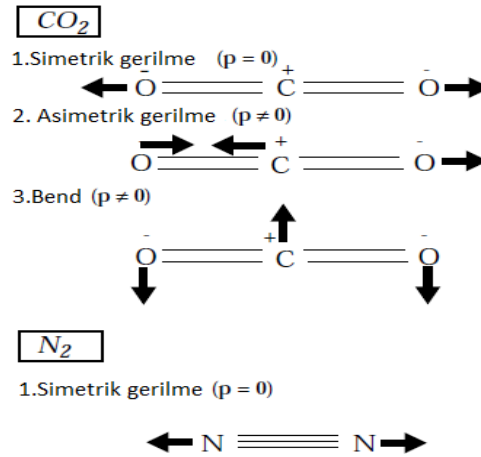
Tipik bir nesne radyasyonu sürekli bir frekans spektrumu boyunca yayar. Bir spektrometre yardımıyla ışıma akısını belli dalga boylarında (λ , $\lambda + \Delta\lambda$) ölçmek mümkündür.

Işımanın Atmosfer Tarafından Absorbe Edilmesi

Bir gaz molekülü, belirli bir dalga boyunda, yalnızca molekül iç enerji seviyesini arttırmak için ışımayı absorbe eder. Bu iç enerji seviyesi elektronik, titreşim ve dönme hali olarak sınıflandırılabilir. İç enerjideki artış, daha yüksek bir hale geçiş esnasında sağlanır. Daha yüksek bir elektronik hale geçiş olarak da tanımlanan elektronik geçişler genellikle UV radyasyonunu içerir ($<0.4 \mu\text{m}$). Titreşimsel geçişler yakın-IR radyasyonunu içerirken ($0.7\text{-}20 \mu\text{m}$) dönel geçişler uzak-IR radyasyonunu ($>20 \mu\text{m}$) içermektedir. Dünyaya ait ışmanın en fazla yayıldığı $5\text{-}50 \mu\text{m}$ aralığındaki dalga boylarını absorbe eden gazlar, sera gazları olarak adlandırılırlar. Bu absorpsiyon, titreşimsel ve titreşimsel-dönel geçişlere tekabül eder. Kuantum mekaniğine göre, molekülün dipol momentindeki (p) titreşimsel hal değişiklikleri sırasında titreşimsel geçişlere izin verilir. Titreşimsel haller, molekülün farklı bükülme ve gerilme derecelerini ifade eder. Bir molekül üzerine yüklenmiş olan bir elektromanyetik dalga, bir molekülü, yalnızca, elektrik alan molekülün farklı noktalarında ($p=0$ olduğunda)

etkileyebilir. Molekölün geometrisi incelenerek, iki hal arasındaki bir geçişin p'yi değiştirip değiştirmediği ispatlanabilir.

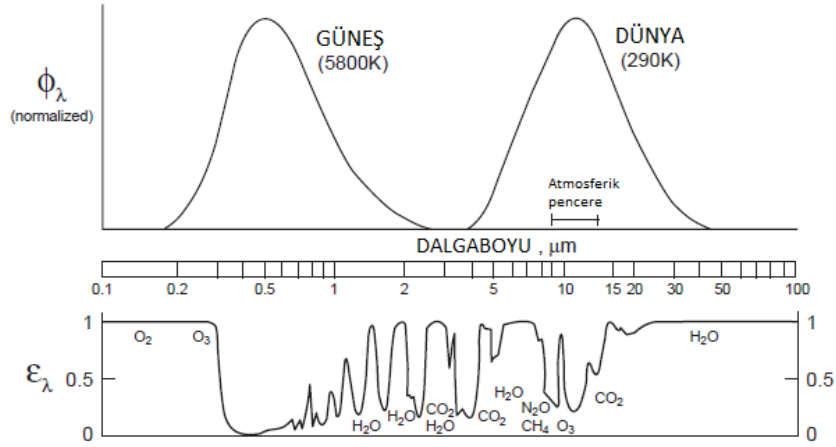
Örneğin, CO_2 molekülünü düşünelim. CO_2 'in titreşimsel hali, 3 normal titreşimsel mod ve her bir mod için belirlenmiş enerji seviyelerinin birleşimi olarak tanımlanır. Titreşimsel geçişler, normal modlardan birinin (nadiren modların birleşiminin) enerji seviyelerindeki değişiklikleri ihtiva eder. "Simetrik gerilme" modunda, CO_2 molekülünün dipol momentı yoktur. Çünkü şarj dağılımları mükemmel derecede simetriktir ve o modda, daha yüksek bir enerji seviyesine geçiş molekülün dipol momentini değiştirmemektedir. Diğer iki asimetrik modda ise, molekülün dipol momentı değişmektedir. Bu durumlarda, CO_2 'in absorplama alanları yakın-IR bölgesinde olmaktadır. Bunun tersine olarak, N_2 molekülünün uniform bir şarj dağılımı vardır ve bu molekülün titreşimsel hali sadece " Simetrik gerilme" modunda olmaktadır. Bu modda, geçişler engellenmiştir ve bunun sonucunda N_2 molekülü yakın-IR bölgesinde radyasyonu absorplayamamaktadır. Şekil 3.3'te CO_2 ve N_2 'nin normal titreşimsel modları gösterilmektedir [41].



Şekil 3.3 CO_2 ve N_2 'nin normal titreşimsel modları

Genellikle, bükülme ve gerilme ile şarj asimetrisi kazanan moleküller sera gazlarıdır. En önemli sera gazları yerkürenin yansıttığı radyasyonu önemli oranda absorbe eden H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3 ve kloroflorokarbonlardır (CFC). Su buharı, sera gazları içerisinde atmosferde miktarının çokluğundan ve yoğun IR absorpsiyon özelliğinden dolayı açık ara öndedir. Radyasyonun atmosfer tarafından absorpsiyonu dalga boyunun fonksiyonu olarak Şekil 3.4'te gösterilmektedir (ϕ_λ =Radyasyon akısı, ϵ_λ =Radyasyon verimi) [41]. Foton enerjilerinin elektron geçişleri için çok düşük

olmasından ve titreşimsel geçişler için çok yüksek olmasından dolayı atmosfer, görülebilir dalga boylarında genellikle transparandır. IR dalga boylarında, sera gazlarından dolayı absorpsiyon yaklaşık %100 olmaktadır.



Şekil 3.4 Atmosfer tarafından absorbe edilen radyasyonun verimi

Sera gazı yoğunluğundaki artışın nedeni bilim adamları tarafından havadaki CO₂ oranının artmasına bağlanmaktadır. CO₂ oranının artışındaki temel faktör, fosil yakıtların yakılması ve diğer insan faaliyetleridir. Sanayi devriminden önce bitkilerin solunumu ve organik maddelerin yapısal değişiklikleri sonucu oluşan CO₂ miktarı, insan faaliyetleri sonucunda üretilen CO₂ miktarından 10 kat daha fazladır. Ama bu CO₂ üretimi, bitkilerin fotosentezi ve okyanusların CO₂ depolama yetenekleri sayesinde yüzyıllardır dengede kalmayı başarmıştır; fakat sanayi devriminden itibaren bu denge değişmektedir. Son birkaç yüzyılda değişen ise insan faaliyetleri sonucunda oluşan CO₂ miktarının ciddi derecede artmasıdır. Örneğin ABD’de fosil yakıtların yakılması sonucu oluşan gazlar, toplam ABD CO₂ emisyonunun %98’ini, metan emisyonunun %24’ünü, NO_x emisyonunun ise %18’ini oluşturmaktadır.

Sera gazı yoğunluğundaki artış, iklim değişimini de hızlandırmış gibi görünmektedir. Yerkürenin ısınması sonucunda buharlaşma artacaktır, bunun sonucunda da ortalama küresel yağış miktarı artacaktır. Toprak nemi çoğu bölgede azalma eğilimi gösterirken, güçlü sağanak yağışlar da daha sık yaşanacaktır, deniz seviyesinde de yükselme meydana gelecektir [35]. İnsan faaliyetleri;

- Fosil yakıtlar ve nükleer enerji kullanmak suretiyle karbondioksit konsantrasyonunu artırmak suretiyle atmosferi doğrudan ısıtarak,

- Fabrikalardan, otomobillerden, soba ve ocaklardan toz, sülfat ve sıvı parçacıkları halinde taneli maddeleri enjekte etmek suretiyle atmosferin ışık geçirgenliğini, yani şeffaflığını azaltarak,
- Çarptığı yüzeylerden dışarıya yansıyan ışımanın gelen güneş ışımaya oranı olan aklık derecesi değerini, sulama, şehirleşme, orman tahribi ve zirai faaliyet yoluyla bütün yeryüzünde değiştirerek,
- Tankerlerden ve denizaltı petrol kıyılarından sızan petrolün deniz üstünde bir tabaka teşkil etmesi dolayısıyla denizler ile atmosfer arasında ısı alış veriş hızını değiştirerek iklimi değiştirebilmektedir [36].

Bazı sera gazları doğal olarak oluşurlar fakat insan faaliyetlerinden doğrudan veya dolaylı olarak etkilendirler. Diğer bazı sera gazları ise tamamen insan faaliyetleri sonucu (antropojenik) meydana gelir. Doğal olarak oluşan sera gazlarından bazıları şunlardır; CO₂, CH₄, N₂O, H₂O ve ozon (O₃). Tamamen insan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazları ise, kloroflorokarbon (CFC), hidrokloroflorokarbon (HCFC), hidroflorokarbon (HFC) (hepsine genel olarak halokarbonlar denir) ve tamamen florid bileşiği olan kükürt hekzaflorid (SF₆) gibi gazlardır [38][39]. Montreal Protokolü'ne göre CFC, HCFC ve halokarbonlar ozon tabakasını tüketen bileşikler listesindedirler. UNFCCC tarafları ise ulusal emisyon envanterlerinde CFC, HCFC ve halokarbonları belirtmek zorunda değildiler. Diğer flor içeren halojenli bileşikler hidroflorokarbonlar, perflorokarbonlar (PFC) ve kükürt heksaflorür gazları her ne kadar stratosferik ozon tabakasını tüketmese de potansiyel sera gazlarıdır. UNFCCC'ye taraf olanlar bu gazları ulusal emisyon envanterlerinde göstermek zorundadırlar.

Bunların dışında doğrudan küresel ısınmaya sebep olmayan ancak troposferik ve stratosferik ozon tabakasına dolaylı olarak etki eden gazlarda sera gazları olarak bilinmektedir. Bu gazlar karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x), ve metan olmayan uçucu organik bileşiklerdir (NMVOC). Aerosoller veya elementel karbon emisyonları da atmosferin absorpsiyon karakteristiğini değiştirmektedir [40].

Karbondioksit (CO₂)

Sera etkisine en fazla sebep olan gaz CO₂'tir. Sera gazları içinde CO₂ gazının küresel ısınmadaki payı yaklaşık %50'dir. Saydam bir gaz olan CO₂ aynı bir seranın veya otomobilin camı gibi, ısı veren güneş ışınlarını içeri alır; fakat ısı radyasyonunu

geri vermez. CO₂ bir örtü gibi dünyayı sarmaktadır, şayet bu durum olmasaydı dünyanın ortalama sıcaklığı -18 °C olacaktı. Bu örtü sayesinde sıcaklık +15 °C civarındadır [36].

Doğada karbon, atmosfere bağlı, okyanuslara bağlı, kara ve deniz bitkilerine bağlı ve mineral rezervlere bağlı olan çeşitli çevrimlere katılır. En büyük akış (döngü) atmosfer ile bitki örtüsü arasında ve atmosfer ile okyanus yüzeyi arasında meydana gelmektedir. Atmosferde karbon, çoğunlukla oksitlenmiş formu olan CO₂ şeklinde bulunur. Atmosferik karbondioksit bu küresel karbon çevriminin bir parçasıdır ve bu nedenle varlığı jeokimyasal ve biyolojik proseslerin karmaşık bir fonksiyonudur.

IPCC (2001) atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunun antropojenik CO₂ emisyonundan kaynaklandığını açıkça ifade etmektedir. En baskın antropojenik emisyon kaynağı olarak da fosil yakıtları göstermektedir. Ormanlık alanların tahrip edilmesi, biyokütle yakılması, dolaylı CO₂ emisyonları da hissedilir miktarlarda CO₂ emisyonuna neden olmaktadır [41]. 2005 yılı itibariyle atmosferdeki CO₂ konsantrasyonu son 250 yılda 278 ppm'den 379 ppm'e çıkmıştır. İlk 50 ppm'lik artış 200 yıllık zaman diliminde 1970 yılına kadar gerçekleşmiş, sonraki 50 ppm'lik artış ise 30 yıllık bir zaman diliminde gerçekleşmiştir. 1995 – 2005 yılları arasındaki 10 yılda CO₂ konsantrasyonu 19 ppm artmıştır [43].

Metan (CH₄)

Sera etkisinin %20'sini meydana getiren diğer bir gaz ise metandır. Karbondioksite nazaran 20 misli daha ısı tutucu bir rol oynamaktadır. Metan daha çok biyolojik sistemlerdeki organik maddelerin anaerobik olarak parçalanması ile üretilmektedir. Metan, doğal gazın temel elemanıdır. Bataklık ve pirinç tarlası gibi düşük oksijenli ortamlardaki biyolojik proseslerle atmosfere salınabilmektedir. Ayrıca ham petrol, doğalgaz, kömür vb. üretiminde ve taşınmasında, fosil yakıt yakma sistemlerinde tam olmayan yanma durumlarında CH₄ emisyonları gerçekleşmektedir. Meydana gelmiş olan dünya çapındaki ısınma anaerobik çürümeyi de hızlandırmış, CO₂ kadar, CH₄ oluşumunu da artırmıştır [38]. Atmosferdeki CH₄ konsantrasyonu 1750 yılından günümüze %143 artış göstermiştir. IPCC, atmosfere giden CH₄ emisyonunun % 50'sinin antropojenik yani insan aktiviteleri sonucunda olduğunu söylemektedir [43].

Diazot Monoksit (N_2O)

Azot oksitleri içinde en önemlisi diazot monoksittir. Sera etkisinin %15'inin bu gazdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Diazot monoksidin antropojenik kaynağı olarak tarımsal aktiviteler, azot bağlayan bitkiler, sentetik gübreler, fosil yakıtlar, özellikle mobil araçlarda kullanılan yakıtlar, nitrik asit üretimi, atık su arıtma ve atık, biyokütle yakma prosesleri verilmektedir. Stratosferde güneş ışığının fotolitik (güneş enerjisi ile elementin atomlarına ayrılması) davranışı sonucu N_2O atmosferden eksilmektedir. Atmosferik N_2O konsantrasyonu 1750'den günümüze % 18 artmıştır [39].

Ozon (O_3)

Ozon (O_3), yüksek enerjili ultraviyole ışınlarının bombardımanına maruz kalan oksijen moleküllerinin parçalanıp açığa çıkan serbest oksijen atomlarının bir kısmının O_2 ile birleşmesi sonucu oluşmaktadır. Böylece meydana gelen ozonun, oksijenin sahip olmadığı bazı özellikleri mevcuttur. Ozon stratosferin üst tabakasında zararlı UV radyasyonunu engeller ve az konsantrasyonlarda troposferde de bulunur. Esas ozon teşekkülü stratosferde olur. Stratosferde bulunan ozon miktarı atmosfere salınan klor ve brom içeren halokarbonlar sebebiyle azalmıştır [44].

Troposferdeki ozon miktarının artışı atmosferdeki “sera gazı etkisi yönünden” 1750 yıllarından sonra en büyük etkiye sahip olan üçüncü (CO_2 ve CH_4 'dan sonra) bileşen olabileceği tahminlerine yol açmıştır. Troposferdeki ozon, güneş ışığı varlığında NO_x ile karışan uçucu organik bileşiklerin kompleks reaksiyonları sonucunda oluşmaktadır [41].

Halokarbonlar, PFC, HFC, SF_6

Halokarbonlar, ısımaya doğrudan ve dolaylı olarak etki eden kimyasallardır. Klor içeren (kloroflorokarbonlar, hidrokloroflorokarbonlar, metil kloroform, karbon tetraklorid) ve brom içeren (halonlar, metil bromid, hidrobromoflorokarbonlar) halokarbon bileşiklerinin neredeyse tamamı insanlar tarafından üretilmektedir ve atmosferde stratosferik ozon miktarını azaltmaktadır. Bu nedenle Montreal Protokolü'nde “Ozon Tabakasını Tüketen Maddeler” listesindedirler [39].

CFC ve HCFC gazları, küresel ısınmaya neden olan gazlar içermekle beraber, bir taraftan da stratosferdeki ozonu azalttıkları için, ısımaya olan net zorlayıcı etkileri azalmaktadır. Çünkü ozon dünyayı güneşten gelen ultraviyole ışınlardan korumasının yanında aynı zamanda önemli bir sera gazıdır. PFC ve SF₆ bileşiklerinin emisyonu en çok endüstriyel proseslerden kaynaklanmaktadır. Alüminyum eritme, yarıiletkenlerin üretimi, elektrik iletimi ve dağıtımı, magnezyum döküm vb. prosesler başlıca kaynaklardır. Bu bileşiklerin sera etkileri az olsa da giderek artan kullanım miktarları atmosferik ömürlerinin oldukça uzun olması gün geçtikçe toplam etkilerinin artacağını göstermektedir.

Karbon Monoksit (CO)

CO; CH₄ ve troposfer ozonunun, diğer atmosfer elemanlarıyla (hidroksil radikali gibi) kimyasal reaksiyona girmesine katkıda bulunduğunda, CH₄ ve troposfer ozonunun konsantrasyonlarının artmasından dolayı olarak sorumludur. Karbon içeren yakıtların eksik yanması sonucunda CO oluşur. CO, atmosferdeki doğal prosesler sonucunda CO₂ şeklini alır. CO konsantrasyonları atmosferde kısa ömürlüdür ve konuma göre değişkenlik göstermektedir [39].

Metan Dışındaki Organik Uçucu Bileşikler (NMVOC)

NMVOC gazları, propan, bütan ve etan gibi bileşikleri içermektedir. Bu bileşikler, NO_x ile beraber, troposfer ozonunun ve diğer fotokimyasal oksitleyicilerin oluşmasında rol alırlar. NMVOC emisyonları temel olarak ulaştırmadan, taşıma hatlarından, endüstriyel proseslerden, biokütle yakma işlemlerinden, organik solvent tüketimlerinden kaynaklanmaktadır. NMVOC konsantrasyonu atmosferde sürekli değişkenlik gösterir ve ömrü kısadır [39].

Azot Oksitler (NO_x)

Azot oksitlerin (NO ve NO₂ gibi) temel iklim değişimi etkileri, doğrudan değil, dolaylı olarak yani troposferde ozon oluşmasındaki (troposfer ozonu sera gazı özelliği taşımaktadır) rollerinin sonucunda gerçekleşmektedir. NO_x emisyonları, yıldırım düşmesinden, topraktaki mikrobik aktivitelerden, biokütlelerin doğal veya insan nedeniyle yanmasından, yakıt yakılmasından ve stratosferde N₂O'nun indirgenmesinden oluşturulabilmektedir. NO_x konsantrasyonları atmosferde kısa ömürlüdür ve konumsal olarak farklılık göstermektedir [39].

Su Buharı (H₂O)

Atmosferdeki en dominant ve bol bulunan sera gazı su buharıdır. Su buharı uzun ömürlü veya atmosferde iyi karışmış bir yapıda değildir ve konuma göre %0-2 arasında değişmektedir. Ayrıca, atmosferik su gaz, sıvı ve katı gibi çeşitli fiziksel formlarda bulunabilir. İnsan faaliyetlerinin ortalama küresel su buharı konsantrasyonunu doğrudan etkilemediği düşünülmektedir; fakat diğer sera gazlarının konsantrasyonundaki artış sonucunda oluşan ısıma zorlaması dolaylı olarak hidrolojik döngüyü etkileyebilir. Atmosferdeki ısınma su tutma kapasitesini artırır ve bunun sonucunda su buharı konsantrasyonunun artışı bulut oluşumunu etkiler. Bulutlar ise hem güneşten gelen hem de karadan yansıyan ışınları hem absorbe eder hem de yansıtır [39].

3.1. Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)

Atmosferde bulunan gazlar doğrudan veya dolaylı olarak sera etkisine neden olabilirler. Doğrudan etki bir gazın radyasyonu kendisinin absorpladığı durumdur. Ancak gaz kendisi değil de kendisinin oluşumuna sebep olduğu kimyasallar ile diğer sera gazlarının yarılanma ömürlerinin değişimine yol açarak veya dünyanın radyasyon dengesini bozarak (bulut oluşturmak gibi) dolaylı yünden sera etkisine neden olabilmektedir.

IPCC sera gazlarını sebep oldukları sera etkisine (atmosferde tutulmaya sebep oldukları toplam ısıya göre) olan etkilerini karşılaştırabilmek için “Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)” kavramını geliştirmiştir. GWP değerleri, çeşitli sera gazlarının sera etkisini gösterme gücünün global ortalamalar şeklinde ifadesidir. Buradaki hesapta, referans seçilen bir gaza göre birim gazın belli bir süre içinde doğrudan ve dolaylı olarak sera gazı tesiri gösterme özelliği belirlenmektedir. Referans olarak seçilen gaz karbondioksittir. Gazın kendisi eğer sera gazı ise doğrudan etki oluşturur. Orijinal gazın, sera gazı üretecek şekilde kimyasal dönüşüme girmesi veya diğer gazların atmosferik ömürlerini etkileyecek şekilde tepkime vermesi durumunda dolaylı sera gazı etkisi gösterdiği kabul edilmektedir. Herhangi bir gazın CO₂ eşdeğeri cinsinden ısınmaya potansiyel etkisi, gigagram (Gg) değeri ile teragram karbondioksit eşdeğeri (Tg CO₂ Eşdeğeri) arasındaki ilişki IPCC birimleri cinsinden Eşitlik 3.1 ile ifade edilir.

$$Tg\ CO_2\ Eşdeğeri = (Gg\ gaz). (GWP). \left(\frac{Tg}{1000Gg}\right) \quad (3.1)$$

Tg CO₂ Eşdeğeri= Karbon dioksit eşdeğerinin teragram cinsinden değeri

Gg gaz= Gigagram cinsinden yakıtın miktarı

GWP= Küresel Isınma Potansiyeli şeklinde ifade edilmiştir.

GWP değerleri, emisyonların etkilerinin kıyaslanması ve farklı gazların azaltılması gibi konularda fikir sahibi olunmasında yardımcı olmaktadır. IPCC'ye göre, küresel ısınma potansiyelleri kabaca $\pm\%35$ gibi bir belirsizliğe sahiptir. Özellikle atmosfer ömürleri belirlenmemiş olan gazlarda bu belirsizlik değerleri diğerlerine göre daha büyüktür. Atmosfer ömürleri izafi olarak uzun olan sera gazları (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆ gibi) atmosferde daha eşit şekilde dağılmışlardır ve sonuç olarak da küresel olarak ortalama konsantrasyonları belirlenebilmektedir. Su buharı, CO, troposfer ozonu, diğer çevre kirleticiler (NO_x ve NMVOC), troposferdeki aerosoller gibi kısa ömürlü gazlar, konumsal olarak değişiklik göstermektedir ve bu nedenle küresel sera gazı etkilerini belirlemek güçtür. GWP değerleri genel olarak bu tip kısa ömürlü ve konumsal olarak homojen olmayan dağılım gösteren gazlar için uygulanmamaktadır [39].

Çizelge 3.1 Sera gazlarının küresi ısınma etkisi potansiyelleri (GWP)

Gaz	Atmosfer Ömrü (yıl)	20 Yıllık GWP	100 Yıllık GWP	500 Yıllık GWP
CO₂	50-200	1	1	1
CH₄	12 $\pm$ 3	56	21	6,5
N₂O	120	280	310	170
HFC-23	264	9100	11700	9800
CF₄	50000	4400	6500	10000
SF₆	3200	16300	23900	34900

Çizelge 3.1'deki değerler IPCC 1996 değerleridir. Her sera gazı atmosferde ısı tutma kapasitesine göre farklılık göstermektedir. HFC ve PFC'ler en çok ısı hapsedme özelliğine sahip gazlardır. Örneğin metan, karbondioksit'e göre molekül başına 21 kat daha fazla ısı hapsedmektedir. CO, NO_x, NMVOC, SO₂ ve aerosollere ait GWP değerleri Çizelge 3.1'de yer almamaktadır. Bunun sebebi atmosferde kısa süreli kalan gazlar için geçerli veya kabul gören bir etki belirleme yönteminin henüz geliştirilmiş

olmamasıdır. IPCC, bu gazlar için dolaylı etkilerden bahsetmektedir. Ancak bazı araştırmacılar tarafından yayınlanmış değerlendirmeler ve belirlenmiş GWP değerleri literatürde bulunmaktadır. Atmosferdeki sera gazlarına ait konsantrasyon ve ömür değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir [39].

Çizelge 3.2 Atmosferik konsantrasyonlar

Atmosferik Değişken	CO ₂ ^a	CH ₄ ^b	N ₂ O	SF ₆	CF ₄
Sanayileşme öncesi kons.	278 ppm	0.715 ppm	0.270 ppm	0 ppt	40 ppt
Günümüzdeki kons.	379 ppm	1.774 ppm	0.319 ppm	5.6 ppm	74 ppt
Kons. değişim hızı	1.4 ppm/yıl	0.005 ppm/yıl	0.26 % / yıl	Lineer ^c	Lineer ^c
Atmosferik ömür^d	50-200 ^e / yıl	12 / yıl	114 / yıl	3200 / yıl	>50000 / yıl

^a Sanayileşme öncesine ait 278 ppm kabul edilen konsantrasyon (1000-1750 yılları arasını kapsar) son 250 yılda yaklaşık olarak 100ppm artışla 379 ppm’e (2005) çıkmıştır.

^b 1984 yılından itibaren 14 ppb/yıl olan konsantrasyon artış hızı 1999-2005 yılları arasında sıfıra yaklaşmıştır. Artış hızının azalma sebebi olarak emisyon miktarının azalması değil, atmosferde konsantrasyonu artıran diğer gazlardan veya bunlarla reaksiyonlardan kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Bu konuda birçok hipotez vardır.

^c IPCC (2007)’ye göre SF₆ ve CF₄ konsantrasyon değişimi lineerdir.

^d IPCC (SAR 1996)

^e CO₂ giderme proseslerinin değişik hızlardaki tutma oranlarına sahip olmaları sebebiyle tek bir atmosferik ömür tanımlanamaz.

3.2. Emisyon Ticareti

Çok büyük bir kısmını CO₂ oluşturduğundan terim olarak karbon piyasası kullanılmasına rağmen diğer sera gazları da karbon eş değeri olarak çevrildiğinden literatürde genellikle sera gazlarının tümünü temsil eden karbon piyasası, piyasa kuralları doğrultusunda çalışmak koşulu ile salımları azaltmada önemli bir araç olarak görülmektedir. Karbon piyasası salımları azaltmak için belirlenen limitten fazla salım yapanları cezalandırırken daha az salanlar ise ödüllendirilerek mevcut kaynakların en düşük maliyetle kanalize edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca fiyatlandırdığı kirlenme birimlerini mülkiyet hakkına dönüştürerek karbonun tüm dünyada ticaretinin yapılmasını mümkün kılması sayesinde düzgün işleyen bir karbon piyasası, işletmelerin daha az sera gazı salımı salmasını teşvik ederek temiz teknolojiyi kullanmaya yönlendirmektedir. Karbon piyasalarını zorunlu (Kyoto Protokolü

esneklik mekanizmaları) ve gönüllü olmak üzere iki kategori altında incelemek mümkündür:

Zorunlu Karbon Piyasaları (Kyoto Protokolü Esneklik Mekanizmaları)

Kyoto Protokolünde tanımlanan esneklik mekanizmaları ile ülkelerin düşük maliyetle salım azaltımı yapabilmelerine imkân tanınmaktadır. Protokolde tanımlanan esneklik mekanizmaları Salım Ticareti (Emission Trading -ET), Ortak Uygulama (Joint Implementation-JI), Temiz Kalkınma Mekanizmasıdır (Clean Development Mechanism-CDM). Kyoto Protokolüne göre Salım Ticareti (ET) ve Ortak Uygulama (JI) mekanizmaları Ek-I ülkeleri arasında, Temiz Kalkınma Mekanizması ise Ek-I ve Ek-I dışı ülkeler arasında yapılabilir. Protokolde tanımlanan esneklik mekanizmaları aşağıda anlatılmaktadır:

Ortak Uygulama (Joint Implementation - JI): Protokolün 6. Maddesi ile düzenlenen bu mekanizma Ek-I ülkeleri arasında gerekli şartların sağlanması koşuluyla, insan kaynaklı sera gazı salımlarının azaltılmasını veya sera gazlarının yutaklar yoluyla uzaklaştırılmasını amaçlayan projelerden elde edilen 'Salım Azaltma Kredisi' (Emission Reduction Unit-ERU) kazanır ve kazanılan bu krediler toplam hedeften düşülür.

Temiz Kalkınma Mekanizması (Clean Development Mechanism -CDM): Protokolün 12. maddesi ile düzenlenen bu mekanizma ile Ek-I Dışı ülkelerin sürdürülebilir kalkınma ilkesi doğrultusunda sera gazı azaltımına katkı sağlamaları amaçlanmaktadır. Ek-I'de yer alan tarafların salım azaltım taahhüdünü gerçekleştirmek için Ek-I Dışı ülkelerde yapacakları proje faaliyetleri sonucunda "Sertifikalandırılmış Salım Azaltım Kredisi" (Certified Emission Reductions-CER) elde edeceklerdir.

Salım Ticareti (Emission Trading-ET): Kyoto Protokolünün 17. Maddesi ile düzenlenmiş olan bu mekanizma ile Ek-I listesinde yer alan herhangi bir taraf ülke, Ek-B'de belirlenmiş olan salım azaltım miktarının bir bölümünün ticaretini yapabilir. Diğer bir ifadeyle taahhüt edilen salım miktarından daha fazla azaltım yapan taraf ülke, salımındaki bu ilave azaltımı bir başka Ek-I ülkesine satabilir.

Gönüllü Karbon Piyasaları

Gönüllü Karbon Piyasaları, bireylerin, kurum ve kuruluşların, firmaların, sivil toplum örgütlerinin faaliyetleri sonucu oluşan sera gazı salımlarının gönüllü olarak azaltımını, dengeleyebilmesini kolaylaştırmak amacıyla oluşturulan bir pazardır. Bu süreç, Kyoto Protokolü kapsamında zorunlu olarak uygulanan Esneklik Mekanizmalarına benzer bir süreçtir. Kamunun bu sürece ulusal yükümlülükler kapsamında dâhil olmaması, gönüllü karbon piyasalarını Kyoto Protokolü kapsamındaki zorunlu süreçlerden ayıran en önemli farklılıkların başında gelmektedir. Hukuki bağlayıcılığı olmayan, salım azaltım maliyetlerini düşürmeyi amaçlayan ve katılımcıları özel sektör, uluslararası organizasyonlar, kamu kuruluşları ve üçüncü şahıslar olabilen gönüllü salım ticaretinin paydaşları; proje sahipleri, toptancılar, perakendeciler ve komisyoncular olabilmektedir.

Türkiye'de Karbon Piyasası

Türkiye, her ne kadar Kyoto Protokolü'nün emisyon ticaretine konu olan esneklik mekanizmalarından yararlanamıyorsa da; bu mekanizmalardan bağımsız olarak işleyen, çevresel ve sosyal sorumluluk ilkesi çerçevesinde kurulmuş Gönüllü Karbon Piyasası'na yönelik projeler 2005 yılından beri geliştirilmekte ve uygulanmaktadır. Gönüllü Karbon Piyasası, Dünya Karbon Piyasası içerisinde çok küçük bir yüzdeyi temsil etmekle birlikte bu piyasayı hal-i hazırda etkili biçimde kullanmakta olan Türkiye'nin ileri dönemde karbon piyasalarına katılımı açısından da bir fırsat sunmaktadır. Kısa bir sürede yüksek standartlı ve yüksek hacimli bir potansiyeli harekete geçiren gönüllü emisyon ticareti sistemi, 2012 sonrası iklim rejimine dönük Türkiye'nin teknik alt yapının güçlenmesine katkı sağlamasının yanı sıra, yatırımcılar için temiz teknolojilere yatırımı daha cazip hale getirdiği söylenebilir. Mevcut durum itibarıyla, Türkiye'de gerçekleştirilen projelerin tamamı Gönüllü Karbon Piyasasında işlem görmektedir.

Çizelge 3.3'te Türkiye'de Gönüllü Karbon Piyasalarında geliştirilen proje türleri ve emisyon azaltımları gösterilmektedir [45].

Çizelge 3.3 Türkiye'de Gönüllü Karbon Piyasalarında geliştirilen proje türleri

Proje Türü	Proje Sayısı	Yıllık Sera Gazı Azaltımı (ton CO ₂ eşdeğeri)
Hidroelektrik	124	7.181.723
Rüzgar	64	5.603.468
Biyogaz	6	514.789
Jeotermal	6	405.309
Enerji Verimliliği	5	151.432
Atıktan Enerji Üretimi	13	2.473.093
TOPLAM	218	2.473.093

4. ÇİMENTO ÜRETİM SÜRECİ İLE İLGİLİ EMİSYON KAYNAKLARI ve MEVCUT EN İYİ TEKNOLOJİLER

İlk olarak 2001 yılının Aralık ayında çimento ve kireç endüstrisi için Avrupa Komisyonu tarafından IPPC Direktifi kapsamında yayımlanmış olan ve 2010 yılında yenisi yayımlanan “Çimento, Kireç ve Magnezyum Oksit İmalat Sanayileri Mevcut En İyi Teknolojiler Referans Dokümanı, BREF”, çimento üretiminde kullanılacak hammaddelerin stoklanması ve hazırlanışından nihai ürün olan çimentonun üretimine kadar geçen süreç için “Best Available Technologies, BAT” yani “Mevcut En İyi Teknolojiler” konusunda kaynak doküman olarak kabul edilmektedir. Bu doküman ham maddelerin hazırlanmasından bitmiş ürünlerin sevkiyatına kadar olan faaliyetlerin çoğunu içermektedir.

4.1. Çimento Üretim Sürecinde Yer Alan Emisyon Kaynakları ve Türleri

Çimento üretimi esnasında bazı hava ve gürültü emisyonları ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, atıkların kullanımı ile ilgili olarak (atıkların depolanması ve taşınması nedeniyle) kokular ortaya çıkabilir. Bu bölümde, hammaddelerin, katkı maddelerinin, yakıtların depolanması ve taşınması gibi diğer proses adımları da dahil olmak üzere çimento üretim prosesinde hava kirletici emisyon çeşitleri ve bu emisyonların kaynaklandığı noktalar ile ilgili bilgi verilmektedir.

IPPC Direktifi, sektördeki proseslerden kaynaklı temel hava kirletici maddelerin genel bir listesini içermekte olup bu maddeler aşağıda belirtilmiştir:

- Azot oksitleri (NO_x) ve diğer azot bileşikleri
- Kükürt dioksit (SO_2) ve diğer kükürt bileşikleri
- Toz
- Toplam organik bileşikler (TOC), uçucu organik bileşikler (VOC) dâhil
- Poliklorlu dibenzo-p-dioksinler ve dibenzofuranlar (PCDD’ler ve PCDF’ler)
- Metaller ve bileşikleri

- Hidrojen florür (HF)
- Hidrojen klorür (HCl)
- Karbon monoksit (CO)

Çimento üretimindeki en önemli emisyonlar döner fırın sisteminden kaynaklanan emisyonlardır. Bu emisyonlar, hammaddeler ve yakıt tüketimi sonucu oluşan çeşitli fizikokimyasal reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır. Çimento fırınına ait çıkış gazının ana bileşenleri, yanma havasından kaynaklanan azot, CaCO_3 'ün kalsinasyonu ve yakıtın yanmasından kaynaklanan CO_2 , yanma prosesinden ve ham maddelerden kaynaklanan su buharı ile oksijen fazlasıdır.

Öğütme ve taşıma operasyonları ile hammaddeler, katı yakıt ve ürün gibi diğer kaynaklardan oluşan toz emisyonları vardır. Ayrıca, hammaddelerin ve katı yakıtların dışarıda depolanmasından ve çimento ürününün yüklenmesi de dâhil olmak üzere herhangi bir malzeme nakil sisteminden kaynaklanan toz emisyonları potansiyeli de vardır. Bu yönler iyi tasarlanmadığı veya korunmadığı takdirde emisyonların büyüklüğü önemli olabilir ve düşük seviyede salınımlar yerleşim yerlerine yakın olan tesisler için yerel seviyede rahatsız edici sorunlara yol açabilmektedir [26].

Karbondioksit (CO_2): Küresel ısınmaya neden olan sera gazları artık dünyanın başlıca sorunlarından birisi haline gelmiştir. Kısaca “karbon gazı” olarak adlandırılan CO_2 salınımı başta Avrupa Birliği olmak üzere pek çok ülke tarafından vergilendirilerek üreticiler cezalandırılmaktadır. Çimento sanayi bu bağlamda en büyük karbon salıcılarından olarak tartışmaların odak noktasındadır. Bu nedenle çimento sanayi, CO_2 emisyonlarını azaltmak için çeşitli önlemler almaktadır:

- Özgül ısı tüketimini azaltarak enerji verimliliğini artırma
- Çimento bileşimindeki katkı oranlarını artırma
- Geleneksel fosil yakıtların yanında alternatif yakıtlar kullanma, çimento sanayinde alınması hedeflenen birincil önlemlerdir.

Çimento üretiminde CO_2 emisyonları;

- Hammaddenin dekarbonizasyonundan (kalsinasyon)
- Döner fırın ve kurutucularda kullanılan yakıt içeriğindeki karbondan

- Dolaylı olarak üretimde kullanılan elektriğin termik santrallerde üretilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu değerlere çimento fabrikasında dolaşan araçlarla ürün dağıtımında kullanılan araçlardan gelen emisyonlar da eklenebilir.

Çimento, mineral katkılı olarak öğütüldüğünde, ton başına CO₂ emisyonlarının azaldığı görülmektedir. Oluşan emisyonların yaklaşık %60'ı kalsinasyon prosesi esnasında oluşur, %38'i ise yakıtın yanması ile ilgilidir. Yakıtın yanması sonucunda oluşan CO₂ emisyonları, yakıtın özgül ısı ihtiyacı, karbon içeriği ve kalorifik değeri ile doğrudan ilgilidir. Alternatif yakıtlar kullanarak yanmadan kaynaklı CO₂ emisyonları azaltılabildiği gibi, yakıt etkinliği daha fazla olan döner fırın proseslerinin uygulanması sonucunda hem enerji verimliliği sağlanabilmekte hem de CO₂ emisyonlarında azaltımlar olabilmektedir [26].

Ülkemizde, çeşitli endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının izlenmesine, doğrulanmasına ve raporlanmasına dair usul ve esasları düzenlemek amacıyla Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından "Sera Gazı Emisyonlarının Takibi hakkındaki Yönetmelik" 25 Nisan 2012 tarihinde resmi gazetede yayımlanmıştır.

İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve Kyoto Protokolü gereğince sera gazı emisyonlarının izlenerek raporlanması ve Avrupa Birliği emisyon ticareti kapsamında sera gazı emisyonlarının kontrolünün sağlanarak global ölçekte bir uyum sağlanması yönetmeliğin birincil hedefleri arasındadır.

Karbon Monoksit (CO): CO emisyonları, genellikle klinker pişirme işlemi sırasında oluşmakta ve çimento üretiminde kullanılan hammaddelerdeki küçük miktarlardaki organik bileşiklerden kaynaklanmaktadır. Bu bileşenler, CO ve CO₂ oluşturmak üzere döner fırın besleme malzemelerinin ön ısıtılması sırasında okside olurlar. Bu proses esnasında toplam organik karbon gibi küçük miktarlarda organik eser gazlar da oluşur. Bu nedenle, klinker pişirme prosesi esnasında temiz gazın CO içeriği ve içindeki organik eser gazlar, yanma durumu hakkında bir sonuca varmaya izin vermemektedir. CO emisyonları, yetersiz yanma ve uygun olmayan pişirme koşullarından da kaynaklanabilmektedir.

Bir kilogram klinker başına çimento hammaddesinden kaynaklı 1,5-6 gr organik karbon prosese girmektedir. Hammadde içeriğindeki bu organik bileşiklerin %85-95’lik kısmı %3 oksijen varlığında CO₂’e, %5-15’lik kısmı da CO’ye dönüşmektedir [26].

Toz (Partikül Madde): Çimento fabrikalarının en büyük sorunu işletme birimlerinden, ocak ve stok sahalarından kaynaklanan toz salınımıdır. Havada bulunan toz ve sıvı tanecikler birlikte “Partikül madde, PM” olarak tanımlanır [24]. Toz emisyonları (PM) -özellikle fırın bacalarından kaynaklanan- çimento üretimi ile ilgili en önemli çevresel konulardan biridir. Toz emisyonlarının ana kaynakları:

- Hammadde hazırlama prosesi (farin değirmenleri)
- Öğütme ve kurutma prosesleri
- Klinker pişirme prosesi (fırımlar ve klinker soğutucuları)
- Yakıt hazırlama
- Çimento öğütme üniteleridir (değirmenler)

Ayrıca bir çimento tesisinde, aşağıda belirtilen yan prosesler de toz emisyonlarına neden olmaktadır:

- Hammaddelerin kırılması
- Hammadde konveyörleri ve elevatörleri
- Hammadde ve çimento depolama
- Hammadde, çimento ve kömür öğütme değirmenleri
- Yakıtların depolanması
- Çimento sevkiyatıdır.

Tüm bu prosesler esnasında, partikül madde içinde büyük hacimlerde gaz akışları olmaktadır. Kırma, öğütme ve sevkiyat gibi durumlarda sistem torbalı filtrelerle donatılır. Modern elektrostatik çökticilerin ve torbalı filtrelerin tasarımı ve güvenilirliği, toz emisyonlarını önemsiz seviyelere düşürmektedir [26].

Hammaddelerin ve katı yakıtların depolanması ve taşınması esnasında da ortama önemli miktarda toz emisyonları yayılmaktadır. Klinkerin veya çimentonun ambalajlanması ve sevkiyatı nedeniyle oluşan toz da önemli olabilmektedir. Proses sırasında oluşan toz emisyonları (genellikle yüksek bacalardan) hava kalitesi üzerinde

daha fazla etkili olmaktadır. Çimento sektörünün doğası gereği, genellikle bütün proseslerde atmosfere toz emisyonu yayılma oranı yüksek olduğundan her bir prosesten çıkan ürünlerin konveyör ve elevatörler yardımıyla kapalı sistemlerle taşınması emisyon azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Kamyonlar tarafından kullanılan yollar yayılmış toz emisyonlarını önlemek için periyodik olarak asfaltlanmalı ve temizlenmelidir. Ayrıca bu emisyonları önlemek için tesis alanında su püskürtme de uygulanabilmektedir. Mümkün olan yerlerde kapalı depolama sistemleri kullanılmalıdır [26].

Azot Oksitler (NO_x): Klinker pişirme prosesi yüksek sıcaklıkta gerçekleştiğinden dolayı, azot oksitlerin (NO_x) oluşumuna neden olan bir prosestir. Bu oksitler çimento üretim tesislerinin yol açtığı hava kirliliği açısından büyük öneme sahiptir. NO_x salınımı yakma koşullarına ve yakıtın özelliğine bağlı olarak değişmektedir. NO_x oluşumuna neden olan iki ana kaynak vardır:

- **Termal NO_x :** Yanma havası içindeki azotun bir kısmı çeşitli azot oksitleri oluşturmak üzere oksijenle reaksiyona girer. Bu mekanizma azot oksit oluşumunun ana mekanizmasıdır.
- **Yakıt NO_x :** Pek çok yakıt kimyasal bağlı azot içerir. Yakıt içindeki azot, çeşitli azot oksitlerini oluşturmak üzere havadaki oksijenle reaksiyona girer. Ayrıca, atıkların kullanılması esnasında NO_x emisyonlarında ihmal edilebilir boyutta değişiklikler gözlemlenebilmektedir [26].

Kükürt Dioksit (SO_2): Çimento üretim tesislerinden kaynaklanan SO_2 emisyonları, kullanılan prosese, hammaddelerin (inorganik sülfatlar, organik ve inorganik süfitler) içindeki uçucu kükürt içeriğine ve yakıttaki kükürt içeriğine bağlıdır. Ayrıca, SO_2 oluşumu, döner fırın sistemi içerisindeki kükürt sirkülasyonundan da kaynaklanmaktadır. Kükürdün büyük bir bölümü klinkerin bünyesi içine yerleşir veya proses tarafından sistemin dışına atılır. Gaz halindeki kükürdün %99'u SO_2 'dir. Fırın sistemine yakıtla birlikte girip okside olan kükürt, SO_2 halini alır ve klinkerleşme bölgesinin, kalsinasyon bölgesinin ve ön ısıtıcının alt kademesinin güçlü alkali doğası gereği önemli SO_2 emisyonlarına neden olmaz. Bu kükürt, klinkerleşme bölgesinde kısmi sülfat ayrışmasından kaynaklanan düşük miktardaki SO_2 konsantrasyonları ile birlikte fırın sisteminin kalsinasyon bölgesine girer. Kalsinasyon bölgesinde SO_2 , hammaddelerden kaynaklanan alkaliler ve alkali sülfatlar ile de reaksiyona girer.

Kısmen karbondan arındırılmış farin ile temas ettiğinde, fazla SO_2 önce CaSO_3 , sonra CaSO_4 'a dönüşür. Bu sülfatlar tekrar döner fırına girerler. Bu şekilde, klinker vasıtasıyla dışarı atılan kükürt ile dengede olan kükürt döngüleri oluşur [26].

Toplam Organik Bileşikler (TOC): Yanma prosesinde uçucu organik bileşiklerin (ve karbon monoksitin) oluşumu genellikle yetersiz yanma ile ilişkilidir. Çimento fırınlarında emisyonlar, kullanılan fırının türü, fırındaki gazların yüksek alıkonma süresi, yüksek sıcaklık ve fazla oksijen koşulları nedeniyle normal kararlı çalışma koşulları altında daha düşük olacaktır. Bunlar organik bileşiklerin yüksek bir verimlilik oranı ile ayrıştırıldığı ve yok edildiği proses koşullarıdır. VOC emisyonu, fırına beslenen malzemelerin prosesin ilk aşamalarında ısıtılması ile birlikte farinin içinde bulunan organik madde ısınıp uçucu hale geldiğinde oluşmaktadır. Organik madde 400- 600°C arasındaki sıcaklıklarda salınmaktadır [26].

Poliklorlu Dibenzo-p-dioksinler (PCDD) ve Dibenzofuranlar (PCDF): PCDD ve PCDF, döner fırın ve proses tasarımı, yanma koşulları, besleme özellikleri ile emisyon kontrol ekipmanlarının kullanımına bağlı olarak çeşitli formasyon mekanizmalarından kaynaklanabilir. Bununla birlikte, organik maddelerin varlığında klorlu herhangi bir madde eklenmesi potansiyel olarak yanma prosesinde PCDD/F'nin oluşmasına neden olabilir. PCDD/F ve takip eden emisyonlarının oluşumu, aşağıda belirtilen beş faktörün varlığını gerektirir:

- Hidrokarbonlar
- Klorürler
- Bir katalizör
- Uygun bir sıcaklık penceresi (200-450 °C)
- Uygun sıcaklık penceresinde uzun bir alıkoyma süresi

Buna ek olarak, gaz akışı içinde moleküler oksijenin var olması gereklidir. Oluşum hızı, oksijen konsantrasyonu ile belirli katsayılar düzeyinde doğru orantılıdır [26].

Metaller ve Bileşikleri: Hammaddeler ve yakıtlar metal içerirler. Metal konsantrasyonları, bulundukları yerlere bağlı olarak büyük değişiklikler gösterir ve emisyon yayma potansiyelleri çok karmaşık mekanizmalar tarafından etkilenir. Ayrıca, yakıt olarak kullanılan atıkların metal konsantrasyonları atığın menşesine göre

değişir. Metal bileşikleri, metallerin uçuculuğuna ve tuzlarına bağlı olarak dört sınıf altında toplanabilir:

- Isıya dayanıklı veya uçucu olmayan veya bu tür bileşikler içeren metaller: Ba, Be, Cr, As, Ni, V, Al, Ti, Ca, Fe, Mn, Cu ve Ag
- Yarı uçucu olan veya bu tür bileşik içeren metaller: Sb, Cd, Pb, Se, Zn, K ve Na
- Talyum
- Civa

Klinker pişirme prosesi esnasında metallerin emisyon seviyeleri, uçuculuğa, fırın giriş senaryosuna, hammaddeler ve yakıtlar içindeki metalik elementlerin konsantrasyonlarına (atıklar veya tehlikeli atıklar kullanıldığında), prosesin türüne ve en önemlisi, ana baca üzerinde kitoz toplama sistemlerinin çökeltme verimliliğine bağlıdır [26].

Hidrojen Klorür ve Hidrojen Florür (HCl ve HF): Klorür ve florür, minör ilave bileşenlerdir. Bunlar fırın sistemine hammadde ve/veya yakıt gibi değişik girdilerle girebilirler. Bu maddeler için düzenli periyodik izleme yapılması uygundur [26].

Poliaromatik Hidrokarbonlar (PAH): Çimento üretimi esnasında alternatif yakıt olarak kullanılabilen petrol ve petrol türevi atıklar proseste PAH oluşumuna sebep olabilmektedir. Ülkemizde ilgili yönetmelik gereği atıkların ek yakıt olarak kullanıldığı proseslerde PAH parametreleri yılda 2 defa örneklenerek takibi yapılmaktadır.

Diğer Organik Kirleticiler: Çimento üretim sürecinden kaynaklanan diğer organik kirleticiler, örneğin, klorobenzenler ile eş düzlemli kongenerler ve kloronaftalinler de dâhil olmak üzere poliklorlu bifenillerdir. Bazen özel çalışma koşulları altında bu maddelerin ölçümü gerekli görülebilir [26].

4.2. Çimento Sanayi için Mevcut En İyi Teknolojiler

“Mevcut En İyi Teknolojiler, Best Available Technologies (BAT)”, bir tesisin fiili performansını değerlendirmek veya yeni bir tesis kurulması için uygun teknolojileri değerlendirmek üzere bir referans noktası olarak düşünülmelidirler. Yeni tesislerin “

Çimento, Kireç ve Magnezyum Oksit İmalat Sanayileri Mevcut En İyi Teknolojiler” referans kılavuzunda sunulan BAT seviyeleri uyarınca hatta bunlardan daha iyi performans göstermek üzere tasarlanması uygun görülmektedir.

4.2.1. Hammadde Tüketimi

Uygun atıkların hammadde olarak kullanımı, doğal kaynakların girdisini azaltabilir. Dolayısıyla hammadde maliyetleri düşürülebilir ancak atık maddeler kullanılmadan önce, atık maddelerin uygun bir biçimde seçilmesi gerekir. Ayrıca atık maddelerin kapsamlı analiz prosedürü ve ön arıtımı gibi farklı temel ilkeler göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü hammadde olarak atık kullanıldığı takdirde, bunların özelliklerine bağlı olarak değişik emisyonların oluşması mümkün olabilmektedir. Ayrıca, klinkerin kalite standartlarını korumak önemlidir. Bu nedenle fırın prosesine giren maddeler her zaman iyi şekilde kontrol edilmelidir. Uygun atıkların hammadde olarak kullanımı, üretilen çimentodaki klinker oranını düşüreceğinden, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunabilmektedir. Bacalardan atmosfere atılan tozun toplanarak üretim prosesine geri gönderilmesi ve/veya yeniden kullanımı hammaddelerin toplam tüketimini azaltır. Bu geri dönüşüm toplanan tozun, doğrudan fırının veya fırın besleme malzemesinin içinde veya mamul çimento ürünleri ile karıştırılması suretiyle gerçekleşir.

Mevcut en iyi teknoloji, emisyonların önlenmesi ve/veya azaltılması için fırına giren tüm maddelerin dikkatlice seçilmesi ve kontrol edilmesidir [26].

Hammadde Özellikleri

Üretilmek istenen ürünün niteliği ve kullanılacak hammaddelerin nem içeriği genel enerji verimliliğini etkiler. Malzemeler, tercihen atık egzoz gazı ısısı ile kurutulmalıdırlar. Siklon kademe sayısı belirlenirken bu durum da göz önünde bulundurulur. Nem oranı yükseldikçe enerji ihtiyacı da artmaktadır. Ayrıca, siklon sayısının fazla olmasının, ön ısıtıcıdan kaynaklanan termal kayıpların azalmasını sağlayacağı dikkate alınmalıdır.

4.2.2. Enerji Verimliliği

Mevcut en iyi teknoloji, aşağıda belirtilen önlemlerin/tekniklerin birlikte uygulanması suretiyle termal enerji tüketiminin azaltılmasıdır:

Aşağıda belirtilenleri uygulamak suretiyle proses parametre ayarlama noktalarına mümkün olduğu kadar yakın çalışarak gelişmiş ve optimize edilmiş fırın sistemleriyle düzgün ve istikrarlı fırın prosesi uygulamak;

- Fırınlarda, özellikle soğutma bölgelerindeki fazla ısınn geri kazanılmasını sağlamak
- Kullanılan hammadde ve yakıtların özelliklerine bağlı olarak uygun sayıda siklon kademesi uygulamak
- Termal enerji tüketimi üzerinde olumlu etki yaratacak özelliğe sahip yakıtları kullanmak
- Konvansiyonel yakıtlar yerine atık yakıtlar kullanıldığında, atıkların yakılması için optimize edilmiş ve uygun fırın sistemleri kullanmak
- Baypas akışlarını asgariye indirmektir.
- Özellikle soğutma bölgesinden elde edilen sıcak hava veya ön ısıtıcıdan elde edilen fazla fırın ısısı ham maddelerin kurutulması için kullanılabilir. Bu bağlamda “Enerji Verimliliği İçin Mevcut En İyi Teknikler” referans dokümanına bakılmalıdır [26].

4.2.2.1. Termal Enerji Kullanımının Azaltılması

Termal enerji kullanımı, fırın sisteminde termal enerji optimizasyon önlemlerini/tekniklerini uygulamak gibi değişik alternatifleri değerlendirmek ve uygulamak suretiyle azaltılabilir. Modern çimento fırınlarının enerji tüketimini, nem içeriği, yanabilirlik, birbirinden farklı özellik ve parametrelere sahip yakıtların kullanımı ve bir gaz baypas sisteminin kullanılması gibi faktörler, etkileyebilmektedir. Önlemler/teknikler tek başlarına uygulanabilir ancak birbirleri ile bağlantılı olarak düşünülmelidir. Ayrıca fırının üretim kapasitesinin de enerji ihtiyacı üzerinde etkisi vardır. Uygun olan siklon kademe sayısı, hammaddelerin ve yakıtların nem içeriğine göre belirlenir.

Mevcut en iyi teknoloji:

- Yeni tesisler ve büyük çaplı iyileştirmeler için, çok kademeli ön ısıtma ve ön kalsinasyonlu kuru proses fırını kullanılmasıdır.
- Fırın tasarımına ve fırın çalışmasına bağlı olarak sıcaklık ve alıkoyma süresi açısından uygun fırın besleme noktalarının kullanılması ve kalsinasyon bölgesine gelmeden önce uçucu hale gelebilecek olan organik bileşenler içeren atık maddelerin fırın sisteminin yeterli derecede yüksek sıcaklıklı bölgelerine beslenmesidir.
- Atıkların beraber yakılması sonucunda oluşacak gazın en kötü şartlarda bile kontrollü ve homojen bir şekilde 2 saniye için 850 °C sıcaklığa yükseltileceği şekilde çalışılmasıdır.
- İçinde %1'den fazla halojenli organik maddeler bulunan ve klor olarak ifade edilen tehlikeli atıkların beraber yakılması halinde sıcaklığın 1100 °C'ye yükseltilmesidir.
- Atıkların devamlı olarak ve sabit bir şekilde beslenmesidir [26].

4.2.2.2. Elektrik Enerjisi Kullanımının Azaltılması

Elektrik enerjisi kullanımı, güç yönetim sistemlerinin kurulması ve klinkerin öğütülmesi için enerji tasarruflu ekipmanlar kullanılmalıdır. Ayrıca bazı durumlarda eski hammadde değirmenlerinin yeni değirmenler ile değiştirilmesi yoluyla, elektrik enerjisi kullanımı asgariye indirilebilir. Temel özelliklerine dayalı olarak çeşitli öğütme tekniklerinin karşılaştırılması Çizelge 4.1'de gösterilmektedir [26].

Çizelge 4.1 Temel özelliklerine göre öğütme tekniklerinin karşılaştırılması

Öğütme Prosesi	Enerji tüketimi	Bakım ihtiyaçları	Kurutma kapasitesi	Daha ince öğütmeye uygunluk
Bilyalı	100%	Az	Ortalama	İyi
Gutbett	50-65%	Az-çok	Düşük	Orta
Dikey Valsli	70-75%	Ortalama	Yüksek	Orta

Elektrik kullanımı, gelişmiş izleme sistemleri kullanmak ve sisteme giren hava kaçaklarını azaltmak suretiyle de azaltılabilir. Proses kontrol optimizasyonu gibi bazı azaltım tekniklerinin de enerji kullanımı üzerinde olumlu etkileri vardır. Mevcut en iyi

teknoloji, aşağıda belirtilen önlemleri/teknikleri tek başlarına veya birlikte uygulamak suretiyle elektrik enerjisi tüketiminin minimize edilmesidir [26]:

- Güç yönetim sistemlerini kullanmak
- Yüksek enerji verimliliği olan öğütme ekipmanlarını veya diğer elektrikli ekipmanları kullanmak

Yakıt Özellikleri: Kullanılan yakıtların yeterli kalorifik değer, düşük nem içeriği, yeterli kükürt içeriği, metaller, halojen bileşikler ve uçucu maddeler ile hava sürükleyici enjeksiyon gibi özelliklerinin fırının özgül enerji tüketimi üzerinde çeşitli etkileri vardır.

Çimento üretim tesislerinde kullanılan fosil yakıtların (kömür/linyit) kısmen veya tamamen döner fırın sistemi dışında ve hatta çimento tesisi dışında kurutularak hazırlanması, enerji tüketimi üzerindeki önemli etkilerden biri olması nedeniyle fırın sisteminin enerji verimliliğinin artmasını sağlar. Ayrıca, yakıtların kurutulması için atık ısı kullanımı termal enerjinin tasarruf edilmesini sağlar. Yüksek nem oranına sahip olan yakıtların yerine kurutulmuş yakıtların getirilmesi, fırın sisteminde klinkerin ton başına enerji tüketiminin azalmasını sağlar.

Kalsinatörü geniş aralıklarda çeşitli sınıflardaki yakıtlarla çalıştırabilme uygulaması enerji verimliliğini etkiler. Kaba taneli yakıt yerine ince öğütülmüş, kuru ve yeterli kalorifik değere, aynı zamanda da düşük reaktiviteye sahip yakıtların kullanılması enerji verimliliğinin artmasını sağlar.

4.2.2.3. Çimento Ürünlerinin Klinker İçeriğinin Azaltılması

Enerji kullanımını ve çimento sanayi emisyonlarını azaltmak için kullanılan tekniklerden biri, çimento ürünlerinin klinker içeriğini azaltmaktır. Bu azaltma, öğütme aşamasında klinker miktarını azaltıp kum, cüruf, kireçtaşı, uçucu kül ve puzolan gibi dolgu maddelerini ve ilave maddeleri eklemek suretiyle yapılır. Enerji kullanımının azaltılması, emisyonların azaltılmasını, doğal kaynak tasarrufunu, düzenli depolama sahalarında atık depolanmasının önlenmesine katkı sağlar.

Mevcut en iyi teknoloji, çimentonun ve çimento ürünlerinin klinker içeriğini azaltmayı dikkate almak suretiyle birincil enerji tüketiminin azaltılmasıdır [26].

4.2.3. Proses Seçimi

Çimento üretiminde seçilecek proses, tüm kirletici emisyonlarını etkilemekte ve enerji kullanımı üzerinde etkili olmaktadır. Yeni tesis kurulumu veya büyük çaptaki tesis yenilemeleri için çok kademeli ön ısıtmalı ve ön kalsinatörlü kuru proses fırını son teknoloji olarak kabul edilir. Dünyada faaliyet gösteren yaş proses fırınları ile yarı kuru ve yarı yaş proses fırınlarının yenilendikleri zaman genellikle kuru prosese dönüştürülmeleri beklenmektedir. Kuru prosesin kullanılması, enerji tüketiminin azaltılmasını ve kaynakların tasarrufu ile emisyon ve atıkların azaltılmasını sağlar.

Mevcut en iyi teknoloji, yeni tesisler ve büyük çaplı iyileştirmeler için, çok kademeli ön ısıtma ve ön kalsinasyonlu kuru proses fırını kullanılmasıdır [26].

4.2.3.1. Fırınlar ve Soğutuculardan/Kojenerasyondan Enerji Geri Kazanma

Buhar ve elektrik için kojenerasyon tesislerinin kullanılması, prensip olarak çimento üretiminde uygulanmaktadır. Bu durum uzun zamandan beri süregelen eşzamanlı ısı ve elektrik ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Klinker soğutuculardan veya fırından çıkan gazlardan geri kazanılan fazla ısı bölgesel ısıtma için kullanılmaktadır. Fazla ısı ağırlıklı olarak klinker soğutucusundan ve soğutucudan daha az oranda döner fırından çıkan gazlardan geri kazanılır. Fazla ısının prosesden geri kazanılması, enerji maliyetleri bağımsızlığının artması ve CO₂ emisyonlarının azalmasını sağlar. Ayrıca kaynakların tasarrufu da emisyonların azaltılmasına yardımcı olur. Bu teknoloji prensip olarak, yeterli ısı fazlası olduğu ve uygun proses parametreleri karşılanabildiği takdirde tüm çimento fabrikalarına uygulanabilir. Yerel koşullar ve maliyetle ilgili hususlar da göz önünde bulundurulmalıdır.

Mevcut en iyi teknoloji, ekonomik açıdan uygulanabilir olduğu takdirde, kojenerasyon/kombine ısı ve elektrik santrallerini düşünmek suretiyle birincil enerji tüketiminin azaltılmasıdır [26]. Bu bağlamda “Enerji Verimliliği İçin Mevcut En İyi Teknikler” referans dokümanına da bakılmalıdır.

4.2.4. Genel Teknikler

4.2.4.1. Proses Kontrol Optimizasyonu

Klinker pişirme prosesinin optimizasyonu genellikle proses parametrelerini dengelemek suretiyle ısı tüketimini azaltmak, klinkerin kalitesini ve ekipmanın kullanım ömrünü arttırmak amacıyla yapılır. NO_x , SO_2 ve toz gibi emisyonların azaltılması bu optimizasyonun ikincil etkileridir. Fırının proses parametrelerinin tasarım değerlerine yakın ve istikrarlı bir şekilde çalıştırılması tüm fırın emisyonları için faydalıdır. Optimizasyon, hammaddenin homojenizasyonu, optimum miktarda kömür dozajlamanın sağlanması ve soğutucu faaliyetlerinin iyileştirilmesi gibi önlemleri/teknikleri kapsar. Katı yakıt besleme oranının sabit olmasını sağlamak için besleme bunkerlerinin, taşıma konveyörlerinin ve besleyicilerin iyi bir tasarıma sahip olmaları şarttır. Bu teknoloji, tüm fırınlara uygulanabilir ve fırın operatörlerinin eğitiminden dozaj sistemleri, homojenizasyon siloları, ön harmanlama yatakları ve yeni klinker soğutucuları gibi yeni ekipmanların montajına kadar değişen birçok unsur içerebilir. Proses kontrol optimizasyonunun SO_2 emisyonları üzerindeki etkisi uzun yaş ve uzun kuru fırınlarda yüksek, ön ısıtıcılı fırınlarda ise çok düşüktür.

Mevcut en iyi teknoloji, aşağıda bulunan önlemleri/teknikleri uygulamak suretiyle tüm fırın emisyonları ve enerji kullanımı açısından yararlı olan proses parametre ayarlama noktalarına mümkün olduğu kadar yakın çalışarak düzgün ve istikrarlı bir fırın prosesi elde edilmesidir [26]:

- Bilgisayar destekli otomatik kontrol dahil olmak üzere proses kontrolünün optimizasyonu
- Modern gravimetrik katı yakıt besleme sistemlerinin kullanılması
- Yakıt ve hammadde seçimi

Döner fırına giren tüm maddelerin dikkatlice seçilmesi ve kontrolü emisyonların azalmasına katkı sağlayabilir. Örneğin hammaddelerin ve yakıtların sülfür içeriklerini kısıtlamak SO_2 salınımlarını azaltabilir. Bu durum, azot, metaller ve organik bileşikler -HCl ve HF- gibi diğer maddeleri içeren hammaddeler ve yakıtlar için de geçerlidir. Ancak değişik fırın sistemleri ve besleme noktaları arasında bazı farklılıklar olabilmektedir. Prosese giren malzemelerin klor içeriğini kısıtlamak, fırın koşullarını olumsuz etkileyen ve toz emisyonlarının artmasına yol açacak şekilde

elektrostatik çökelticilerin performansını bozan alkalın kloridlerin oluşumunu azaltır. Ayrıca düşük alkali malzeme kullanılması durumunda, tozun prosese geri döndürülmesi ve böylece prosesin oluşturduğu atığın azaltılması sağlanmış olur.

Alternatif, farklı tür atıklar, konvansiyonel yakıtların ve hammaddelerin yerini alabilir. Ancak, bu atıkların belirli özellikleri ve parametreleri üzerinde dikkatli bir kalite kontrolü yapılması gereklidir. Uygun bir kalorifik değeri, düşük nem ve kirletici içeriği olan atıklar, proseste yakıt olarak kullanılarak fosil yakıtlardan tasarruf edilmesini sağlayabilir. Hammadde olarak kullanılan ve VOC, halojenli bileşikler ve cıva içeren atıklar özellikle emisyonlar açısından sorun yaratabilir. Yakıtların ve hammaddelerin dikkatli bir şekilde seçilmesi emisyonu yol açan maddelerin girişini sınırlandırabilir. Atık yakıtların kullanılması fosil yakıtlardan tasarruf edilmesini sağlar ve atıkların depolama sahalarında bertarafını azaltabilir. Fırın sistemi içine uçucu metal içeriği yüksek olan malzemeleri beslemekten kaçınılmalıdır. Ayrıca malzemelerdeki cıva içeriği asgariye indirilmelidir. Hatta bazı durumlarda fırın sisteminin içine cıva girişinin sınırlandırılması gerekebilir. Mevcut en iyi teknoloji, emisyonların önlenmesi ve/veya azaltılması için fırına giren tüm maddelerin dikkatlice seçilmesi ve kontrol edilmesidir [26].

4.2.4.2. Atıkların Hammadde Olarak Kullanılması

Atıkların klinker pişirme prosesinde hammadde olarak kullanımı, bunların nispeten büyük miktarlardaki hammaddelerin yerini almasını sağlayabilir. Klinker üretiminde hammadde olarak kullanılan atıkların miktarları günümüzde giderek artmaktadır. Ancak, bu atık hammaddeler klinker pişirme prosesi için gerekli olan özellikleri, kimyasal elementleri ve bileşenleri içermek ve karşılamak zorundadır. Bu atık malzemelerin sürecin emisyon davranışı ve emisyonlar üzerinde etkileri olabilir. 2003 ve 2004 yıllarında bazı Avrupa Birliği ülkelerinin çimento üretiminde hammadde olarak kullanılan ve kimyasal elementleri ile nitelendirilen atıkların tüketim listesi Çizelge 4.2’de verilmiştir [26].

Çizelge 4.2 Bazı Avrupa Birliği ülkelerinde hammadde olarak kullanılan atıklar

İstenilen (Birincil) Kimyasal elementler	Atık örnekleri	2003 (milyon ton)	2004 (milyon ton)
Si	Döküm kumu	1.52	1.50
Ca	Endüstriyel kireç	2.20	2.44
Fe	Pirit cürufu	3.29	3.37
Al	-	0.71	0.69
Si-Al-Ca-Fe	Uçucu kül	3.37	3.78
Toprak	-	0.45	0.50
S grubu	Sanayi yan ürünü	-	-
F grubu	CaF ₂	-	-
Diğerleri	-	1.56	1.71
Toplam	-	13.10	13.89

Mevcut en iyi teknoloji:

- Atıkların özelliklerini garanti altına almak ve çimento fırınında hammadde ve/veya yakıt olarak kullanılacak atıkları aşağıda belirtilenler açısından analiz etmek için kalite güvence sisteminin uygulanmasıdır.
- Çimento fırınında hammadde ve/veya yakıt olarak kullanılacak herhangi bir atığın klor, ilgili metaller, kükürt, toplam halojen içeriği gibi ilgili parametrelerinin miktarının kontrol edilmesidir.
- Her atık yükü için kalite güvence sistemlerinin uygulanmasıdır [26].

4.2.4.3. Atıkların Yakıt Olarak Kullanılması

Yeterli kalorifik değere sahip olacak şekilde seçilen atıklar, belirli spesifikasyonları ve karakteristik özellikleri karşıladıkları takdirde çimento fırınında kömür gibi fosil yakıtların yerine yakıt olarak kullanılabilir. Genellikle, bu atıklar klinker pişirme prosesi için özel olarak hazırlanarak bazı ön arıtma işlemlerinden sonra kullanılırlar. Fiziksel ve kimyasal birtakım kriterler fırının çalışması ve emisyonlar üzerinde etkili olabilecek olan atık yakıtların seçiminde belirleyici bir rol oynarlar.

Yakıt olarak kullanılacak olan atıkların özelliklerini garanti etmek için bir kalite güvence sisteminin olması gereklidir. Bu sistem özellikle numune alma, numune hazırlama, numune analizleri ve dış izleme ile ilgili hükümler içerir. Tehlikeli atıkların

kullanımı ile ilgili olarak, örneğin depolama, besleme gibi işlemler sırasında güvenlik yönetimi dikkate alınmalıdır. Ayrıca, ön arıtmaya tabi tutulmuş ve tasnif edilmiş atık fraksiyonlarından elde edilen atık yakıtların kullanımı sırasında kendi kendine tutuşma potansiyeli olan malzemeler için ayrıca güvenlik yönetimleri düşünülmelidir.

Farklı tür atık yakıtların nem, kalorifik değer gibi özellikleri klinker için gerekli olan özgül enerji tüketimini etkileyebilir. Örneğin; düşük kalorifik değer ve yüksek nem içeriği, ton klinker başına gerekli olan özgül enerji tüketiminin artmasına neden olabilir. Aynı enerji ihtiyacını elde etmek için kullanılan daha düşük kalorifik değeri olan atık yakıtların miktarı konvansiyonel yakıtlar ile kıyaslandığında daha fazladır. Fosil yakıtların kullanımı ile karşılaştırıldığında atık yakıtların kullanımı işletme maliyetlerini azaltabilir. Enerji kullanımı genellikle üretim maliyetlerinin %30-40'ını oluşturur. Bu nedenle yakıt maliyetleri çimento üretim maliyetlerinin önemli bir bölümünü oluşturur. Yerel koşullarına ve türlerine göre değişmelerine rağmen atık yakıtlar konvansiyonel fosil yakıtlardan daha ucuz olabilir. Ancak, atık yakıtlar çoğu kez ön işleme tabi tutulmalı ve çimento fırınında kullanılmaları için yeterli homojenliğe getirilmelidir. Bu durum ilave masraflara yol açmaktadır. Çizelge 4.3'te bazı Avrupa Birliği ülkelerinde yakıt olarak kullanılan değişik tür atıkların kalorifik değerleri gösterilmektedir [26].

Çizelge 4.3 Avrupa Birliği ülkelerinde kullanılan bazı atıkların kalorifik değerleri

Atık yakıt türleri	Kalorifik değer (MJ/kg)
Odun	~16
Kâğıt/karton	3-16
Tekstil	Max 40
Plastik	17-40
İşlenmiş fraksiyonlar (örneğin; RDF)	14-25
Kauçuk/lastikler	~26
Endüstriyel çamur	8-14
Kentsel kanalizasyon çamuru	12-16
Hayvan atıkları, katı yağlar	14-18, 27-32
Kömür/karbon atığı	14-21,5
Zirai atıklar	20-30
Katı atıklar (emprenye edilmiş talaş)	14-28
Solventler ve ilgili atıklar	20-36
Sıvı yağlar ve yağlı atıklar	25-36
Kanalizasyon çamuru nem oranı > 10%	3-8
Kanalizasyon çamuru nem oranı < 0-10%	8-13
Bitümlü şist bazı yakıt karışımları (85-90%)	9,5

Mevcut en iyi teknoloji, tehlikeli atık maddelerin elleçlenmesi, örneğin depolanması ve/veya beslenmesi için atığın etiketlenmesi, muayenesi, numunelerin alınması ve test edilmesi amacıyla atığın kaynağına ve türüne göre riske dayalı yaklaşım kullanmak suretiyle güvenlik yönetiminin uygulanmasıdır [26].

4.3. Sektörün Çevre Mevzuatı Açısından Değerlendirilmesi

Çevre mevzuatı emisyonlar açısından çimento sanayini de ilgilendiren yönetmelikler aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği,
- Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik,
- Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği,
- Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik,

- Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmelik.

Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği

03.07.2009 tarih ve 27277 sayılı resmi gazetede yayımlanan “Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü” yönetmeliğinin amacı; sanayi ve enerji üretim tesislerinin faaliyeti sonucu atmosfere yayılan is, duman, toz, gaz, buhar ve aerosol halindeki emisyonları kontrol altına almak; insanı ve çevresini hava alıcı ortamındaki kirlenmelerden doğacak tehlikelerden korumak; hava kirlenmeleri sebebiyle çevrede ortaya çıkan umuma ve komşuluk münasebetlerine önemli zararlar veren olumsuz etkileri gidermek ve bu etkilerin ortaya çıkmamasını sağlamaktır.

Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik

06.10.2010 tarih ve 27721 sayılı resmi gazetede yayımlanan “Atıkların Yakılmasına İlişkin” yönetmeliğinin amacı; atıkların yakılmasının çevre üzerine olabilecek olumsuz etkilerini, özellikle hava, toprak, yüzey suları ve yeraltı sularında emisyonlar sonucu oluşan kirliliği ve insan sağlığı için ortaya çıkabilecek riskleri uygulanabilir yöntemlerle önlemek ve sınırlandırmaktır.

Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği

06.06.2008 tarih ve 26898 sayılı resmi gazetede yayımlanan “Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi” yönetmeliğinin amacı; hava kirliliğinin çevre ve insan sağlığı üzerindeki zararlı etkilerini önlemek veya azaltmak için hava kalitesi hedeflerini tanımlamak ve oluşturmak, tanımlanmış metotları ve kriterleri esas alarak hava kalitesini değerlendirmek, hava kalitesinin iyi olduğu yerlerde mevcut durumu korumak ve diğer durumlarda iyileştirmek, hava kalitesi ile ilgili yeterli bilgi toplamak ve uyarı eşikleri aracılığı ile halkın bilgilendirilmesini sağlamaktır.

Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmelik

29.04.2009 tarih ve 27214 sayılı resmi gazetede yayımlanan “Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar” hakkında yönetmeliğin amacı, Ek-1 ve Ek-2 listesinde yer alan faaliyet ve tesisler tarafından 2872 sayılı Çevre Kanununa göre alınması gereken izin ve lisanslara ilişkin tüm iş ve işlemler ile bu iş ve işlemlere ilişkin yetkili mercilerin, çevre yönetim birimlerinin ve çevre görevlilerinin görev ve

sorumlulukları ile Bakanlıkça yetkilendirilmiş çevre danışmanlık firmalarının, işletmelerin ve işletmecilerin yükümlülüklerini belirlemektir.

Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik

25.04.2012 tarih ve 27274 sayılı resmi gazetede yayımlanan “Sera Gazı Emisyonlarının Takibi” hakkında yönetmeliğin amacı; yönetmelikte yer alan faaliyetlerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının izlenmesine, doğrulanmasına ve raporlanmasına dair usul ve esasları düzenlemektir.

Bu Yönetmeliğin;

- 6. maddesinde yer alan izleme yükümlülüğü 1.1.2015 tarihinde,
- 7. maddesinde yer alan raporlama yükümlülüğü 1.1.2016 tarihinde,
- Diğer maddeleri yayımı tarihinde yürürlüğe girecektir.

5. ÇİMENTO ÜRETİMİ SERA GAZI EMİSYON HESAPLAMALARI

Ülkelerin sektörel sera gazı emisyon envanterlerinin çıkarılmasında, karbon piyasalarında €/ton CO₂ fiyatının belirlenmesinde ve emisyon ticareti anlaşmalarında değişik metodolojilere göre belirlenmiş ülke emisyon faktörleri kullanılmaktadır. Bu metodolojilerin başlıcaları, IPCC, WBCSD ve EPA AP-42 metodolojileridir. Yine bu metodolojiler kullanılarak emisyon faktörleri belirlenmemiş ülkelerde IPCC, WBCSD ve EPA tarafından belirlenmiş emisyon faktörleri kullanılarak çimento fabrikaları, petrol rafinerileri, termik santraller vb. için sera gazı emisyon envanterleri çıkarılabilmektedir.

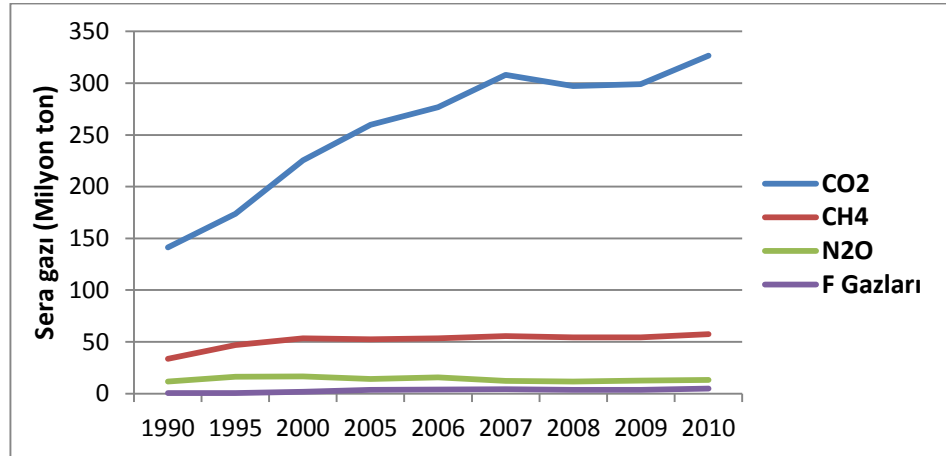
Ülkemize ait emisyon envanteri en son 2010 yılına ait olup bu envanter TÜİK tarafından 2012 yılında yayınlanmıştır. Ulusal sera gazı emisyonları, 2006 IPCC Kılavuzu kullanılarak hesaplanmıştır. Emisyon envanteri, enerji, endüstriyel işlemler, solvent ve diğer ürün kullanımı, tarımsal faaliyetler ve atıktan kaynaklanan, doğrudan sera gazları olan CO₂, CH₄, N₂O ve F-gazları ile dolaylı sera gazları olan NO_x, NMVOC ve CO emisyonlarını kapsamaktadır. Arazi kullanımı ve arazi kullanım değişikliğinden kaynaklanan emisyonlar ve yutaklar hesaplamalara dahil edilmemiştir. Çizelge 5.1’de 1990-2010 yılları arası ülkemizdeki sera gazı emisyonları milyon ton CO₂ eşdeğeri olarak gösterilmektedir [46].

Çizelge 5.1 Sera gazı emisyonları, 1990 - 2010

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	F Gazları	Toplam
1990	141,36	33,50	11,57	0,60	187,03
1995	173,90	46,87	16,22	0,52	237,51
2000	225,43	53,30	16,62	1,66	297,01
2005	259,61	52,38	14,18	3,73	329,90
2006	276,72	53,33	15,55	4,05	349,64
2007	307,92	55,58	12,35	4,13	379,98
2008	297,12	54,29	11,57	3,51	366,50
2009	299,11	54,37	12,53	3,64	369,65
2010	326,47	57,54	13,03	4,89	401,92

Not. Arazi kullanımı ve arazi kullanım değişikliğinden kaynaklanan emisyonlar ve yutaklar dâhil değildir.

Envanter sonuçlarına göre, 2010 yılında toplam sera gazı emisyonu CO₂ eşdeğeri olarak 401,9 milyon ton olarak hesaplanmıştır. 2010 yılı sera gazı emisyonlarında CO₂ eşdeğeri olarak en büyük payı %71 ile enerji kaynaklı emisyonlar oluştururken, ikinci sırayı %13 ile endüstriyel işlemler almaktadır. Atık %9, tarımsal faaliyetler ise %7 paya sahiptir [46]. Şekil 5.1’de ülkemizin 1990-2010 yılları arasında CO₂, CH₄, N₂O ve F gazlarının artış eğilimleri gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde, en fazla artış göstermekte olan gazın CO₂ olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 5.1 Ülkemizin 1990-2010 yılları arasındaki sera gazı artış eğilimleri

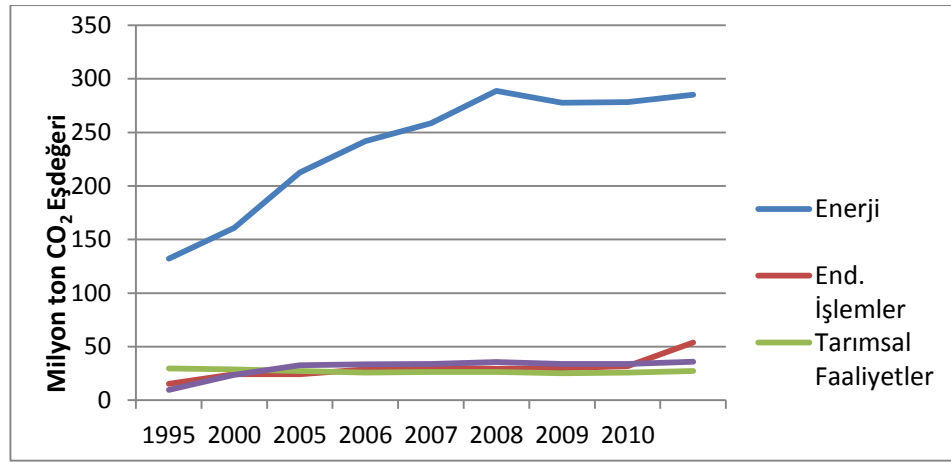
Çizelge 5.2’de 1990-2010 yılları arasında sektörlere göre sera gazı emisyonları (milyon ton CO₂ eşdeğeri) gösterilmektedir.

Çizelge 5.2 Toplam sera gazı emisyonları, 1990 - 2010

Yıllar	Enerji	Endüstriyel İşlemler	Tarımsal Faaliyetler	Atık	Toplam	1990 yılına göre artış oranı (%)
1990	132,13	15,44	29,78	9,68	187,03	-
1995	160,79	24,21	28,68	23,83	237,51	26,99
2000	212,55	24,37	27,37	32,72	297,01	58,80
2005	241,75	28,78	25,84	33,52	329,90	76,39
2006	258,56	30,70	26,50	33,88	349,64	86,95
2007	288,69	29,26	26,31	35,71	379,98	103,16
2008	277,71	29,83	25,04	33,92	366,50	95,96
2009	278,33	31,69	25,70	33,93	369,65	97,64
2010	285,07	53,90	27,13	35,83	401,92	114,90

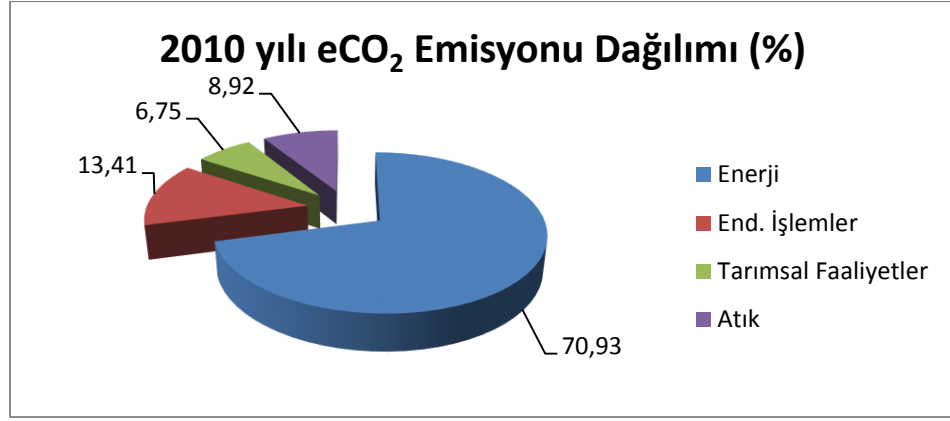
Çizelge 5.2 incelendiğinde, CO₂ eşdeğeri olarak 2010 yılı toplam sera gazı emisyonunun 1990 yılına göre %115 artış gösterdiği görülmektedir. 2010 yılında kişi başı CO₂ eşdeğer emisyonu 5,51 ton/kişi olarak hesaplanmış olup, bu değer 1990 yılında 3,39 ton/kişidir. Sektörel açıdan bakıldığında, sera gazı emisyonlarının en fazla enerji sektöründen kaynaklandığı görülmektedir fakat 2010 yılında en fazla artış endüstriyel işlemlerde olmuştur [46].

Şekil 5.2’de 1990-2010 yılları arasında enerji, endüstriyel işlemler, tarımsal faaliyetler ve atıklara ait sera gazı emisyonlarının eğilimi gösterilmektedir [46].



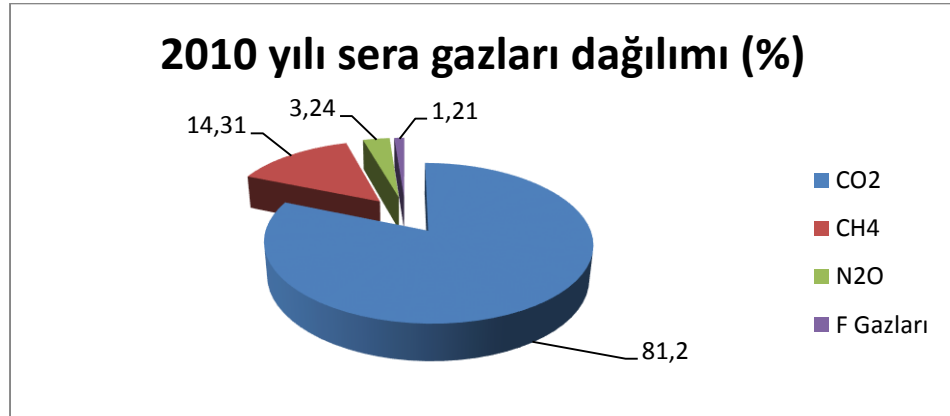
Şekil 5.2 Sektörlere göre sera gazı emisyonları, 1990-2010

2010 yılında toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %85’i enerji, %15’i ise endüstriyel işlemlerden kaynaklanmıştır. Toplam eşdeğer CO₂ emisyonlarının ise yaklaşık %71’i enerji, %13,41’i ise endüstriyel işlemlerden kaynaklanmaktadır. Şekil 5.3’te ise 2010 yılı eşdeğer CO₂ emisyonu dağılımı gösterilmektedir [46].



Şekil 5.3 Eşdeğer CO₂ emisyonu dağılımı (%), 2010

Şekil 5.4'te 2010 yılında ülkemizdeki CO₂, CH₄ ve N₂O ve F gazlarının dağılımları gösterilmektedir. CO₂ emisyonları, toplam sera gazı emisyonlarının %81,2'lik kısmını oluşturmaktadır. CO₂ emisyonlarını, sırasıyla %14,31 ile CH₄, %3,24 ile N₂O ve %1,21 ile F gazları takip etmektedir [46].



Şekil 5.4 Ülkemizdeki sera gazları dağılımı, 2010

Çizelge 5.3'te 1990-2010 yılları arasındaki doğrudan sera gazlarının sektörel dağılımı gösterilmektedir. Çizelge 5.3 incelendiğinde 2010 yılında toplam enerji kaynaklı CO₂ emisyonunun %41'inin çevrim ve enerji sektöründen kaynaklandığı, %20'sinin sanayiden, %16'sının ulaştırma sektörü, %23'ünün ise diğer sektörlerden kaynaklandığı görülmektedir. Ayrıca, çimento üretiminden kaynaklı CO₂ emisyonlarının toplam CO₂ emisyonları içerisindeki payının 1990 yılında % 7,45 iken 2010 yılında %8,86 'ya yükseldiği görülmektedir [46].

Çizelge 5.3 Doğrudan sera gazlarının sektörel dağılımı, 1990-2010

SERAGAZI KAYNAKLARI	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Enerji	126.701,07	155.347,30	207.054,44	236.355,33	253.150,17	282.833,96	270.862,11	271.109,03	277.452,67
A. Yakıt Yanması	126.701,07	155.347,30	207.054,44	236.355,33	253.150,17	282.833,96	270.862,11	271.109,03	277.315,57
1. Çevrim ve Enerji Sektörü	34.014,69	47.314,12	76.779,72	88.556,87	90.602,20	106.602,75	105.940,85	102.516,14	112.405,81
a. Elektrik Üretimi	30.325,45	43.750,17	72.089,38	83.679,69	85.311,75	100.661,51	101.473,20	96.286,35	106.823,96
b. Petrol Rafinerileri	3.689,24	3.563,95	4.690,34	4.877,17	5.290,45	5.941,24	4.467,65	6.229,79	5.581,85
2. Sanayi Sektörü	37.530,74	41.982,33	59.874,86	67.406,33	77.232,58	80.374,14	55.973,17	55.097,39	56.847,80
a. Demir Çelik	9.402,02	9.652,41	10.087,73	9.629,28	9.385,62	10.337,56	12.769,35	12.663,30	6.860,89
b. Demir Harici Madenler	1.010,62	1.663,38	1.953,72	2.369,23	2.728,15	9.957,46	265,20	1.144,63	1.413,81
c. Kimyasallar	2.513,68	2.767,62	3.152,32	4.352,26	4.433,33	2.410,85	492,45	1.382,08	3.094,09
d. Diğer	24.604,42	27.898,92	44.681,09	51.055,56	60.685,49	57.668,27	42.446,16	39.907,39	45.479,01
3. Ulaştırma	25.954,63	32.830,43	34.968,90	40.525,92	43.738,06	51.010,66	47.048,07	46.707,15	44.447,15
a. Havacılık	904,59	2.709,58	3.058,29	4.054,36	4.534,42	6.063,69	5.180,76	5.104,18	2.998,60
b. Karayolu	24.035,93	28.792,36	30.822,24	34.517,38	37.081,73	42.934,09	39.882,43	39.535,80	39.302,69
c. Demiryolu	516,65	618,47	477,72	676,75	682,23	424,12	450,30	437,19	466,53
d. Denizcilik	497,47	710,02	610,65	1.277,43	1.439,67	1.588,76	1.534,59	1.629,98	1.679,33
4. Diğer Sektörler	29.201,00	33.220,43	35.430,96	39.866,22	41.577,33	44.846,42	61.900,02	66.788,34	63.614,81
a. Konut	23.405,61	25.848,03	26.891,55	30.639,47	31.667,43	34.051,06	48.223,92	53.380,06	50.474,54
b. Tarım/Orman/Balıkçılık	5.795,38	7.372,41	8.539,41	9.226,75	9.909,91	10.795,35	13.676,10	13.408,29	13.140,27

B. Kaçak Emisyonlar	...	...	...	...	...	...	...	...	137,09
1. Petrol ve Doğalgaz	...	...	...	...	...	...	...	...	137,09
Endüstriyel İşlemler	14.661,34	18.552,66	18.377,83	23.250,15	23.566,26	25.081,67	26.261,83	27.997,04	49.019,70
1. Mineral Ürünleri	13.726,00	17.477,77	18.114,49	22.549,22	23.279,83	25.081,67	26.261,83	27.997,04	31.740,11
a. Çimento Üretimi	10.534,87	14.094,30	15.059,97	18.925,90	19.870,45	21.632,64	23.269,35	25.494,43	28.923,12
b. Kireç Üretimi, Kireçtaşı ve Dolomit Kullanımı	3.084,82	3.250,10	2.826,66	3.290,75	3.409,38	3.449,03	2.992,48	2.502,60	2.816,99
c. Sodyum Karbonat Üretimi ve Kullanımı	106,30	133,37	227,86	332,57	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
2. Kimya Endüstrisi	825,72	964,17	152,64	592,93	178,42	(*)	(*)	(*)	(*)
a. Amonyak Üretimi	713,47	937,02	104,01	592,93	178,42	(*)	(*)	(*)	(*)
b. Karpit Üretimi	112,25	27,14	48,63	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
3. Metal Üretimi	109,62	110,72	110,70	108,00	108,01	(*)	(*)	(*)	17.279,59
a. Alüminyum Üretimi	109,62	110,72	110,70	108,00	108,01	(*)	(*)	(*)	(*)
b. Demir-çelik Üretimi	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	17.279,59
Toplam	141.362,41	173.899,96	225.432,27	259.605,48	276.716,43	307.915,64	297.123,94	299.106,06	326.472,37

(*) 5429 sayılı Kanun gereği gizlilik ilkesine göre istatistiki birim sayısı üçten az olduğu için birimlere ilişkin bilgiler verilememiştir.

(1) Enerji başlığı sanayi sektörü emisyonları altında kapsamıştır.

... Bilgi elde edilememiştir.

Yukarıdaki tabloda, çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları yalnızca proses kaynaklı emisyonlar olarak ifade edilmektedir.

Emisyon Hesaplamalarında Kullanılan Metodolojiler

1. 2006 IPCC Guidelines for National GHG Inventories
2. World Resources Institute/World Business Council for Sustainable Development (WRI/WBCSD) Cement Sustainability Initiative
3. EPA Climate Leaders
4. California's Global Warming Solutions Act under Assembly Bill No.32
5. California Climate Action Registry
6. DOE/EIA's Voluntary Reporting of Greenhouse Gases Program under Section 1605(b) of the Energy Policy Act of 1992
7. European Union Emission Trading System (EU ETS)
8. New Mexico's Mandatory Reporting Program ve
9. The Climate Registry.

Bu metodolojilerin birçoğu, farklı esnekliklerle birlikte IPCC Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 yaklaşımlarını uygulamaktadır [47]. IPCC Kılavuzu, farklı Tier yaklaşımlarıyla çimento üretiminden kaynaklanan emisyonları hesaplamayı tavsiye etmektedir.

Literatür araştırmaları sonucu özenli bilimsel analizlere dayandığı, kapsamlı ve güvenilir sonuçlar belirlendiğinden [12] bu çalışmada, sera gazı emisyonu hesaplamalarında "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" ve "CSI Cement CO₂ and Energy Protocol" kılavuzları kullanılmıştır.

6. IPCC 2006 METODOLOJİSİ

1992 yılında Rio de Janeiro’da 150 civarında ülke tarafından imzalanan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) ile küresel olarak çevreye ve ekonomik gelişmelere karşı temel tehlikenin iklim değişikliği olduğu kabul edilmiştir. Sözleşme temel olarak, insan etkisi sonucunda oluşan sera gazları ile iklim sisteminde oluşacak zarar azaltmayı amaçlamaktadır. Sözleşmede ayrıca bütün taraflara; periyodik olarak ulusal envanterlerinin geliştirilmesi, yenilenmesi, yayınlanması ve sera gazı emisyon envanterlerinde kıyaslamalı metodolojiler kullanılması konularında çağrıda bulunmaktadır.

2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006 IPCC Kılavuzu), UNFCCC tarafından yapılan teklif üzerine 1996 IPCC Kılavuzunu tekrar revize etmek amacıyla hazırlanmıştır. Kılavuzda geçen sera gazları:

- Karbon dioksit (CO₂)
- Metan (CH₄)
- Diazot monoksit (N₂O)
- Hidrofloro karbonlar (HFCs)
- Perfloro karbonlar (PFCs)
- Sülfür heksaflorid (SF₆)
- Nitrojen triflorid (NF₃)
- Triflorometil sülfürpentaflorid (SF₅CF₃)
- Halojenleştirilmiş esterler (C₄F₉OC₂H₅, CHF₂OCF₂OC₂F₄OCHF₂, CHF₂OCF₂OCHF₂) ve
- Montreal Protokolüne yer almayan diğer halokarbonlardır. Bu gazların tümü küresel ısıdırma potansiyeli (GWP) olan gazlardır [48].

Diğer gazlar ise, NO_x, amonyak (NH₃), NMVOC, CO ve SO₂’tir. 2006 IPCC Kılavuzunda, bu gazlara ait emisyonların hesaplama metodları bulunmamaktadır. 2006 IPCC Kılavuzu, 5 bölümden oluşmaktadır:

1. Bölüm: Temel Esaslar ve Raporlama
2. Bölüm: Enerji
3. Bölüm: Endüstriyel Prosesler ve Ürün Kullanımı (IPPU)

4. Bölüm: Tarım, Ormancılık ve Diğer Arazi Kullanımı (AFOLU)
5. Bölüm: Atıklar

Bu çalışmada çimento üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonu hesaplamalarında;

- Prosesten kaynaklı emisyonlar hesaplanırken, IPCC 2006 Kılavuzunda, 3. Bölümde bulunan “Mineral Production” başlığı altındaki “Cement Production” kısmından faydalanılmıştır.
- Yakıtların yanmasından kaynaklı emisyonlar hesaplanırken, IPCC 2006 Kılavuzunda, 2. Bölümde bulunan “Stationary Combustion” kısmından ve IEA tarafından 2010 yılında yayınlanmış olan “CO₂ Emissions From Fuel Combustion”dan faydalanılmıştır.
- Transportasyondan kaynaklı emisyonlar hesaplanırken, IPCC 2006 Kılavuzunda, 2. Bölümde bulunan “Mobile Combustion” kısmından faydalanılmıştır.
- Elektrik tüketiminden kaynaklı emisyonlar hesaplanırken, WBCSD&CSI tarafından 2005 yılında yayınlanmış olan “The Cement CO₂ Protocol, Version 2”den faydalanılmıştır.

Emisyonlar, “Tier” şeklinde ifade edilen çeşitli seviyede yaklaşımlarla hesaplanmaktadır. Burada seviyeyi belirleyen verilerin detaylı olup olmadığıdır. Tier 1 yaklaşımı genel olarak daha az veri içeren basit bir yaklaşımdır, Tier 3 yaklaşımı ise daha karmaşık olan ve uzmanlık gerektiren bir yaklaşımdır. Bu çalışmada, ülkemizde çimento sektörüne ait çok detaylı bilgi olmadığından Tier 1 ve Tier 2 yaklaşımları kullanılmıştır.

6.1. IPCC 2006 Çimento Üretimi Sera Gazı Emisyon Hesaplamaları

Çimento üretimi, CO₂ emisyonu bakımından IPCC İyi Uygulama Kılavuzu’nda bir anahtar kategori olarak belirlenmiştir. Çimento üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonları temel olarak doğrudan ve dolaylı emisyonlar olarak ikiye ayrılabilir. Doğrudan emisyonlar, daha öncede belirtildiği gibi, kalsinasyondan ve yakıt tüketiminden kaynaklanan emisyonlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Dolaylı emisyonlar

ise, elektrik tüketiminden ve transportasyondan kaynaklanan emisyonlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

6.1.1. Doğrudan Emisyonlar

6.1.1.1. Proses Kaynaklı Emisyonlar

Çimento üretiminde CO₂ en fazla, klinker üretimi esnasında kalsinasyon prosesinden açığa çıkar. Klinker üretimi sırasında, genellikle kalsiyum karbonat CaCO₃ olarak bilinen kireç taşı (kalker) CaO üretmek üzere ısıtılır veya kalsine edilir. Bu reaksiyondan CO₂ açığa çıkar. CaO, daha sonra, diğer hammaddelerdeki silikalar, alüminalar ve demir oksitler ile klinker minerallerini -genellikle kalsiyum silikatlar- üretmek üzere reaksiyona girer.

CaCO₃ dışındaki karbonatların hammadde içerisindeki oranı oldukça düşüktür. Diğer karbonatlar kalker içinde safsızlık olarak bulunmaktadır. Düşük miktarda MgO (magnezyum oksit) varlığı (genellikle %1-2) klinker üretim prosesinde tercih edilebilir fakat %1-2'den daha fazla MgO çimento için bazı problemlere neden olabilir [49]. Çimento, ithal klinkerden de elde edilebilir. Bu durumda procesten kaynaklı CO₂ emisyon miktarı sıfır kabul edilir. CO₂ emisyonlarını hesaplamak üzere Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 olmak üzere 3 farklı yaklaşım bulunmaktadır [48].

Tier 1 Yaklaşımı: Bu yaklaşımda, klinker üretimi miktarına çimento üretimi verileri kullanılarak ulaşılmaktadır. Hammadde girişindeki karbonat miktarı bilinmiyorsa veya ülkeye ait klinker üretimi bilgisi yok ise, klinker üretiminden kaynaklanan emisyon miktarı, üretilen çimento miktarı ve türleri, üretilen çimentonun klinker içeriği ve ithal/ihrac edilen klinker miktarı bilgisi ile hesaplanabilmektedir. Klinker için bir emisyon faktörü kullanılır. Tier 1 yaklaşımında, CO₂ emisyonları Eşitlik 6.1'deki şekilde hesaplanmaktadır.

$$CO_2 \text{ Emisyonu} = [\sum_i (M_{ci} \times C_{cli}) - Im + Ex] \times EF_{clc} \quad (6.1)$$

$CO_2 \text{ Emisyonu}$ = Çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ miktarı, ton CO₂

M_{ci} = Cinsine göre üretilen çimento miktarı, ton, i =tür

C_{cli} = Çimentonun cinsine göre klinker fraksiyonu

I_m = İhrac edilmiş olan çimentonun tüketim miktarı, ton

E_x = İthal edilen klinker miktarı, ton

EF_{cl} = Emisyon faktörü, ton CO_2 /ton klinker, (Varsayılan (Default) EF_{cl} , CKD için düzeltilmiştir.)

CKD (Cement Kiln Dust) = Döner fırına geri kazandırılan çimento tozu

Toz, klinker üretiminin farklı aşamalarında ve döner fırın boyunca çeşitli ekipmanlarda oluşabilir. Tozun kompozisyonu, hangi aşama ve ekipmanda üretildiğine göre değişiklik gösterebilir fakat bu tozun tamamına CKD (Cement Kiln Dust) denilebilir.

Tier 2 Yaklaşımı: Eğer çok detaylı veri yoksa veya çimento üretiminde kullanılan hammaddelerin ağırlık ve kompozisyonlarını içerecek veri tüm üretici tesislerden toplanamıyorsa, yani Tier 3 yaklaşımı kullanılamıyorsa CO_2 emisyonu miktarı; ülkeye özel klinker üretim verisi, klinkerin CaO içeriği ve bir emisyon faktörü kullanılarak Eşitlik 6.2'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$CO_2 \text{ Emisyonu} = M_{cl} \times EF_{cl} \times CF_{ckd} \quad (6.2)$$

CO_2 Emisyonu = Çimento üretiminden kaynaklanan CO_2 miktarı, ton CO_2

M_{cl} = Üretilen klinker miktarı, ton

EF_{cl} = Emisyon faktörü, ton CO_2 /ton klinker, (EF_{cl} , CKD için düzeltilmemiştir.)

CF_{ckd} = CKD için emisyon düzeltme faktörü

Tier 3 Yaklaşımı: Tier 3, klinker üretmek için kullanılan karbonatlı hammadde türlerinin miktarı ve içeriğine göre oluşturulmuş verilerin birleştirilmesiyle uygulanır. Tier 3 yaklaşımı, kalsine olmamış karbonatın döner fırına tekrar dönmediğini varsayar ve kalsine olmayan CKD'yi çıkartmak gerektiğin de hesaba kadar. Eğer CKD tamamen kalsine olmuşsa veya tamamı döner fırına geri döndürüldüyse, CKD düzeltme faktörü 0 olur.

Tier 3 yaklaşımı, her bir tesis için detaylı karbonatlı hammadde verisi bulunan ülkeler için uygun olan yaklaşımdır. Tesis seviyesinde toplanan emisyon verileri daha sonra ülke emisyonlarının tespit edilmesi için kullanılabilir. Tier 3 yaklaşımı ile CO_2 emisyonu miktarı, Eşitlik 6.3'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$CO_2 \text{ Emisyonu} = \underbrace{\sum_i (EF_i \times M_i \times F_i)}_{\text{Karbonattan kaynaklanan emisyonlar}} - \underbrace{M_d \times C_d \times (1 - F_d) \times EF_d}_{\text{Döner fırından geri kazandırılmayan CKD'den kaynaklanan emisyonlar}} + \underbrace{\sum_k (M_k \times X_k \times EF_k)}_{\text{Yakıt olmayan fakat karbon içeren diğer hammaddelerden kaynaklanan emisyonlar}} \quad (6.3)$$

$CO_2 \text{ Emisyonu}$ = Çimento üretiminden kaynaklanan CO_2 miktarı, ton CO_2

EF_i = Karbonat için kullanılan emisyon faktörü, ton CO_2 /ton karbonat, i = karbonat türü

M_i = Döner fırında tüketilen karbonat miktarı, ton

F_i = Karbonat için kalsinasyon fraksiyonu, i =karbonat türü

M_d = Döner fırından geri kazandırılmayan CKD miktarı, ton

C_d = Döner fırından geri kazandırılmayan CKD içerisindeki karbonatın ağırlık fraksiyonu

F_d = Döner fırından geri kazandırılmayan CKD'nin kalsinasyon fraksiyonu

EF_d = Döner fırından geri kazandırılmayan kalsine olmamış CKD'nin emisyon faktörü, ton CO_2 /ton karbonat

M_k = Yakıt olmayan fakat karbon içeren diğer hammaddelerin ağırlığı, ton, k = hammadde türü

X_k = Yakıt olmayan fakat karbon içeren diğer hammaddelerdeki toplam karbon fraksiyonu, k = hammadde türü

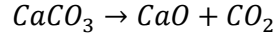
EF_k = Yakıt olmayan fakat karbon içeren diğer hammaddelerin emisyon faktörü, ton CO_2 /ton karbonat, k = hammadde türü

Literatür incelendikten sonra görülmektedir ki, Tier 3 yaklaşımı çok detaylı bilgi gerektiren bir yaklaşımdır. IPCC 2006, Türkiye gibi klinker üretim verisi bulunan ve daha detaylı üretim bilgisine sahip olmayan ülkeler için proses kaynaklı emisyonların hesaplanmasında Tier 2 yaklaşımını kullanmayı tavsiye etmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada proses kaynaklı CO_2 emisyonlarını hesaplamak için IPCC Tier 2 yaklaşımı kullanılmıştır.

Emisyon Faktörü Seçimi

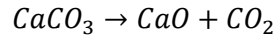
Emisyon faktörü seçiminde de metodoloji belirlenirken olduğu gibi üç farklı Tier yaklaşımı bulunmaktadır.

Tier 1 Yaklaşımı: Tier 1 yaklaşımında, klinkerin CaO içeriği %65 olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, CaO'in %100'ünün kalsiyum karbonat hammaddesinden kaynaklandığı kabul edilir. CKD düzeltme faktörü ise 1.02 kabul edilir.



Hem Tier 1, hem de Tier 2'de kullanılan emisyon faktörü (EF_{cl}), belirli sitokiyometrik oranlara dayanır. EF_{cl} 'nin nasıl hesaplandığı Eşitlik 6.4'te gösterilmektedir.

$$EF_{cl} = 0,785 \times \text{Klinkerin CaO içeriği (Ağırlık Fraksiyonu)} \quad (6.4)$$



Yukarıdaki reaksiyondaki 0,785 katsayısı CO_2/CaO 'in ağırlıkça oranından gelmektedir ($M_{CO_2}/M_{CaO} = 43,97/56,03 = 0,785$).

Yukarıda da belirtildiği gibi CaO'in tamamının $CaCO_3$ 'tan kaynaklandığı kabul edilmektedir. CaO içeriği ise ülkeden ülkeye değişebilmektedir. $CaCO_3$ 'ın ağırlıkça %56,03'ünü CaO, %43,97'sini CO_2 oluşturmaktadır. $CaCO_3$ 'ın CaO içeriği %65 kabul edilirse;

$$EF_{cl} = 0,785 \times 0,65 = 0,51 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton klinker}} \text{ dir.} \quad (6.5)$$

Bazı tesislerde, çimento fırın tozu (CKD), tekrar fırına beslenebilmektedir. Bu oranın yaklaşık %2 olduğu varsayılp, %2'lik CKD düzeltmesi yapılırsa, EF_{cl} değeri aşağıdaki Eşitlik 6.6'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$EF_{cl} = 0,51 \times 1,02 \text{ (CKD Düzeltme Faktörü)} = 0,52 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton klinker}} \quad (6.6)$$

Tier 1 yaklaşımında kullanılan EF_{cl} , CKD için bir düzeltme faktörü kullanılarak oluşturulmuştur. EF_{cl} , Tier 2 yaklaşımındaki emisyon faktörü EF_{cl} ile karıştırılmamalıdır. Tier 2 yaklaşımında, toplam CO_2 emisyonları hesaplanırken Eşitlik 6.2'deki gibi, EF_{cl} , CF_{ckd} düzeltme faktörü ile çarpılmaktadır [48].

Tier 2 Yaklaşımı:

Klinkere ait Emisyon Faktörünün Belirlenmesi (EF_{cl})

Tier 2 yaklaşımında, eğer klinkerin CaO yüzdesi biliniyor ve karbonatlı olmayan CaO kaynaklarına ulaşılabiliriyorsa, ülkeye özel bir emisyon faktörü belirlemekte fayda vardır. Klinkerin CaO içeriği genellikle %60-67 arasındadır.

Tier 1 yaklaşımında EF_{cl} hesaplanırken klinkerin CaO içeriğinin %65 olduğu, bu CaO'in tamamının $CaCO_3$ 'tan geldiği ve tamamının kalsine olduğu kabul edilmektedir. Eşitlik 6.4'te verilen EF_{cl} değeri, temel olarak 0,51 olarak kabul edilmiştir (CKD düzeltme faktörü ile çarpılmamış hali). Bu eşitlikte, klinkerin CaO içeriğinin %65 olduğu kabul edilmiştir. 0,51 değerinin nasıl hesaplandığı Tier 1 yaklaşımı anlatılırken gösterilmektedir. Buna benzer hesaplamalarla farklı klinker CaO içerikleri için EF_{cl} , Eşitlik 6.4'teki gibi hesaplanmaktadır.

Örneğin;

%60 CaO içeriği için $\rightarrow EF_{cl}=0,785 \times 0,60 = 0,471$

%67 CaO içeriği için $\rightarrow EF_{cl}=0,785 \times 0,67 = 0,525$ 'dir.

Eğer tesise ait karbonatlı olmayan hammadde kaynaklarından (demir cürufu, uçucu kül vb.) gelen önemli ölçüde CaO varsa, bu içerik toplam CaO içeriğinden çıkarılmalıdır. Ayrıca varsayılan (default) emisyon faktörü hesaplanırken MgO için bir düzeltme faktörü kullanılmamaktadır. Esasen karbonattan kaynaklanan her %1 oranında MgO için emisyon faktörü hesaplanırken, 0,011 ton CO_2 /ton klinker EF_{cl} 'ye eklenmelidir. MgO, karbonatlı olmayan bileşiklerden de kaynaklanabilir fakat portland çimentosu içeriğindeki MgO miktarı genellikle çok düşüktür. Bu nedenle, Tier 2 yaklaşımında, EF_{cl} hesaplanırken MgO için de bir düzeltme faktörü kullanılmasına gerek yoktur [48].

Çimento Fırını Tozları için Emisyon Düzeltme Faktörü (CF_{ckd})

CKD, hammaddelerden kaynaklanan çeşitli partiküllerden veya karbonatlı bileşiklerin tamamen kalsinasyona uğrayamamasından kaynaklanmaktadır. CKD, bazı toz kontrol teknolojileri tarafından tutulabilmekte ve döner fırına geri kazandırılabilir. Ayrıca, yanma havası içinde de fırına geri

gönderilebilmektedir. Fırına geri kazanılan CKD miktarı klinker veya çimentoda herhangi bir kalite problemine neden olabilmektedir. Bu nedenle CKD'nin kontrolü oldukça önemlidir.

CKD ile ilgili veriler, tesis bazında raporlamalar dışında zor bulunmaktadır. CKD'den kaynaklanan emisyonları hesaplayabilmek için varsayılan (default) bir değer belirlemek iyi bir uygulamadır. CKD'den kaynaklanan CO₂ emisyonu miktarı %1,5 civarında değişkenlik gösterir [50]. Veri temin edilemediği zaman, varsayılan CKD düzeltme faktörü (CF_{ckd}), 1,02 kabul edilir. (CO₂ emisyonlarına %2 civarında CKD'den gelen CO₂ eklenir.) Eğer sistemde kalsine olmuş CKD yok ise, CF_{ckd} düzeltme faktörü 1 kabul edilir [50]. WBCSD&CSI ise, CKD'nin yanında, tamamen kalsine olmuş bypass tozundan kaynaklanan emisyonları da toplam emisyon miktarına eklemektedir. Eğer ulaşılabilir veri varsa, bu emisyonları hesaplamak için WBCSD&CSI protokolünden faydalanılabilir [51]. Eğer ulaşılabilir veri varsa, kayıp CO₂ emisyonları için CF_{ckd} düzeltme faktörü Eşitlik 6.7'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$CF_{ckd} = 1 + \left(\frac{M_d}{M_{cl}} \right) \times C_d \times F_d \times \left(\frac{EF_c}{EF_{cl}} \right) \quad (6.7)$$

CF_{ckd} = CKD için emisyon düzeltme faktörü

M_d = Döner fırına geri kazandırılmayan CKD miktarı, ton

M_{cl} = Üretilen klinker miktarı, ton

C_d = CKD içindeki karbonat fraksiyonu

F_d = CKD içeriğindeki karbonatın kalsinasyon fraksiyonu

EF_c = Karbonata ait emisyon faktörü, ton CO₂/ton karbonat

EF_{cl} = CKD için düzeltilmemiş klinkerin emisyon faktörü, ton CO₂/ton klinker

Tier 3 Yaklaşımı: Tier 3 emisyon faktörleri, karbonatlı hammaddelerin (karbonatların) CO₂ içeriğine bağlıdır. Tier 3 yaklaşımı, kullanılan karbonat içerikli hammaddelerin (çeşidi ve kaynağına göre) tamamının detaylı bilgisini gerektirir [48].

Aktivite Verisinin Seçilmesi

Tier 2 yaklaşımı, klinker üretim verisini gerektirir. Klinker üretim verisi ulusal istatistiklerden sağlanabilir fakat tercih edilen, bu verilerin her bir çimento üretim

tesisinden ayrı ayrı toplanmasıdır. Ayrıca, klinkerin CaO içeriği ve bu CaO 'ın kalsiyum karbonattan kaynaklanan kısmına ait oranla ilgili bilginin de toplanması gerekmektedir. Karbonatlı olmayan hammadde kaynaklarına (cüruflar, uçucu kül vb.) ait CaO verisine ulaşılabiliriyorsa bu CaO, emisyonlar hesaplanırken klinkerin CaO içeriğine dahil edilmemelidir. Eğer mümkünse, CKD toplanma miktarı, geri kazanılma bilgisi ve kompozisyonuna ait bilgiler de toplanmalıdır. Ulusal toplam üretim verilerini kullanmaktansa her bir çimento üreticisinden veri toplamak, hesaplamalardaki belirsizlikleri minimize etmektedir.

6.1.1.2. Yanmadan Kaynaklı Emisyonlar

Yakıtların yanması sonucu oluşan sera gazı emisyonları için yine 3 farklı yaklaşım vardır:

- **Tier 1 Yaklaşımı:** Ulusal istatistiklerden alınan yakıt yanma verileri ve varsayılan (default) emisyon faktörleri ile sera gazı emisyonları hesaplanabilmektedir.
- **Tier 2 Yaklaşımı:** Ulusal istatistiklerden alınan yakıt yanma verileri ve ulusal yakıt özelliklerinden yararlanılarak belirlenen ülkeye özel emisyon faktörleri ile sera gazı emisyonları hesaplanabilmektedir.
- **Tier 3 Yaklaşımı:** Yakıt istatistikleri ve yakma teknolojileri birlikte göz önünde bulundurularak teknoloji-spesifik emisyon faktörleri ile sera gazı emisyonları hesaplanabilmektedir [48].

IPCC 2006 Kılavuzunda, Tier 1 yaklaşımı için tüm kaynak kategorilere ve yakıt türlerine göre varsayılan (default) emisyon faktörleri bulunmaktadır. Her Tier yaklaşımı, metodolojik aşamalara bölünmüştür.

Tier 1 Yaklaşımı: Tier 1 yaklaşımı kullanılırken, emisyon miktarlarını hesaplamak için,

- Ünitelerde tüketilen toplam yakıt miktarı
- Varsayılan emisyon faktörü gerekmektedir. Bu emisyon faktörü, IPCC 2006 kılavuzundaki tablolardan bulunabilmektedir.

Sera gazı emisyonu miktarı, Eşitlik 6.8'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Sera Gazı Emisyonu}_i = \text{Yakıt Tüketimi}_i \times \text{Emisyon Faktörü}_i \quad (6.8)$$

Sera Gazı Emisyonu_i = Yakıt türüne göre oluşan sera gazı miktarı, kg sera gazı, i = yakıt türü

Yakıt Tüketimi_i = Tüketilen yakıtın enerji cinsinden değeri, TJ

Emisyon Faktörü_i = Yakıt türüne göre belirlenmiş, varsayılan sera gazı emisyon faktörü, kg sera gazı/TJ

CO₂ emisyon faktörü belirlenirken karbon oksidasyon faktörü 1 kabul edilmiştir. Toplam sera gazı emisyonlarını hesaplamak için, her bir yakıt türüne göre emisyonlar ayrı ayrı hesaplanıp toplanmalıdır.

$$\text{Toplam Sera Gazı Emisyonu} = \sum_i \text{Sera Gazı Emisyonu}_i \quad (6.9)$$

i = Yakıt türü

Bu çalışmada sadece CO₂ emisyonları hesaplanmıştır. N₂O ve CH₄ emisyonları CO₂ emisyonlarının yanında küçük bir yüzdelik dilim oluşturmaktadır. Ülkemizin 2010 yılı sera gazı emisyon envanterine göre, toplam sera gazı emisyonu 401,92 milyon tondur. Sadece CO₂ emisyonu miktarı 326,47 milyon ton iken (%81,2), CH₄ emisyonu miktarı 2,74 milyon ton (%0,6), N₂O emisyonu miktarı 42,02 bin tondur.

Tier 2 Yaklaşımı: Tier 2 yaklaşımında emisyon miktarlarını hesaplayabilmek için;

- Kaynak kategorilerdeki toplam yakıt tüketim miktarı
- Her bir sera gazı için ülkeye özel emisyon faktörü gerekmektedir.

Tier 2 yaklaşımında, Eşitlik 6.8'deki varsayılan (default) emisyon faktörünün yerini ülkeye özel emisyon faktörü almaktadır. Ülkeye özel emisyon faktörü, ülkeye özel veriler, tüketilen yakıtların karbon içerikleri, karbon oksidasyon faktörleri, yakıtların kalorifik değerleri ve teknolojik gelişmişlik düzeyi gibi faktörlere bağlı olarak belirlenebilir. Hesaplamalar yapılırken, ülkeye özel emisyon faktörü kullanılarak yapılan hesaplamaları, varsayılan emisyon faktörü kullanılarak yapılan hesaplamalarla karşılaştırmak iyi bir uygulamadır. Çünkü elde edilen değerler belli bir güven aralığı içinde kalmalıdır.

Tier 3 Yaklaşımı: Tier 1 ve 2 yaklaşımlarında, ortalama bir yakıt kombinasyonu ve emisyon faktörü kullanılarak emisyon miktarları hesaplanmaktadır.

Gerçekte emisyonlar;

- Yakıt türüne,
- Yakma teknolojisine,
- Operasyon koşullarına,
- Kontrol teknolojilerine,
- Bakım ve onarım kalitesine,
- Yakıtı yakmak için kullanılan ekipman ve ünitenin yaşına bağlıdır.

Tier 3 yaklaşımında yukarıdaki faktörler göz önünde bulundurularak emisyon miktarları Eşitlik 6.10'daki gibi teknolojiye bağlı olarak hesaplamaktadır [48].

$$\text{Toplam S. Gazı Emisyonu}_{i,tek} = \sum_{tek} Y.Tüketimi_{i,tek} \times E.Faktörü_{sera\ gazı,i,tek} \quad (6.10)$$

$i = \text{Yakıt türü, } tek = \text{teknoloji}$

6.1.2. Dolaylı Emisyonlar

6.1.2.1. Transportasyondan Kaynaklı Emisyonlar

Hareketli kaynaklar, çeşitli yakıtların yanmasından kaynaklanan CO₂, CH₄ ve N₂O gibi sera gazlarının oluşmasına sebep olmaktadır. Bunların yanında CO, NMVOC, SO₂, PM, NO_x gibi gazlar da transportasyondan kaynaklanan gazlardır. Bu kısımda IPCC metodolojisi kullanılarak tesislerde karayolu taşımacılığından kaynaklanan CO₂ emisyonlarının nasıl hesaplanacağı anlatılmaktadır.

Hareketli kaynak kategorisine genellikle, otomobil, kamyon, tır, traktör, otobüs gibi araçlar girer. Bu araçlar gaz veya sıvı birçok farklı yakıt tüketirler. Yakıt yanmasından kaynaklanan emisyonlara bu şekilde taşımacılıktan kaynaklanan emisyonlar da eklenmelidir. Emisyonlar, tüketilen yakıt miktarından veya araçlar tarafından kat edilen mesafeden yola çıkılarak hesaplanabilmektedir. Fakat genellikle, CO₂ emisyonları için yakıt tüketiminden faydalanmak, CH₄ ve N₂O için kat edilen mesafeden yola çıkmak daha uygundur. Bu kısımda, sadece CO₂ emisyonlarının nasıl hesaplandığı anlatılacaktır. CO₂ emisyonlarını hesaplamak için kullanılan yakıtın türünü ve yakıtın karbon içeriğini bilmek gerekmektedir.

Tier 1 Yaklaşımı: Tier 1 yaklaşımı kullanılarak CO₂ emisyonları, yakıt tüketiminin enerji cinsinden değeri ile yakıt özel emisyon faktörünün çarpılması ile hesaplanmaktadır. Bu emisyon faktörü, IPCC 2006 Kılavuzundaki tablolardan bulunabilmektedir.

$$Emisyon miktarı_{CO_2} = \sum_a [Yakıt_a \times EF_a] \quad (6.11)$$

Emisyon miktarı CO₂ = Toplam CO₂ Emisyonları, kg CO₂

Yakıt_a = Tüketilen yakıtın enerji cinsinden değeri, TJ

EF_a = Emisyon faktörü, kg/TJ

a = Yakıt türü (dizel, benzin, doğalgaz vb.)

Tier 2 Yaklaşımı: Tier 2 yaklaşımında da emisyon hesaplamaları Tier 1 yaklaşımındaki gibi hesaplanmaktadır. Sadece, varsayılan emisyon faktörleri yerine ülkeye özel emisyon faktörleri kullanılmaktadır.

CO₂ hesaplamalarında Tier 3 yaklaşımı yoktur. Bunun nedeni, Tier 2 yaklaşımı kullanıldığında ulaşılan değerlerden daha iyi değerlere ulaşılamamış olmasıdır [48].

6.1.2.2. Elektrik Tüketiminden Kaynaklanan Emisyonlar

Elektrik tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının, elektriğin temin edildiği kaynaktan alınan emisyon faktörleri ile tüketim miktarının çarpılması ile hesaplanması tercih edilir. Alternatif olarak, ulusal enerji nakil şebekesi için resmi veriler de kullanılabilir. Eğer bu iki veri de elde edilemiyorsa, ülkeye özel belirlenmiş olan bir ortalama emisyon faktörü kullanılabilir. Bu faktörler, sürekli güncellenmekte olan IEA verilerinden elde edilebilir. Elektrik tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları Eşitlik 6.12'deki gibi hesaplanmaktadır [51].

$$CO_2 \text{ Emisyonu Miktarı} = \text{Toplam Elektrik Tüketimi} \times \text{Emisyon Faktörü} \quad (6.12)$$

CO₂ Emisyonu Miktarı = Toplam CO₂ Emisyonları, kg CO₂

Toplam Elektrik Tüketimi = Tesis içinde kullanılan toplam elektrik tüketim miktarı, kWh

Emisyon Faktörü = WBCCSD&CSI tarafından ülkemiz için belirlenmiş olan emisyon faktörü, 327 kg CO₂/MWh şeklinde verilmiştir.

7. CO₂ EMİSYONU HESAPLAMA ARACI

Bu çalışmada, CO₂ emisyonlarını hesaplamak için C# programlama dili kullanılarak Windows ortamında çalışabilen “CO₂ Emisyonu Hesaplama Aracı” adlı bir bilgisayar uygulaması geliştirilmiştir. Geliştirme ortamı olarak Microsoft Visual Studio 2012 Express Edition kullanılmıştır. C#, C/C++ ve Java dillerinden türeyen, güçlü, basit, öğrenilmesi kolay, esnek, tip güvenli, modern ve Microsoft .NET platformu için sıfırdan geliştirilmiş tek programlama dilidir. Java programlama diline rakip olarak Microsoft firması tarafından çıkarılan C# dili orta düzeyli diller grubuna girer. Hem alt düzey hem de üst düzey programlar yazılabilir. Tez çalışmasında C# dilinin seçilme sebepleri olarak aşağıdaki maddeler sayılabilir [55]:

1. Öğrenilmesi kolay bir dildir.
2. Microsoft Visual Studio geliştirme platformu desteği sayesinde;
 - Grafiksel ara yüzler için bir designer ortamı,
 - Kodlama sırasında otomatik tamamlama,
 - Syntax hatalarının gösterimi gibi konularda, programlamaya yeni başlayan kişilere kod yazımı sırasında kolaylık sağlamaktadır.
3. Nesne yönelimli programlamaya tam destek sağlar.
4. C# çok sık yapılan hataları önlemek için önlemler almıştır. Bu önlemler sayesinde kod yazılırken temel bazı hatalar programcıya gösterilerek anında düzeltilmesine imkan tanımaktadır. Aksi takdirde program derlenmez. Bu sayede birçok hatanın önüne geçilmiş olur.

Tez çalışmasında oluşturulan programın çalışabilmesi için Windows Xp veya daha sonraki versiyonlarda bir işletim sistemi ve .Net framework 4.5 paketinin kurulu olması gerekmektedir.

Uygulama yardımı ile herhangi bir çimento üretim tesisine ait toplam CO₂ emisyonu miktarı hesaplanabilmektedir. Ayrıca uygulama aracı kullanılarak çeşitli senaryolar oluşturulabilmektedir. Bu uygulama aracı ile çalışma kapsamında 3 adet senaryo oluşturulmuş ve sonuçlar hakkında genel bir değerlendirme yapılmıştır. Uygulamada, 6. Bölümde anlatılmış olan IPCC 2006 Kılavuzundaki Tier 1 ve Tier 2 yaklaşımları kullanılmıştır.

“CO₂ Emisyonu Hesaplama Aracı”nda 4 adet sekme bulunmaktadır. İlk iki sekmede doğrudan emisyonlar hesaplanmakta, 3. sekmede dolaylı emisyonlar hesaplanmaktadır. 4. sekme ise “Senaryo Oluşturma Sekmesi”dir. Bu sekme kullanılarak çalışma kapsamında 3 adet senaryo oluşturulmuştur. IPCC metodolojisi, çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını hesaplarken, hesaplamaları kolaylaştırmak amacıyla çeşitli kabuller kullanmaktadır [48]. “Senaryo Oluşturma Sekmesi”ndeki hesaplamalarda da bu kabuller kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan kabuller aşağıda belirtilmiştir.

Kimyasal Kompozisyon Verisi ile İlgili Kabuller

1. Üretilen çimentonun büyük çoğunluğunun (portland veya benzeri çimento) portland çimentosu klinkeri olduğu kabul edilmektedir.
2. CaO içeriğini belirleyebilmek için, klinkerin kimyasal analizinin yapılmış olduğu kabul edilmektedir.
3. Klinkerin CaO içeriğinin değişkenliğinin çok sınırlı olduğu ve MgO içeriğinin çok düşük olduğu kabul edilmektedir.
4. Tesislerin tamamında CaO’ın %100’ünün CaCO₃’tan kaynaklandığı kabul edilmektedir.
5. Tesislerin neredeyse tamamının hammadde girişindeki CaO içeriğini kontrol edebildikleri kabul edilmektedir.
6. CaCO₃’ın %100’ünün kalsinasyona uğradığı kabul edilmektedir.
7. Tesislerde, toplanan çimento fırın tozlarının döner fırına geri dönüşümünün olduğu kabul edilmektedir.

Üretim Verisi ile İlgili Kabuller

1. Çimento üretim tesisi bazında veri toplandığı kabul edilmektedir.
2. Raporlanmış fakat yaklaşık değerler kullanılmıştır.

CKD ile İlgili Kabuller

1. CKD’nin yıkayıcılar tarafından tutulduğu ve tutulan CKD’nin fırına geri kazanımının sağlandığı kabul edilmektedir.
2. CKD’nin orijinal bileşiminin hammadde ile aynı olduğu kabul edilmektedir.

3. CKD'nin içindeki tüm karbonatın CaCO_3 'tan kaynaklandığı kabul edilmektedir [48].

7.1. Doğrudan Emisyonlar Sekmesi

İlk sekme, “Doğrudan Emisyonlar” sekmesidir. İlk sekme iki gruba ayrılmıştır. Birinci grupta, “Klinker Üretimi”, ikinci grupta ise “Birincil Yakıt Tüketimi” kaynaklı CO_2 emisyonları hesaplanmaktadır.

Klinker Üretimi

Klinker üretiminden kaynaklanan emisyonlar Bölüm 6.1.1.1'deki şekilde IPCC Tier 2 yaklaşımı ile hesaplanmaktadır [48]. Tesislerde tespit edilen klinkerin CaO içeriği ve tesiste üretilen klinker miktarı kullanıcı tarafından ekrana yazılmakta olup, emisyon faktörü Eşitlik 7.1'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$EF \left(\text{ton} \frac{\text{CO}_2}{\text{ton klinker}} \right) = \left(\frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}} \right) \times \text{Klinkerin CaO içeriği} \quad (7.1)$$

$$M_{\text{CO}_2}/M_{\text{CaO}} = 43,97/56,03 = 0,785 \text{ tir.}$$

Kalsinasyondan kaynaklanan emisyon miktarı (ton CO_2) ise Eşitlik 7.2'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Emisyon Miktarı (EMCO}_2) = KM \times EF \times DF \quad (7.2)$$

$$KM = \text{Klinker Miktarı, ton}$$

$$EF = \text{Emisyon Faktörü, ton CO}_2/\text{ton klinker}$$

$$DF = \text{CKD için Düzeltme Faktörü} = 1,02 \text{ dir.}$$

Kullanıcı tarafından “Klinkerin CaO İçeriği (%)” ve “Klinker Miktarı (ton/yıl)” ekrana yazıldıktan sonra “Hesapla” butonuna basılarak *Klinker Üretiminden Kaynaklanan Emisyon Miktarı (ton CO_2)* hesaplanmış olarak ekranda görülmektedir.

Birincil Yakıt Tüketimi

CO_2 emisyonları, karbon bazlı yakıtların yanması sonucu oluşur. Ulusal emisyonlar, tüketilen yakıt miktarına ve yakıtın karbon içeriğine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Tüketilen yakıtları, birincil yakıtlar (petrokok, linyit, taş kömürü

vb.) ve ikincil (alternatif) yakıtlar (atık yağlar, kullanılmış lastikler vb.) olarak ikiye ayırmak gerekmektedir. Birincil yakıtlardan kaynaklanan CO₂ emisyonları ilk sekmede, alternatif yakıtlardan kaynaklanan CO₂ emisyonları ise 2. sekmede hesaplanmaktadır. Birincil yakıt türleri, ülkemizdeki 48 adet entegre çimento fabrikasının kullandığı yakıt türleri incelenerek belirlenmiştir. Belirlenen yakıt türleri ve yakıtlara ait karbon emisyon faktörleri Çizelge 7.1’de gösterilmektedir.

IPCC metodolojisi, yakıtların yanmasından kaynaklı emisyonların hesaplanmasını 6 aşamada hesaplamaktadır [52]:

1. Ünitelerdeki gerçek yakıt tüketim miktarını hesaplamak
2. Yakıt tüketim miktarını alt ısı değer (kcal/kg) ile çarparak enerjiye çevirmek
3. Emisyon katsayıları ile çarparak karbon içeriğini hesaplamak
4. Depolanmış karbon miktarını hesaplamak
5. Karbon oksidasyon faktörü ile çarparak düzeltme yapmak
6. Okside edilmiş karbonu CO₂’e dönüştürmek

Kullanıcı, öncelikle hangi yakıtı kullanmış ise o yakıtı seçmelidir. Program bu şekilde aktive olmaktadır. Ardından aşağıda belirtilen 6 aşama devreye girer.

1. Aşama

İlk aşamada her bir yakıt için tesis içinde tüketilmiş miktar (ton) belirlenerek toplam gerçek yakıt tüketim miktarı belirlenir. Kullanıcı, bu aşamada ekranda bulunan “Tüketim Miktarı (ton/yıl)” kısmına, kullanılmış yakıt miktarını/miktarlarını yazar.

2. Aşama

Her bir yakıtı ait tüketim miktarı, yakıtın alt ısı değeri (kcal/kg) ile çarpılarak yakıt tüketimi enerji cinsinden ifade edilir (TJ). Bu aşamada da kullanıcı, yakıtı özel “Alt Isıl Değer” bilgisini ekrana yazacaktır. Bunun dışında bu grupta kullanıcıya ait doldurulacak başka bir alan bulunmamaktadır. Yakıt tüketimi (YT), Eşitlik 7.3’teki gibi hesaplanmaktadır.

$$YT(TJ) = TM(ton) \times \left(\frac{1000\text{ kg}}{1\text{ ton}}\right) \times AID\left(\frac{kcal}{kg}\right) \times 4,186\left(\frac{kJ}{kcal}\right) \times 1\text{ TJ}/10^9\text{ kJ} \quad (7.3)$$

$YT = \text{Yakıt Tüketimi, TJ}$

$TM = \text{Tüketim Miktarı, ton}$

AID= Alt Isıl Değer, kcal/kg'dir.

Yakıtların alt ısı değerlerini her tesis kendi kullandığı yakıtların elementel analizlerini yaparak tespit etmelidir. Eğer tespit edilen alt ısı değerler yok ise varsayılan (default) “Net Kalorifik Değer” veya “Alt Isıl Değer” kullanılabilir.

3. Aşama

Belirlenen tüketim değeri (TJ), bir “Karbon Emisyon Faktörü” (KEF) (tonC/TJ) ile çarpılarak, enerji tüketimi, karbon miktarına dönüştürülür. Böylece toplam karbon emisyon değeri belirlenmiş olur. Eğer ülkeye özel KEF değerleri varsa bu değerler kullanılır fakat ülkeye özel belirlenmiş KEF değeri yoksa tablodaki varsayılan (default) değerler kullanılabilir.

Ülkemize ait belirlenmiş KEF olmadığı için bu aşamada varsayılan KEF değerleri kullanılmıştır. Hesaplama aracında kullanılan KEF değerleri Çizelge 7.1’de gösterilmektedir [54].

Çizelge 7.1 Birincil yakıt türlerine ait karbon emisyon faktörleri

Yakıt Türü	Karbon Emisyon Faktörü (tonC/TJ)
Linyit	27,6
Petrokok	27,5
Taş Kömürü	25,8
Fuel oil	20,2
LPG	17,2
Doğalgaz	15,3

Toplam karbon içeriği, Eşitlik 7.4’teki gibi hesaplanmaktadır.

$$TKE(tonC) = YT(TJ) \times KEF\left(\frac{tonC}{TJ}\right) \quad (7.4)$$

TKE= Toplam Karbon Emisyonu, tonC

KEF= Karbon Emisyon Faktörü, tonC/TJ

4. Aşama

Bu aşamada, alternatif yakıt miktarları da belirlenip alt ısı değerleri ile de çarpılarak toplam tüketime (TJ) eklenir. Fakat alternatif yakıtlar için yanmayan ve tara

veya kömür yağına dönüşen karbon içeriğini depolanmış karbon olarak ifade edilen miktarı toplam karbondan çıkarmak gerekmektedir. Böylece net karbon içeriği (tonC) belirlenir. Bu çalışmada, alternatif yakıtlardan kaynaklanan CO₂ miktarı “Doğrudan Emisyonlar 2” sekmesinde ayrıca hesaplandığı için bu aşama uygulanmamıştır.

5. Aşama

3.aşamada belirlenmiş olan net karbon emisyon değeri (tonC), karbon oksidasyon faktörü (KOF) ile çarpılarak gerçek karbon emisyonları hesaplanmaktadır.

$$GKE (tonC) = TKE(tonC) \times KOF \quad (7.5)$$

GKE= Gerçek Karbon Emisyonu, tonC

TKE= Toplam Karbon Emisyonları, tonC

KOF= Karbon Oksidasyon Faktörü= 1 olarak kabul edilmiştir.

6. Aşama

Karbon oksidasyon faktörü ile çarpılmış olan gerçek karbon emisyon değeri, Eşitlik 7.6’da gösterildiği gibi, $M_{CO_2}/M_c = 44/12$ moleküler ağırlık oranı ile çarpılarak birincil yakıtların yanmasından kaynaklı toplam CO₂ emisyon miktarı (ton CO₂) hesaplanmaktadır.

$$Emisyon Miktarı (EMCO_2) = GKE \times \frac{M_{CO_2}}{M_c} \quad (7.6)$$

Kullanıcı tarafından “Tüketim Miktarı (ton/yıl)” ve “Alt Isıl Değer (kcal/kg)” ekrana yazıldıktan sonra “Hesapla” butonuna basılarak *Birincil Yakıt Tüketiminden Kaynaklanan Toplam Emisyon Miktarı (ton CO₂)* hesaplanmış olarak ekranda görünmektedir. Şekil 7.1’de “Doğrudan Emisyonlar” sekmesinin ekran çıktısı görülmektedir.

CO2 Emisyonu Hesaplama Programı

Doğrudan Emisyonlar Doğrudan Emisyonlar 2 Dolaylı Emisyonlar Senaryo Oluşturma

Klinker Üretimi

Klinkerin CaO İçeriği (%) 50

Emisyon Faktörü (EF) (ton CO2 / ton klinker)

Klinker Miktar (KM) 0 (ton klinker / yıl)

Emisyon Miktar (EMC02) (ton CO2 / yıl)

Düzeltilme Faktörü (DF) = 1,02

Hesapla Temizle

Yakıt Tüketimi

Yakıt Türü	Tüketim Miktar (TM)	Alt Isıl Değer (AID)	Karbon Emisyon Faktörü (KEF)	Emisyon Miktar (EMC02)
☐ Linyit	0	0	27,6	
☐ Petrokok	0	0	27,5	
☐ Taş Kömürü	0	0	25,8	
☐ Fuel Oil	0	0	20,2	
☐ LPG	0	0	17,2	
☐ Doğalgaz (Sm ³ /yıl)	0	0	15,3	

(ton / yıl) (kcal / kg) (tonC / TJ)

Karbon Oksidasyon Faktörü = 1

Toplam EMC02 (ton CO2 / yıl)

Hesapla Temizle

Toplam Emisyon (Doğrudan + Dolaylı Emisyonlar) ton CO2



Şekil 7.1 “Doğrudan Emisyonlar” sekmesinin ekran çıktısı

7.2. Doğrudan Emisyonlar 2 Sekmesi

İkinci sekmede, “Alternatif Yakıt Tüketimi” kaynaklı CO₂ emisyonları hesaplanmaktadır. Alternatif yakıt türleri de birincil yakıt türleri gibi, ülkemizdeki çimento fabrikalarının kullandığı alternatif yakıtlar incelenerek belirlenmiştir. Belirlenen yakıt türleri ve yakıtlara ait emisyon faktörleri Çizelge 7.2’de gösterilmektedir [53].

Çizelge 7.2 Alternatif yakıtlar ve emisyon faktörleri

Alternatif Yakıt Türü	E. Faktörü (ton CO ₂ /GJ)	Alternatif Yakıt Türü	E. Faktörü (ton CO ₂ /GJ)
Kullanılmış Lastik	85	Katı Yakıt Atıkları	80
Arıtma Çamuru	83	Sıvı Yakıt Atıkları	74
Atık Yağlar	74	Solvent Atıkları	74
Rafinasyon Atıkları	83	Plastik, Kâğıt Atıkları	110
Kontamine Atıklar	80	Diğer	80

Alternatif yakıt tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları Bölüm 6.1.1.2’deki şekilde IPCC Tier 1 yaklaşımı ile hesaplanmaktadır. Her bir yakıt için CO₂ emisyonu miktarı, Eşitlik 7.7’deki gibi hesaplanmaktadır. Toplam CO₂ emisyonları ise, her bir yakıttan kaynaklanan emisyonların toplanmasıyla Eşitlik 7.8’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$Emisyon Miktarı (EMCO_2)_i = TM_i \times AID_i \times EF \quad (7.7)$$

TM = Tüketim Miktarı, ton/yıl; AID = Alt Isıl Değer, kcal/kg; EF = Her bir yakıt için varsayılan emisyon faktörü, kg CO₂/GJ ’dir.

$$Toplam CO_2 Emisyonu = \sum_i Emisyon Miktarı (EMCO_2)_i \quad (7.8)$$

Kullanıcı, kullanmış olduğu alternatif yakıt türlerini seçerek uygulamayı aktive ettikten sonra “Tüketim Miktarı (ton/yıl)” ve “Alt Isıl Değer (kcal/kg)” ekrana yazdıktan sonra “Hesapla” butonuna basılarak *Alternatif Yakıt Tüketiminden Kaynaklanan Emisyon Miktarı (ton CO₂)* hesaplanmış olarak ekranda görünmektedir. Şekil 7.2’de “Doğrudan Emisyonlar 2” sekmesinin ekran çıktısı görülmektedir.

CO2 Emisyonu Hesaplama Programı

Doğrudan Emisyonlar Doğrudan Emisyonlar 2 Dolaylı Emisyonlar Senaryo Oluşturma

Alternatif Yakıt Tüketimi

Yakıt Türü	Tüketim Miktarı (TM)	Alt Isıl Değer (AID)	Emisyon Faktörü (EF)	Emisyon Miktarı (EMCO2)
☐ Kullanılmış Lastik	0	0	85	
☐ Antma Camurları			83	
☐ Atık Yağlar	0	0	74	
☐ Rafinasyon Atıkları	0	0	83	
☐ Kontamine Atıklar	0	0	80	
☐ Katı Yakıt Atıkları	0	0	80	
☐ Sıvı Yakıt Atıkları	0	0	74	
☐ Solvent Atıkları	0	0	74	
☐ Plastik, Kağıt Atıkları	0	0	110	
☐ Diğer	0	0	80	

(ton / yıl) (kcal / kg) (ton CO2 / GJ)

Toplam EMCO2 (ton CO2 / yıl)

Hesapla Temizle

Toplam Emisyon (Doğrudan + Dolaylı Emisyonlar) ton CO2





Şekil 7.2 “Doğrudan Emisyonlar 2” sekmesinin ekran çıktısı

7.3. Dolaylı Emisyonlar Sekmesi

Üçüncü sekme, “Dolaylı Emisyonlar” sekmesidir. Bu sekme iki gruba ayrılmıştır. Birinci grupta, “Elektrik Enerjisi Tüketimi”, ikinci grupta ise “Transportasyon” kaynaklı CO₂ emisyonları hesaplanmaktadır.

Elektrik Enerjisi Tüketimi

“Dolaylı Emisyonlar” sekmesinin ilk grubunda, elektrik tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları hesaplanmaktadır. Elektrik tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları, WBCSD (World Business Council for Sustainable Development)’ye bağlı olarak çalışan CSI (Cement Sustainability Initiative) tarafından hazırlanan “The Cement CO₂ Protocol” de ülkemiz için belirlenmiş olan emisyon faktörü kullanılarak hesaplanmaktadır [51].

Elektrik Tüketiminden Kaynaklanan CO₂ emisyonları Eşitlik 7.9’daki gibi hesaplanır.

$$\text{Emisyon Miktarı } EMC_{CO_2} = TT \times EF \quad (7.9)$$

TT = Toplam Elektrik Tüketimi, kWh/yıl

EF = Ülkemiz İçin Belirlenmiş Olan Emisyon Faktörü = 327 kg CO₂/MWh [56]

Kullanıcı, “Klinker Toplam Elektrik”, “Çimento Toplam Elektrik”, “Paketleme Toplam Elektrik”, “Diğer” ve “Enerji Kayıpları” kısımlarına tesiste tüketilmiş elektrik miktarını yazdıktan sonra ekranda “Toplam Elektrik Tüketimi (kWh/yıl)” otomatik olarak hesaplanır. Daha sonra “Hesapla” butonuna basılarak *Elektrik Tüketiminden Kaynaklanan Emisyon Miktarı (ton CO₂)* hesaplanmış olarak ekranda görünmektedir.

Transportasyon

“Dolaylı Emisyonlar” sekmesinin ikinci grubunda transportasyondan kaynaklanan CO₂ emisyonları hesaplanmaktadır. CO₂ emisyonları, Bölüm 6.1.2.1’de anlatıldığı şekilde IPCC Tier 1 yaklaşımı ile hesaplanmaktadır. Tier 1 yaklaşımı kullanılarak CO₂ emisyonları, yakıt tüketiminin enerji cinsinden değeri ile yakıta özel emisyon faktörünün çarpılması ile hesaplanır.

Bu çalışmada, transportasyondan kaynaklanan emisyonlar hesaplanırken, ülkemizde en çok kullanılan yakıt türleri seçilmiştir. Bu yakıt türleri ve bu yakıtlara ait emisyon faktörleri, Çizelge 7.3'te gösterilmektedir [48].

Çizelge 7.3 Yakıt türlerine ait emisyon faktörleri

Yakıt Türü	Emisyon Faktörü (kg CO ₂ /GJ)
Dizel	74,1
Benzin	69,3
LPG	63,1

Transportasyondan kaynaklanan CO₂ emisyonları Eşitlik 7.10'daki şekilde hesaplanmaktadır.

$$Emisyon\ miktarı_{CO_2} = \sum_i [Yakıtı_i \times EF_i] \quad (7.10)$$

$Yakıt_i$ =Tüketilen yakıtın enerji cinsinden değeri, TJ

EF_i =Emisyon faktörü, kg/TJ

i = Yakıt türü (dizel, benzin, LPG)

Kullanıcı, öncelikle ekranda kullanmış olduğu yakıt türlerini seçerek hesaplamayı aktive etmelidir. “Tüketim Miktarı (ton)” ve “Alt Isıl Değer (kcal/kg)” ekrana yazıldıktan sonra “Hesapla” butonuna basılarak *Transportasyondan Kaynaklanan Emisyon Miktarı (ton CO₂)* hesaplanmış olarak ekranda görünmektedir. Şekil 7.3'te “Dolaylı Emisyonlar” sekmesinin ekran çıktısı görülmektedir.

CO2 Emisyonu Hesaplama Programı

Doğrudan Emisyonlar Doğrudan Emisyonlar 2 Dolaylı Emisyonlar Senaryo Oluşturma

Elektrik Enerjisi Tüketimi

Klinker Toplam Elektrik 0 (kWh / yıl)

Çimento Toplam Elektrik (Klinker Hariç) 0 (kWh / yıl)

Paketleme Toplam Elektrik 0 (kWh / yıl)

Diğer 0 (kWh / yıl)

Enerji Kayıpları 0 (kWh / yıl)

Toplam Tüketim (TT) (kWh / yıl)

Toplam EMCO2 (ton CO2 / yıl)

Hesapla Temizle

Emisyon Faktörü (EF) = 537 kg CO2 / MWh

Transportasyon

	Tüketim Miktarı (TM)	Alt Isıl Değer (AID)	Emisyon Faktörü (EF)	Emisyon Miktarı (EMCO2)
☐ Dizel	0	0	74,1	
☐ Benzin	0	0	69,3	
☐ LPG	0	0	63,1	
	(ton / yıl)	(kcal / kg)	(kg CO2 / GJ)	

Toplam EMCO2 (ton CO2 / yıl)

Hesapla Temizle



Toplam Emisyon (Doğrudan + Dolaylı Emisyonlar) ton CO2

Şekil 7.3 “Dolaylı Emisyonlar” sekmesinin ekran çıktısı

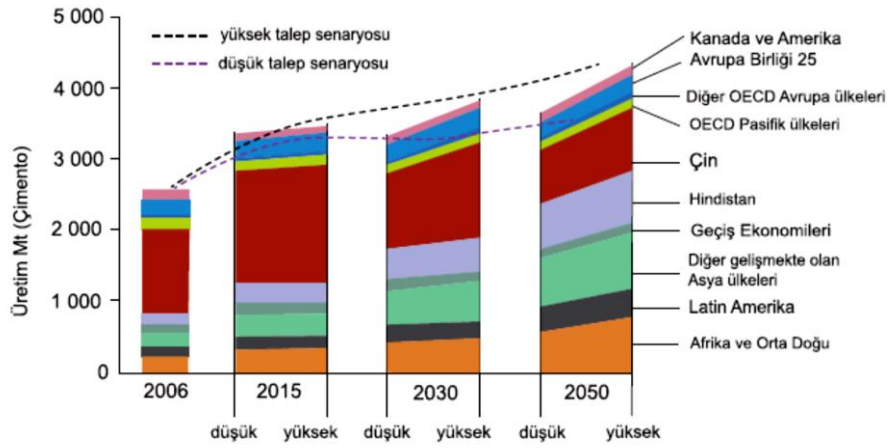
7.4. Senaryo Oluşturma Sekmesi

7.4.1. Genel Bilgi

Çimento sektörü, küresel anlamda giderek büyümekte olan bir sektördür. Bu büyüme neticesinde sektörden kaynaklanan karbon emisyonları da artmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi (WBCSD) ile birlikte ortak olarak, 2050 yılına kadar olan zaman dilimi için, çimento endüstrisindeki karbon emisyonlarının azaltılması ile ilgili teknolojik olanakları ortaya koyan bir yol haritası yayınlamışlardır. Bu yol haritasında, termal ve elektrik verimliliğindeki son teknolojiler, alternatif yakıt kullanımı, katkılı çimento kullanımıyla klinker kullanım oranının azaltılması ve karbon yakalama ve depolama konularına yer verilmiştir. Çimento endüstrisi; öğütme, yakıt hazırlama, yanma, kırma, taşıma vb. birçok teknolojiyi ihtiva etmektedir. Belirlenen yol haritası, birçok teknolojiyi bir araya getirmek için efektif mekanizmaları ortaya koymaktadır. Bu yol haritasında, Uluslararası Enerji Ajansı'nın BLUE Senaryosu baz alınarak bir model oluşturulmuş olup, bu senaryoya göre 2006 yılındaki emisyon seviyeleri baz alındığında, 2050 yılında küresel enerjiyle ilgili CO₂ emisyonlarının yarıya indirilmesi için kapsamlı ve tarafsız politikaların gereksinimleri incelenmiştir. Yol haritası 4 ana unsurdan oluşmaktadır:

1. **Termal ve Elektrik Verimliliği:** Yeni çimento fabrikalarında mevcut en iyi teknolojilerin uygulanması ve ekonomik olarak uygulanabilir olan enerji verimli ekipmanların donanımlarının daha da iyileştirilmesi.
2. **Alternatif Yakıtlar:** Çimento üretim prosesinde daha az karbon yoğunluklu fosil yakıtların, alternatif yakıtların ve biokütle yakıtların kullanımı. Alternatif yakıtlar, çeşitli atıklardan oluşmaktadır.
3. **Klinkerin Yer Değiştirmesi (Klinkerin yerine geçme):** Karbon yoğunluklu olan klinkerin, diğer karbon yoğunluğu düşük olan çimento özelliği taşıyabilen malzemeler ile yer değiştirmesi.
4. **Karbon Yakalama ve Depolama:** Oluşan CO₂'in atmosfere salınımından önce tutularak güvenli bir şekilde depolanması [54].

Çimento üretimi CO₂ yayan bir proses olmakla birlikte, şu anki küresel olarak insan kaynaklı CO₂ emisyonlarının yaklaşık %5-7'sinden sorumludur. Gelişme gösteren ülkelerde modernizasyon kapsamında çimento üretiminin artacağı tahmin edilmektedir. 2006 yılı dünya çimento üretimi 2,55 milyar ton olup, düşük büyüme talebi senaryosuna göre hazırlanan bu haritada 2050 yılında üretimin 3,69 milyar ton ve aynı şekilde yüksek büyüme senaryosuna göre de 4,40 milyar ton olacağı öngörülmektedir. Global olarak çimento üretimi 2000 yılından 2006 senesine kadar %54 oranında artış göstermiş olup, mutlak CO₂ emisyonları ise %42 oranında artış göstererek, 2006 yılında 1,88 giga ton değerine ulaşmıştır [54]. Şekil 7.4'te 2006, 2015, 2030 ve 2050 yıllarına ait çimento üretim miktarları gösterilmektedir [54].



Şekil 7.4 Küresel çimento üretimi: 2006, 2015, 2030, 2050

Ülkemizde de geçmiş yıllar ile kıyaslandığında çimento sektörünün çok hızlı bir şekilde büyüdüğü görülmektedir. Günümüzde 65 milyon klinker kapasitesi ve 106 milyon ton çimento üretme kapasitesine sahip olan sektör üretim hacmini gün geçtikçe genişletmeye devam etmektedir. CO₂ emisyonu artışı, klinker üretimi artışıyla doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, ülkemizde klinker üretiminin artmasıyla CO₂ emisyonlarının artması kaçınılmazdır. Ülkemiz sektörden kaynaklı emisyonları azaltmak için yukarıda bahsedilen unsurları uygulamak durumundadır.

7.4.2. Senaryo Oluşturma Sekmesinin Kullanımı

Tez kapsamında, Türkiye'nin çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları farklı senaryolar ile incelenmek istenmiştir. Senaryolardaki

hesaplamalarda, dördüncü sekme olan, “Senaryo Oluşturma Sekmesi” kullanılmıştır. Bu sekmede, gerekli veriler kullanıcı tarafından ekrana yazıldıktan sonra çeşitli senaryolar oluşturabilmek amacıyla uygulamaya eklenmiştir. Sekme, “Kalsinasyon”, “Yakıt Tüketimi” ve “Elektrik Tüketimi” olmak üzere üç gruptan oluşmaktadır.

“Kalsinasyon” grubundaki hesaplamalar, Bölüm 7.1’deki şekilde yapılmaktadır. Tek fark, bu sekmede emisyon faktörünün sabit olması, ilk sekmede ise emisyon faktörünün klinkerin CaO içeriğine göre değişmesidir. Kullanıcı, ekrana yalnızca “Klinker Tüketimi” miktarını yazar, daha sonra ekranda “EMCO2” kısmında emisyon miktarı hesaplanmış olarak görülür.

“Yakıt Tüketimi” grubundaki hesaplamalar, genel olarak Bölüm 7.2’deki şekilde yapılmaktadır. Buradaki fark, bu sekmede “Klinker Miktarı” yazıldıktan sonra “Birim Yakıt Tüketimi” değeri, *2900-3500 MJ/ton klinker* aralığında bir değer olacak şekilde ekrana yazılarak “Toplam Yakıt Tüketimi” hesaplanmaktadır. Daha sonra, yakıtların “Kullanım Oranları (%)” ekrana yazılıp, toplam yakıt tüketimi ve emisyon faktörleri ile çarpılarak “EMCO2” kısmında emisyon miktarı hesaplanmış olarak görülür.

“Elektrik Tüketimi” grubundaki hesaplamalar ise “Çimento Miktarı” ve “Birim Elektrik Tüketimi” değeri *90-150 MWh/ton çimento* aralığında bir değer olacak şekilde ekrana yazılır. Daha sonra uygulama tarafından bu değerler ve sabit olan emisyon faktörü (*327 ton CO₂/ton klinker*) çarpıldıktan sonra “EMCO2” kısmında emisyon miktarı hesaplanmış olarak görülür.

Tüm bu sekmelerde “EMCO2” kısımlarında hesaplanmış olan toplam emisyonlar, pencerenin sol alt köşesinde “Toplam Emisyon” kısmında otomatik olarak toplanmakta ve bir senaryoya ait toplam CO₂ emisyonu miktarı hesaplanmış olmaktadır. Şekil 7.5’te “Senaryo Oluşturma” sekmesinin ekran çıktısı görülmektedir.

CO2 Emisyonu Hesaplama Programı

Doğrudan Emisyonlar Doğrudan Emisyonlar 2 Dolaylı Emisyonlar **Senaryo Oluşturma**

Kalsinasyon

Klinker Miktar: 0 (ton)

Emisyon Faktörü: 0,51 (ton CO₂ / ton klinker)

Emisyon Miktar (EMCO₂): (ton CO₂)

Hesapla Temizle

Yakıt Tüketimi

Klinker Miktar: 0 (ton)

Birim Yakıt Tüketimi: (MJ / ton klinker)

Toplam Yakıt Tüketimi: (MJ)

Yakıt Türü	Kullanım Oranı (%)	Toplam Yakıt Tüketimi	Emisyon Faktörü	Emisyon Miktar (EMCO ₂)
☐ İthal Kömür	0	0	96	
☐ Petrokok	0		92,8	
☐ Yerli Linyit	0		101	
☐ Yerli Taşkömürü	0		96	
☐ Doğalgaz	0		56,1	
☐ Alt. Yakıt	0		74	
			Toplam EMCO ₂ (ton CO ₂)	

Hesapla Temizle

Elektrik Tüketimi

Çimento Miktar: 0 (ton)

Birim Elektrik Tük.: (MWh / ton çimento)

Emisyon Faktörü: 327 (ton CO₂ / ton klinker)

Emisyon Miktar (EMCO₂): (ton CO₂)

Hesapla Temizle

Toplam Emisyon: ton CO₂

Şekil 7.5 “Senaryo Oluşturma” sekmesinin ekran çıktısı

7.5. Senaryolar

7.5.1. Genel Bilgi

Senaryolar oluşturulurken ülkemize özel olan, Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın 2012 yılı Sektör Raporu'nda yer alan 2012-2023 projeksiyonundaki artış oranı göz önünde bulundurulmuştur. Projeksiyon incelendiğinde bu artışın ülkemiz için yıllık yaklaşık %0,03 olduğu görülmektedir [22].

Çizelge 7.4 Çimento sektörünün 2013-2023 projeksiyonu

Yıl	Çimento Üretimi (Milyon ton)	Çimento Üretimi Artış Oranları (%)
2012	71,4	
2013	74,2	0,039
2014	76,5	0,030
2015	78,7	0,028
2016	81,1	0,030
2017	83,5	0,029
2018	86,1	0,031
2019	88,6	0,029
2020	91,3	0,030
2021	94,1	0,030
2022	96,8	0,028
2023	99,8	0,030
Ortalama		0,030

Ülkemizin 2002-2011 yılları arasındaki çimento ve klinker üretimleri incelendiğinde, çimento üretiminin ortalama %85'nin klinker üretimi olduğu görülmektedir (Çizelge 7.5). Bu veri kullanılarak ülkemizin 2023-2050 projeksiyonu oluşturulmuştur. 2002-2011 yılları arasındaki çimento ve klinker üretim miktarı verileri TCMB'ye ait web sitesinden temin edilmiştir [19].

Çizelge 7.5 Türkiye çimento ve klinker üretimi, 2002-2011

Yıl	Çimento Üretimi	Klinker Üretimi	% Klinker
2002	32.758.049	29.498.636	90,05
2003	35.094.768	28.106.061	80,08
2004	38.795.797	32.788.751	84,51
2005	42.786.835	36.381.963	85,03
2006	47.400.159	38.197.718	80,58
2007	49.255.880	41.585.243	84,42
2008	51.431.869	44.731.545	86,97
2009	53.972.758	46.161.701	85,52
2010	62.737.276	52.832.430	84,21
2011	63.405.094	54.275.538	85,60
Ortalama			84,69

Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın 2013-2023 projeksiyonunda 2023 yılında 99,8 milyon ton çimento üretileceği öngörülmektedir fakat projeksiyonda klinker üretimi yer almamaktadır. Çimento üretiminin %85'inin klinker üretimine tekabül ettiği düşünüldüğünde 2023 yılında yaklaşık olarak 84,5 milyon ton klinker üretileceği öngörülebilir (Çizelge 7.6). Bu çalışmada, yukarıda belirtilen veriler kullanılarak ülkemizin 2023-2050 üretim projeksiyonu oluşturulmuştur (Çizelge 7.6).

Çizelge 7.6 Çimento sektörü üretim projeksiyonu, 2023-2050

Yıl	Çimento Üretimi (Milyon ton)	Klinker Üretimi (Milyon ton)
2023	99,8	84,5
2024	102,9	87,5
2025	105,9	90,1
2026	109,2	92,8
2027	112,4	95,6
2028	115,8	98,4
2029	119,3	101,4
2030	122,9	104,5
2050	221,9	188,6

Senaryolarda Kullanılan Önemli Bilgiler

“Çimento ve Kireç Üretimi için Mevcut En İyi Teknolojiler” referans kılavuzunda yeni tesisler ve büyük çaplı iyileştirmeler için BAT, çok kademeli ön ısıtma ve ön kalsinasyonlu kuru proses fırını olarak belirtilmiştir. Düzenli optimize edilmiş işletme koşullarında ilgili BAT ısı denge değeri klinker için 2900-3300 MJ/ton klinker'dir [26]. Çizelge 7.7’de çimento üretiminde yakıt teknolojisi kullanımı gösterilmektedir.

Çizelge 7.7 Çimento üretiminde yakıt enerjisi kullanımı

Özgül Termal Enerji Talebi (MJ/ton klinker)	Proses
3000 - $\leq$ 4000	Kuru proses,çok kademeli (üç-altı kademeli) siklonlu, ön ısıtıcı ve prekalsinasyonlu döner fırınlar için
3100 - 4200	Kuru proses, siklon ön ısıtıcı döner fırınlar için
3300 - 5400	Yarı kuru/yarı yaş prosesler (Lepol fırın) için
$\leq$ 5000	Kuru proses uzun fırınlar için
5000 - 6400	Yaş proses uzun fırınlar için
3100 - >6500	Şaft fırınlar için ve özel çimentoların üretimi için

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, ülkemizde 48 adet entegre çimento üretim tesisinden 47sinde kuru proses kullanılmaktadır. Bu fırınların birçoğunda prekalsinasyon sistemi de bulunmaktadır. Bu nedenle senaryolar, yakıt tüketiminin 2900-3500 MJ/ton klinker aralığında olduğu düşünülerek oluşturulmuştur. Ayrıca, “Çimento ve Kireç Üretimi için Mevcut En İyi Teknolojiler” referans kılavuzunda çimento üretim tesislerindeki elektrik enerjisi ihtiyacının 90-150 kWh/ton çimento arasında değiştiği belirtilmiştir [26]. Oluşturulan senaryolarda, elektrik tüketiminden kaynaklı CO₂ emisyonları hesaplanırken bu veri kullanılmıştır.

7.5.2. Senaryoların Oluşturulması

Tez çalışması kapsamında, Türkiye’nin çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları farklı senaryolar ile incelenmek istenmiştir. Bu amaçla aşağıda detayları açıklanan kabuller çerçevesinde üç senaryo belirlenmiştir. Senaryolarda temel olarak

Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın 2013-2023 projeksiyonu ve “Çimento ve Kireç Üretimi için Mevcut En İyi Teknolojiler” referans kılavuzunda yer alan, Avrupa'daki fırınlarda yapılan çalışmalar sonucu belirlenen değerlerden faydalanılmıştır. Hesaplamalarda ise, "CO₂ Emisyonu Hesaplama Aracı" ın 4. Sekmesi olan “Senaryo Oluşturma” sekmesi kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında oluşturulan senaryolar:

1. Senaryo 1 (S1): Ülkemizde çimento sektörünün 2011 yılındaki teknik şartları koruduğu, yalnızca klinker ve çimento üretiminin arttığı varsayılan senaryodur.
2. Senaryo 2 (S2): Ülkemizde mevcut en iyi teknolojilerin kısmen uygulandığı, alternatif yakıt tüketiminin ve doğal gaz tüketiminin belirli miktarda arttığı varsayılan senaryodur.
3. Senaryo 3 (S3): Mevcut en iyi teknolojilerin tamamen uygulandığı, birim yakıt tüketimi (MJ/ton klinker) ve birim elektrik tüketiminin (kWh/ton çimento) Avrupa'daki en iyi tüketim derecesine ulaşıldığı varsayılan senaryodur.

Oluşturulan senaryolar, aynı zamanda birer gelecek projeksiyonu olarak da değerlendirilebilir. Kalsinasyon prosesinden kaynaklanan emisyonlar, ana hammadde olarak kalker kullanıldığından kaçınılmazdır. Ayrıca çimento sektörü, enerji yoğun bir sektördür. Bu nedenle senaryolarda, enerji tüketimine sebebiyet veren en önemli iki kaynak olan, BLUE senaryosunda da bahsedilen unsurlardan termal ve elektrik verimliliği ile alternatif yakıt unsurları da göz önünde bulundurulmuştur. Senaryolarda temel olarak;

1. Kalsinasyondan kaynaklanan CO₂ emisyonları
2. Yakıt tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları
3. Elektrik tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları hesaplanmıştır.

7.5.2.1. Senaryo 1 (S1)

Bu senaryoda, 2011-2050 yılları arasında yalnızca çimento ve klinker üretim miktarlarının arttığı varsayılmıştır. Üretim miktarı dışında, birim yakıt tüketimi (MJ/ton klinker) ve birim elektrik tüketiminin (kWh/ton çimento) 2011 yılındaki değerlerde sabit kaldığı varsayılmıştır. Aynı şekilde 2011 yılında kullanılan yakıt

oranları da değiştirilmemiştir. Bu senaryonun oluşturulmasındaki amaç, teknoloji takip edilmediği durumda 2023, 2030 ve 2050 yıllarında ne kadar sera gazı emisyonu oluşacağını belirlemektir. Senaryo 1'de kullanılan veriler Çizelge 7.8'de gösterilmektedir.

Çizelge 7.8 Senaryo 1 (S1) verileri

	2011	2023	2030	2050
Çimento (milyon ton)	64,3	99,8	122,9	221,9
Klinker (milyon ton)	54,3	84,5	104,5	188,6
Toplam Yakıt Tüketimi (MJ/ton klinker)	3500	3500	3500	3500
İthal kömür (%)	38	38	38	38
Petrokok (%)	35	35	35	35
Yerli linyit (%)	36	36	36	36
Yerli taş kömürü (%)	3,8	3,8	3,8	3,8
Doğalgaz (%)	0,1	0,1	0,1	0,1
Alternatif yakıt (%)	3	3	3	3
Elektrik Tüketimi (MWh/ton klinker)	0,12	0,12	0,12	0,12

7.5.2.2. Senaryo 2 (S2)

İkinci senaryoda, 2011-2050 yılları arasında çimento ve klinker üretim miktarlarındaki artış göz önünde bulundurulmuştur. Bunun yanında, birim yakıt tüketiminin (MJ/ton klinker) ve birim elektrik tüketiminin (kWh/ton çimento), birtakım teknolojik iyileştirmelerden veya yenilemelerden dolayı 2011 yılına göre belirli oranlarda azaldığı varsayılarak bu senaryo hazırlanmıştır. Aynı zamanda yakıt türlerine ait kullanım oranları da değiştirilmiştir.

Yakıt tüketiminde 2011 yılında bir ton klinker için 3500 MJ enerji kullanılıyorken bu oranın 2023, 2030 ve 2050 yıllarında enerjinin daha verimli kullanılması ile 2050 yılında 3300 MJ'e kadar düştüğü varsayılmıştır. İthal kömür, petrokok ve linyitin kullanım oranının zamanla azaldığı; buna karşın yerli taş kömürünün kullanım oranının belirli miktar arttığı varsayılmıştır. Bunun sebebi, dünyada yerli kaynakların tüketiminde olan artışın ülkemizde de olacağının öngörülmesidir. Aynı zamanda bu senaryoda sera gazı emisyon faktörleri fosil yakıtlara göre daha düşük olan, BAT olarak da tavsiye edilen alternatif yakıt kullanım

oranının %3'ten %8'e çıktığı; yaklaşık %0,2 olan doğal gaz kullanım oranının 2030'da %0,3'e, 2050'de %0,6'ya çıktığı varsayılmıştır. Elektrik tüketim değerinin ise bir ton klinker için 2011 yılında 0,12 MWh iken 2050 yılında 0,1 MWh'e düştüğü varsayılmıştır (Çizelge 7.9).

Çizelge 7.9 Senaryo 2 (S2) verileri

	2011	2023	2030	2050
Çimento (milyon ton)	64,3	99,8	122,9	221,9
Klinker (milyon ton)	54,3	84,5	104,5	188,6
Yakıt Tüketimi (MJ/ton klinker)	3500	3450	3400	3300
İthal kömür (%)	38	37	34	28
Petrokok (%)	35	35	32,7	26
Yerli linyit (%)	36	21	23	27,4
Yerli taş kömürü (%)	3,8	3,8	5	8
Doğalgaz (%)	0,2	0,2	0,3	0,6
Alterantif yakıt (%)	3	3	5	8
Elektrik Tüketimi (MWh/ton klinker)	0,12	0,12	0,11	0,1

7.5.2.3. Senaryo 3 (S3)

Üçüncü senaryoda, 2011-2050 yılları arasında çimento ve klinker üretim miktarlarındaki artış göz önünde bulundurulmuştur. Üretim miktarı yanında, birim yakıt tüketiminin (MJ/ton klinker) ve birim elektrik tüketiminin (kWh/ton çimento), 2. Senaryoya göre daha çok azaldığı, mevcut en iyi teknolojilerin ise tamamının uygulandığı varsayılarak bu senaryo oluşturulmuştur.

Yakıt tüketiminde 2011 yılında bir ton klinker için 3500 MJ enerji kullanılıyorken bu oran 2023, 2030 ve 2050 yıllarında enerjinin daha verimli kullanılması ile 2050 yılında BAT olarak tanımlanmış olan 3000 MJ'e kadar düştüğü varsayılmıştır. 2. senaryoda olduğu gibi bu senaryoda da ithal kömür, petrokok ve linyitin kullanım oranının zamanla azaldığı; buna karşın yerli taş kömürünün kullanım oranının %10'a kadar arttığı varsayılmıştır. Ayrıca, bu senaryoda alternatif yakıt kullanım oranının 2050 yılında %35'e kadar çıktığı, doğalgaz kullanım oranının ise 2050'de %20'ye kadar çıktığı varsayılmıştır. Elektrik tüketim değerinin ise 2011 yılında bir ton klinker için 0,12 MWh iken 2050 yılında BAT olarak tanımlanmış olan

0,1 MWh'e düştüğü varsayılmıştır. Bu değerler ülkemiz için belirlenen yıllar için gerçek değerleri yansıtmıyor olabilir. Bu senaryoyu oluşturmadaki amaç, mevcut en iyi teknolojilerin tamamı kullanıldığında ve

Çizelge 7.10'da belirtilen değerlere ulaşıldığı durumda ülkemizin CO₂ emisyonunun ne kadar azaldığını görebilmektir.

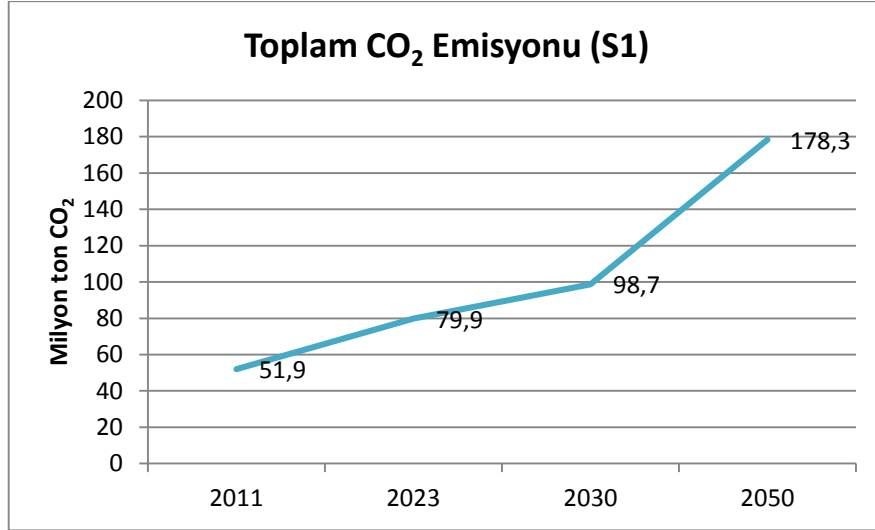
Çizelge 7.10 Senaryo 3 (S3) verileri

	2011	2023	2030	2050
Çimento (milyon ton)	64,3	99,8	122,9	221,9
Klinker (milyon ton)	54,3	84,5	104,5	188,6
Yakıt Tüketimi (MJ/ton klinker)	3500	3300	3200	3000
İthal kömür (%)	38	30	25	15
Petrokok (%)	35	30	25	10
Yerli linyit (%)	36	20	14	10
Yerli taş kömürü (%)	3,8	5	6	10
Doğalgaz (%)	0,2	5	10	20
Alterantif yakıt (%)	3	10	20	35
Elektrik Tüketimi (MWh/ton klinker)	0,12	0,11	0,1	0,09

7.5.1. Senaryolara Göre Hesaplanan CO₂ Miktarı

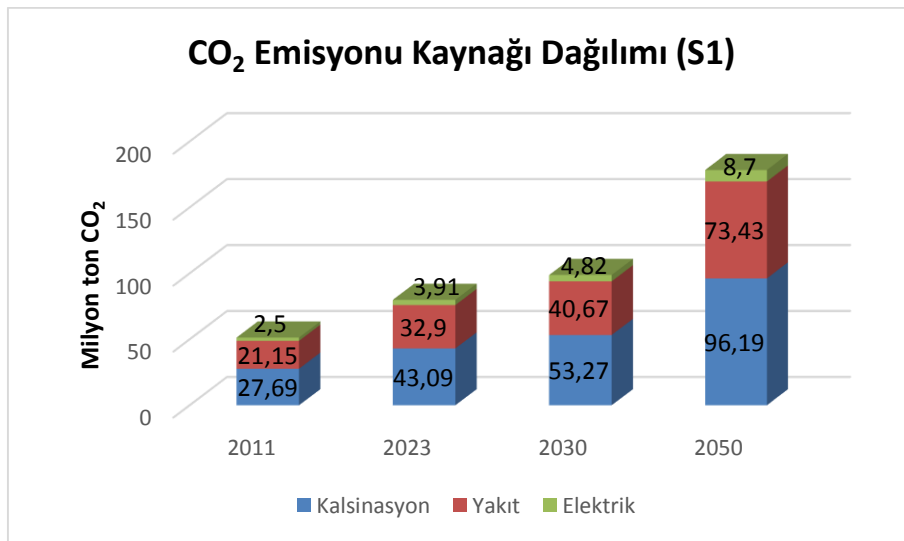
7.5.1.1. Senaryo 1

CO₂ emisyonu miktarı, uygulama kullanılarak hesaplanmıştır. Senaryo sonucunda aşağıdaki şekilde de görüldüğü üzere; sırasıyla 2023 yılında 79,9 milyon ton, 2030 yılında 98,7 milyon ton, 2050 yılında ise 178,3 milyon ton CO₂ emisyonu olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 7.6).



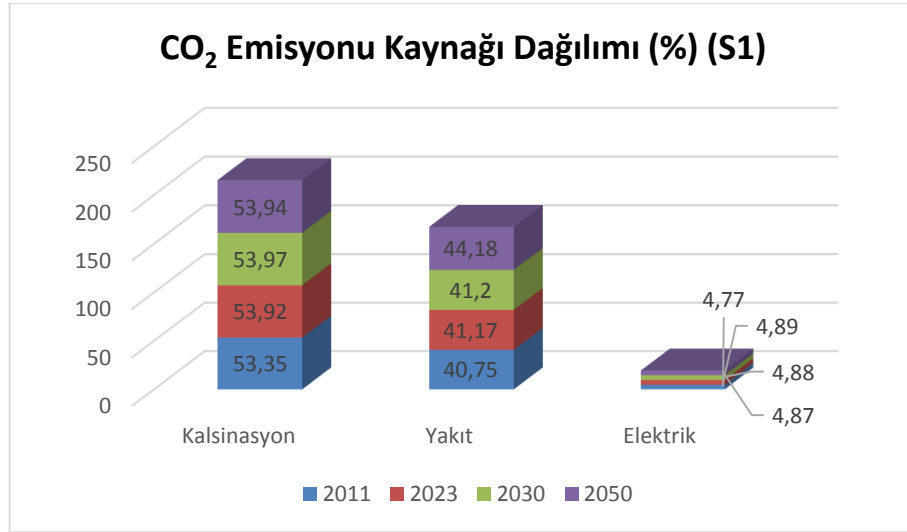
Şekil 7.6 Senaryo 1'e ait toplam CO₂ emisyonu

Emisyon kaynaklarının dağılımı açısından değerlendirildiğinde, en büyük emisyon kaynağının kalsinasyon olduğu görülmektedir. Kalsinasyondan sonra sırasıyla yakıt ve elektrik tüketiminden kaynaklanan emisyonlar gelmektedir (Şekil 7.7). Bu senaryoda, birim yakıt tüketimi ve birim elektrik tüketiminin 2011 yılındaki değerlerde sabit kaldığı fakat klinker üretimi arttığı varsayıldığından kalsinasyon, yakıt ve elektrik tüketiminden kaynaklanan emisyonlar sürekli artış göstermiştir. Fakat % olarak bakıldığında kalsinasyon, yakıt ve elektrik için 2023, 2030 ve 2050 yıllarında 2011 yılındaki sonuçlarla neredeyse aynı sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Şekil 7.8).



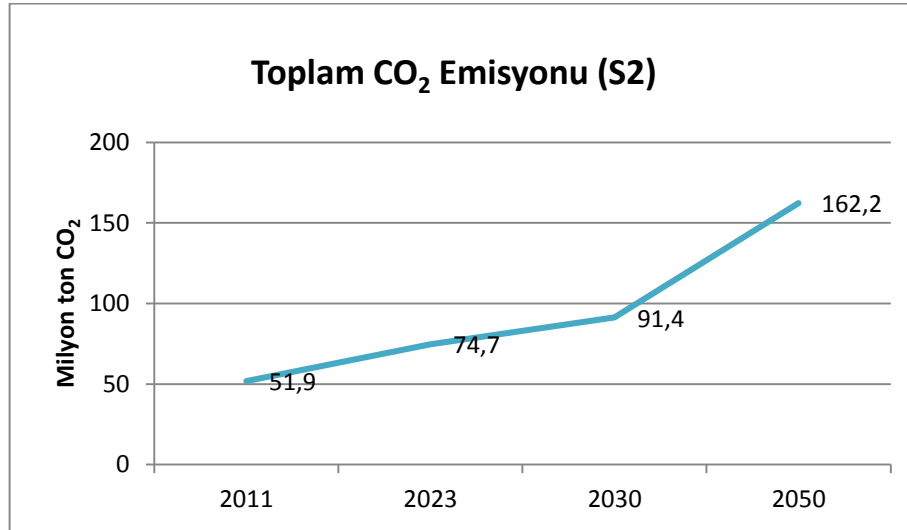
Şekil 7.7 Senaryo 1 için kaynak bazında CO₂ emisyonunun m. ton olarak yıllara göre dağılımı

Emisyon kaynaklarının dağılımı yüzde olarak Şekil 7.8’de gösterilmektedir.



Şekil 7.8 Senaryo 1 için kaynak bazında CO₂ emisyonunun yüzde olarak yıllara göre dağılımı

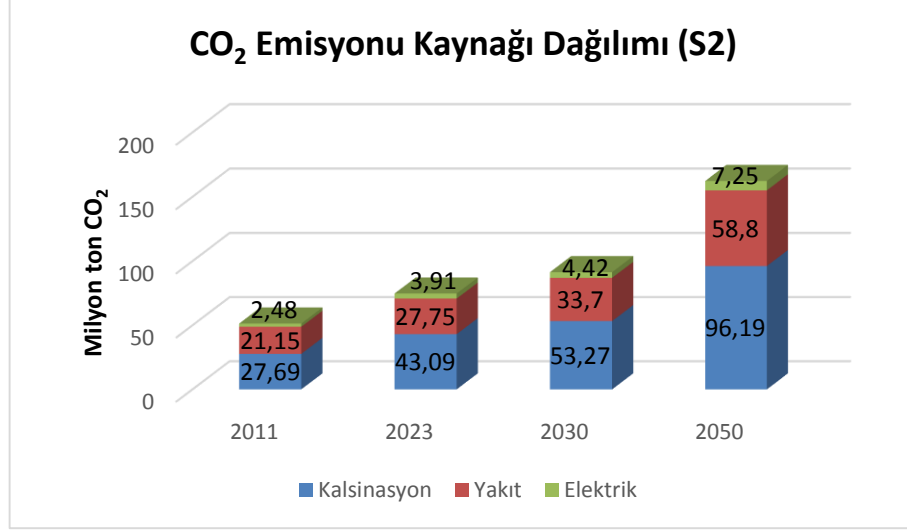
CO₂ emisyonu miktarı, Senaryo 1’de olduğu gibi uygulama kullanılarak hesaplanmıştır. Senaryo sonucunda Şekil 7.9’de görüldüğü üzere; sırasıyla 2023 yılında 74,7 milyon ton, 2030 yılında 91,4 milyon ton, 2050 yılında ise 162,2 milyon ton CO₂ emisyonu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 7.9 Senaryo 2’ye ait toplam CO₂ emisyonu

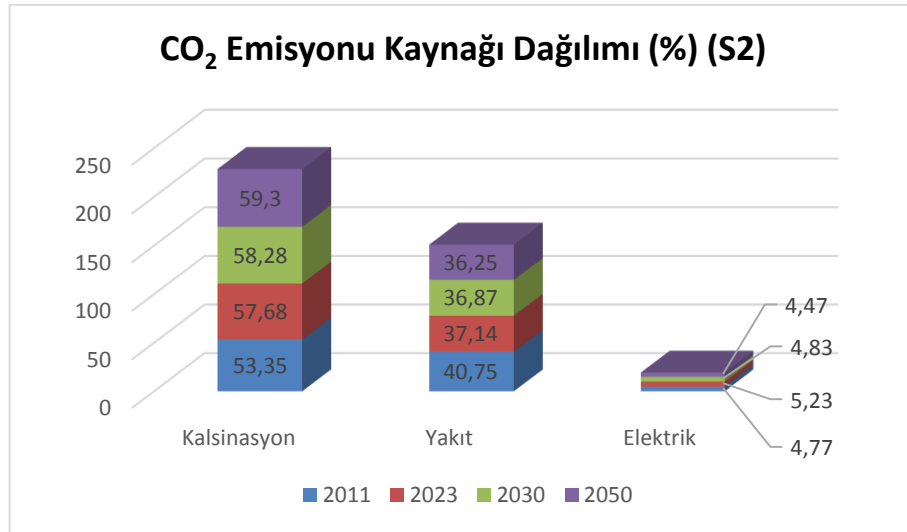
Emisyon kaynaklarının dağılımı açısından değerlendirildiğinde, en büyük emisyon kaynağının ilk senaryoda olduğu gibi kalsinasyon olduğu görülmektedir (Şekil 7.10). Senaryo 1’deki sonuçlar ile kıyaslandığında, sera gazı emisyon faktörü düşük olan yakıtların kullanılması, yakıt tüketimi ve elektrik tüketimi değerlerinin

düşmesi ile aynı üretim miktarlarıyla toplam CO₂ emisyonu miktarı açısından 2023 yılında yaklaşık %6, 2030 yılında %7, 2050 yılında ise %9 oranında azaltım sağlandığı görülmektedir. Kalsinasyondan kaynaklanan emisyonlar, üretim miktarı aynı olduğundan değişmemiştir. En fazla azaltımın yakıt tüketiminde olduğu görülmektedir.



Şekil 7.10 Senaryo 2 için kaynak bazında CO₂ emisyonunun m. ton olarak yıllara göre dağılımı

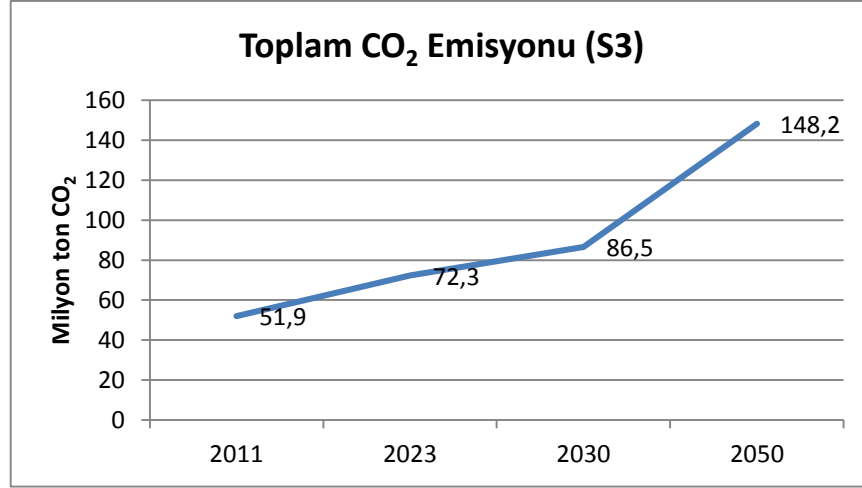
Emisyon kaynaklarının dağılımı yüzde olarak Şekil 7.11’de gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde, kalsinasyondan kaynaklanan CO₂’nin üretim miktarındaki artıştan dolayı arttığı fakat yakıt ve elektrik tüketimden kaynaklanan CO₂’nin ise birim yakıt ve elektrik tüketimindeki azaltımlardan dolayı belirli miktar azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.11 Senaryo 2 için kaynak bazında CO₂ emisyonunun yüzde olarak yıllara göre dağılımı

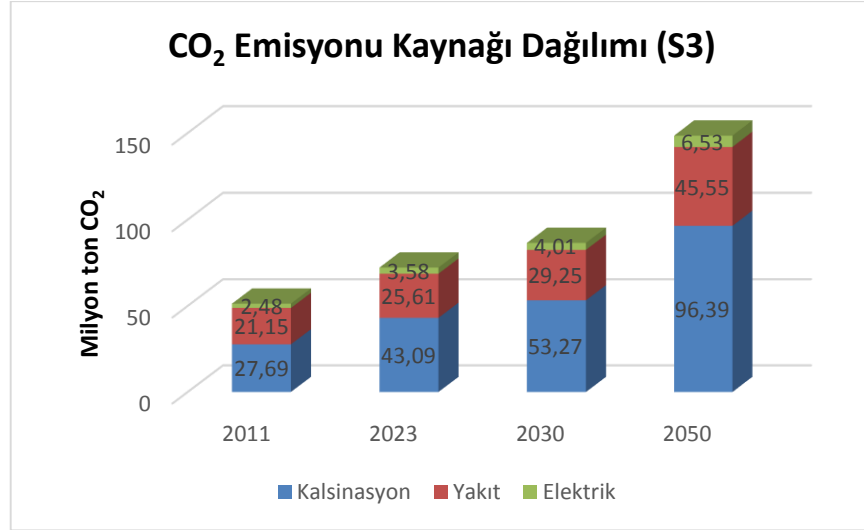
7.5.1.2. Senaryo 3

CO₂ emisyonu miktarı, Senaryo 1 ve 2'de olduğu gibi hesaplama aracı kullanılarak hesaplanmıştır. Senaryo sonucunda Şekil 7.12'da görüldüğü üzere; sırasıyla 2023 yılında 72,3 milyon ton, 2030 yılında 86,5 milyon ton, 2050 yılında ise 148,2 milyon ton CO₂ emisyonu olduğu sonucuna varılmıştır.

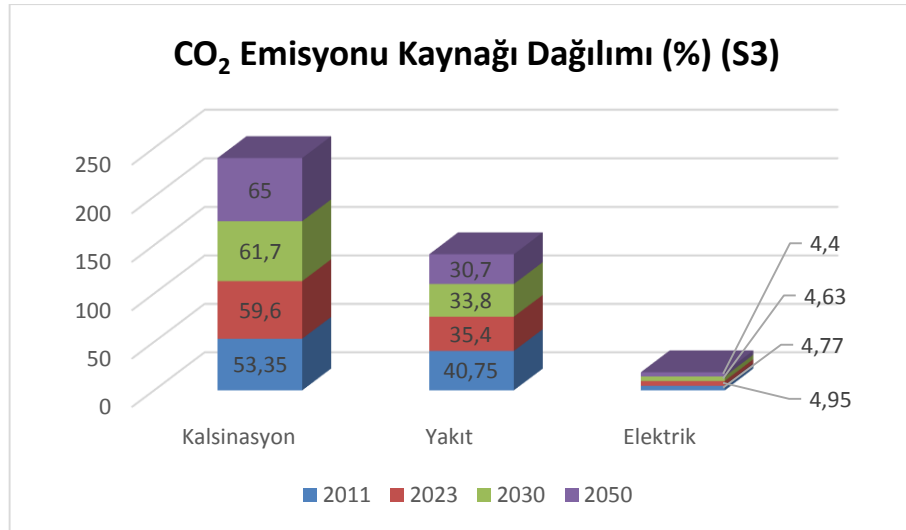


Şekil 7.12 Senaryo 3'e ait toplam CO₂ emisyonu

Emisyon kaynaklarının dağılımı açısından değerlendirildiğinde, en büyük emisyon kaynağının yine kalsinasyon olduğu görülmektedir (Şekil 7.13). Yakıt ve elektrik tüketiminden kaynaklanan yıllara göre CO₂ emisyonu miktarındaki azaltımın mevcut en iyi teknolojilere geçilmesiyle diğer senaryolara kıyasla daha fazla azaldığı görülmektedir. Emisyon kaynaklarının dağılımı yüzde olarak Şekil 7.14'te gösterilmektedir.



Şekil 7.13 Senaryo 1 için kaynak bazında CO₂ emisyonunun m. ton olarak yıllara göre dağılımı



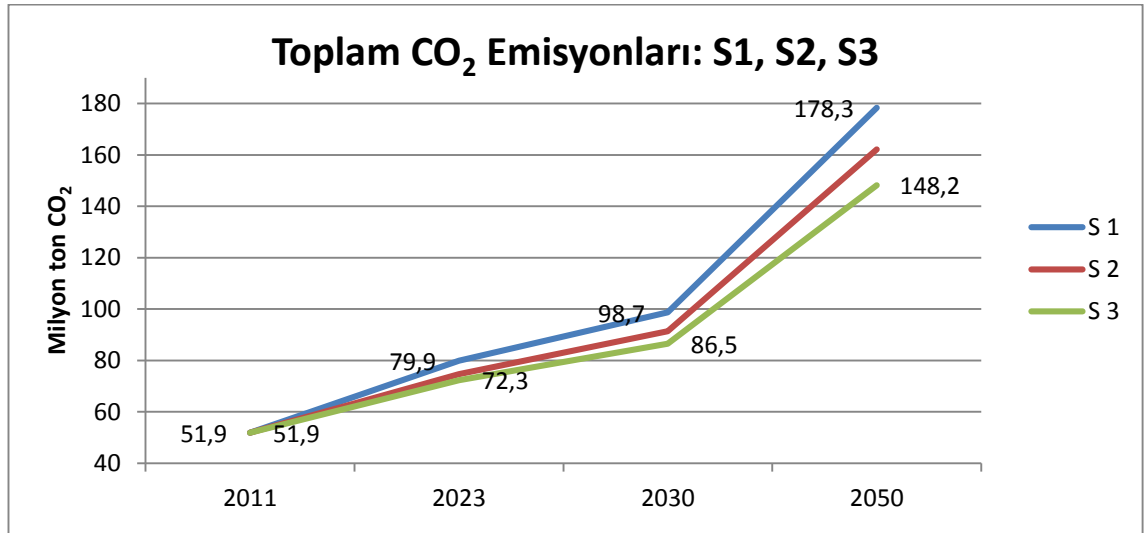
Şekil 7.14 Senaryo 2 için kaynak bazında CO₂ emisyonunun yüzde olarak yıllara göre dağılımı

7.5.2. Senaryoların Karşılaştırılması

Oluşturulan senaryolar başında hesaplanan CO₂ emisyonları kıyaslandığında, tüm senaryolarda kalsinasyondan kaynaklanan CO₂ emisyonu miktarının en yüksek olduğu, ardından sırasıyla yakıt ve elektrik tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının geldiği görülmektedir. Literatürde ulaşılan bilgi de aynı doğrultudadır. Dünyada çimento sektöründe faaliyet gösteren tesisler incelendiğinde ortalama olarak kalsinasyon prosesinden kaynaklanan CO₂ emisyonları toplam CO₂ emisyonunun yaklaşık %50'sini oluştururken yakıt tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonu yaklaşık %40 civarındadır [5]. Senaryo 2'de CO₂ emisyonu düşük olan yakıtların

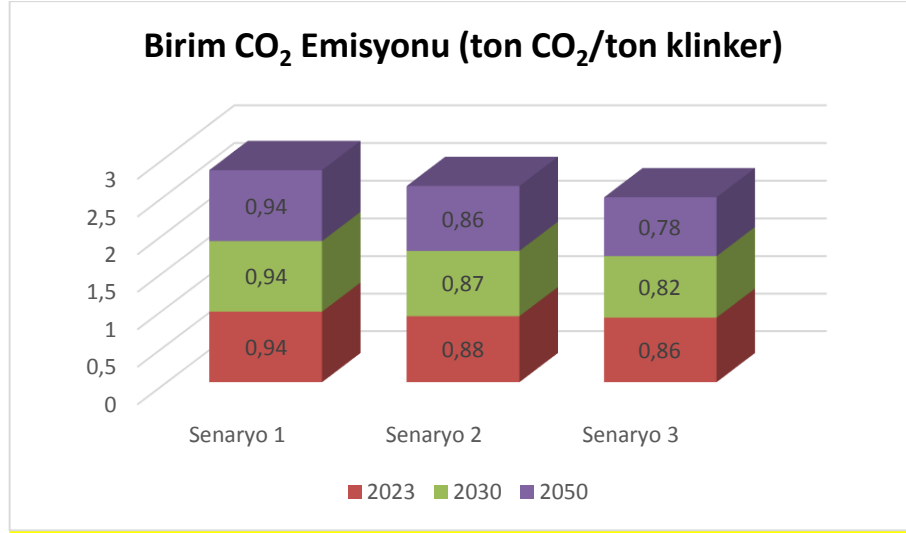
kullanılması ve mevcut en iyi teknolojilerin kısmen uygulanması sonucu, Senaryo 1'e göre toplam sera gazı emisyonu miktarının 2050 yılında yaklaşık %9 oranında azaldığı görülmektedir. Senaryo 3'te ise mevcut en iyi teknolojilerin tamamının uygulandığı, alternatif yakıt tüketiminin ve doğalgaz kullanımının yüksek miktarda arttığı durumda, sera gazı emisyonlarının Senaryo 1'e göre 2023 yılında %9, 2030 yılında %12, 2050 yılında yaklaşık %17 azaldığı görülmektedir.

Senaryo 3, Senaryo 2 ile kıyaslandığında ise toplam CO₂ emisyonlarının Senaryo 2'ye göre 2023 yılında %3, 2030 yılında %5, 2050 yılında %8 azaldığı görülmektedir. Bu üç senaryonun birlikte yansıtıldığı grafik aşağıda gösterilmektedir (Şekil 7.15).



Şekil 7.15 Toplam CO₂ emisyonları: S1, S2, S3

Üç senaryoda üretilen birim klinker başına salınan CO₂ miktarları 2023, 2030 ve 2050 için hesaplanarak Şekil 7.16'da gösterilmiştir. Senaryo 1, Senaryo 2 ve Senaryo 3'ten elde edilen sonuçlara göre belirtilen yıllarda Senaryo 2'de Senaryo 1'e göre daha düşük; Senaryo 3'te ise en düşük birim CO₂ emisyonu değerlerine ulaşılmıştır. 1 ton klinker için en düşük CO₂ emisyonu miktarına 2050 yılında Senaryo 3'te ulaşılmıştır (0,78 ton CO₂/ton klinker). Bunun nedeni daha önce de belirtildiği gibi bu senaryoda en düşük birim yakıt ve elektrik tüketim değerlerine ulaşıldığı, alternatif yakıtların maksimum oranda kullanıldığı ve mevcut en iyi teknolojilerin tümünün uygulandığının varsayılmasıdır.



Şekil 7.16 Birim CO₂ emisyonu (ton CO₂/ton klinker)

8. SONUÇLAR

İnsan faaliyetleri sonucunda atmosfere salınan ve atmosferdeki miktarları sanayi devriminden günümüze kadar hızla artmış olan sera gazı emisyonlarının ısı tutma kapasiteleri nedeniyle küresel ısınmaya neden oldukları bilinmektedir. Sera etkisine sahip olan gazların başında saydam bir gaz olan CO₂ gelir. IPCC (2001) atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunun antropojenik CO₂ emisyonundan kaynaklandığını açıkça ifade etmektedir. Küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %5-7'si çimento tesislerinden kaynaklanmaktadır. IEA tarafından yapılan çalışmada 2006-2050 yılları arasında çimento üretiminin belli tahmini oranlarda artışlar göstererek, 2050 yılında düşük büyüme senaryosuna göre 3.7 milyar ton, yüksek büyüme senaryosuna göre 4.4 milyar ton olacağı tahmin edilmektedir. Ülkemiz için de sektörel büyüme trendi öngörülmektedir. Bu nedenle, sektörde emisyon azaltımının sağlanmasına yönelik önlemlerin alınması gerekmektedir.

Tez çalışması kapsamında Türkiye'nin çimento üretiminden kaynaklanan mevcut CO₂ emisyonları ve farklı senaryolar bazında CO₂ emisyon potansiyeli incelenmiştir. CO₂ emisyonu miktarını hesaplamak amacıyla C# programlama dili kullanılarak Windows ortamında çalışabilen “Çimento Üretiminn Kaynaklanan CO₂ Emisyonu Hesaplama Aracı” adlı bir bilgisayar uygulaması geliştirilmiştir. Bu uygulama kullanılarak herhangi bir çimento tesisine ait yıllık sera gazı emisyon toplamı hesaplanabilmekte ve çeşitli senaryolar oluşturulabilmektedir. Emisyon hesaplamaları sırasında IPCC tarafından önerilmiş olan metodoloji kullanılmıştır. Emisyonları hesaplama yaklaşımları, “Tier” şeklinde ifade edilen çeşitli seviyede yaklaşımlarla yapılmaktadır. IPCC, çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları hesaplarken Tier 1 ve Tier 2 yaklaşımlarını kullanmayı tavsiye etmektedir. Bu nedenle çalışmada, çimento üretiminde, procesten kaynaklanan CO₂ emisyonları hesaplanırken IPCC Tier 2 metodolojisi kullanılmıştır. Birincil yakıtlar, ikincil yakıtlar, elektrik tüketimi ve transportasyondan kaynaklanan CO₂ emisyonları hesaplanırken ise, yeterli veri bulunmadığından en temel yaklaşım olan IPCC Tier 1 yaklaşımı kullanılmıştır. Geliştirilen uygulama, ülkemizde faaliyet gösteren tesislerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını güvenilir ve hızlı bir şekilde hesaplamak için kullanılabilecektir.

Çalışmada geliştirilen uygulama kullanılarak ülkemizde çimento üretiminden kaynaklı CO₂ emisyonu projeksiyonu yansıtılmak üzere 3 farklı senaryo oluşturulmuştur. Senaryo 1, ülkemizde çimento sektörünün 2011 yılındaki teknik şartları koruduğu, yalnızca klinker ve çimento üretiminin arttığı varsayılan senaryodur. Senaryo 2'de mevcut en iyi teknolojilerin kısmen uygulandığı, alternatif yakıt tüketiminin ve doğal gaz tüketiminin belirli miktarda arttığı öngörülmüştür. Senaryo 3 ise, mevcut en iyi teknolojilerin tamamen uygulandığı, yakıt tüketimi (MJ/ton klinker) ve elektrik tüketiminin (kWh/ton çimento) Avrupa'daki en iyi tüketim derecesine ulaşıldığı varsayılan senaryodur.

Türk çimento sektörü, 2010 sonu itibarıyla Avrupa'da üretim ve ihracatta ilk sırada, dünyada ise ilk 10 üretici ve ilk 3 ihracatçı ülke arasında yer almaktadır. 65 milyon ton klinker, 106 milyon ton çimento üretme kapasitesine sahip olan sektör üretim hacmini gün geçtikçe arttırmaktadır. Literatür araştırması sırasında, Avrupa Komisyonu tarafından 2010 yılında yayınlanmış olan “2006 IPCC Çimento, Kireç ve Magnezyum Oksit İmalat Sanayilerinde Mevcut En İyi Teknolojiler” referans dokümanı incelenmiştir ve ülkemizin çimento üretiminde uygulanan döner fırın teknolojileri açısından Avrupa ülkeleriyle yakın seviyede olduğu görülmüştür. Bunun en büyük sebebi ülkemizdeki çimento tesislerinin neredeyse tamamına Avrupa'da faaliyet gösteren Heidelberg, Vicat, Cimpor, Cementir Holding gibi büyük şirketlerin ortak olmasıdır. Fakat ülkemiz alternatif yakıt kullanımı, alternatif hammadde kullanımı, elektrik enerjisi tüketimi, atık ısıdan enerji üretimi gibi teknolojiler açısından Avrupa ülkelerinin gerisinde kalmaktadır. Bu nedenle ülkemiz, küresel dünyada rekabet edebilmek için bu konularda kendisini geliştirmek durumundadır. Ülkemizde, çimento sektörünün giderek büyüyeceği ve 2023 yılında yaklaşık 100 milyon çimento üreteceği öngörülmektedir. Bu üretim artışı CO₂ emisyonu artışını da beraberinde getirecektir.

Son yayınlanan “TÜİK 1990-2010 Sera Gazı Envanteri” sonuçlarına göre CO₂ eşdeğeri olarak 2010 yılı toplam sera gazı emisyonunun 1990 yılına göre %115 artış gösterdiği görülmektedir. 2010 yılında kişi başı CO₂ eşdeğer emisyonu 5,51 ton/kişi olarak hesaplanmış olup, bu değer 1990 yılında 3,39 ton/kişidir. TÜİK envantörüne göre ülkemizde çimento üretiminden kaynaklı CO₂ emisyonlarının toplam CO₂ emisyonları içerisindeki payı 1990 yılında %7,45 iken 2010 yılında %8,86 'ya yükselmiştir.

Çalışma kapsamında oluşturulan senaryolar kıyaslandığında; Senaryo 2'de Senaryo 1'e göre toplam CO₂ emisyonu miktarının 2050 yılında %9 oranında azaldığı görülmektedir. Senaryo 3'te ise CO₂ emisyonlarının 2050 yılında Senaryo 1'e göre, yaklaşık %17; Senaryo 2'ye göre %8 oranında azaldığı görülmektedir. Bu durum, ülkemizde çimento sektöründe şartlar sağlandığında en az %8'lik bir sera gazı emisyon azaltım potansiyeli bulunduğunu sonucunu göstermektedir. Çünkü bu senaryo, 3 senaryo içinde ülkemiz için en makul senaryodur ve bu senaryoda mevcut en iyi teknolojilere kısmen geçildiği düşünülmüştür, yakıt kullanım oranları ise ülkemiz için uygulanabilecek şekilde ayarlanmıştır. Senaryo 3'teki değerlere ulaşıldığı takdirde ise 2050 yılında %17'lik azaltım sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Göz önüne alınan senaryolar için CO₂ emisyon miktarları arasındaki farkın en büyük nedeni yakıt tüketimi (MJ/ton klinker) ve seçilen yakıt türüdür. Fosil yakıtların yerine alternatif yakıt kullanımının artırılması, fabrikaların bünyesinde RDF (Atıktan türetilmiş yakıt) tesislerinin kurulması veya CO₂ emisyonu doğalgaza göre neredeyse 2 kat daha fazla olan linyit veya petrokok kullanımını yerine doğalgaz tüketiminin artırılması CO₂ emisyonlarında ciddi azalmaya neden olmaktadır. Bunun dışında enerji verimliliği yüksek ekipman kullanılması, yeni değirmenlerin bilyalı değirmenler yerine valsli dik değirmenler olarak kurulması, atık ısıdan elektrik üretimi gerçekleştirme gibi uygulamalar da CO₂ emisyonlarında azaltıma katkıda bulunmaktadır. Bahsi geçen uygulamalar aynı zamanda enerji tüketimini de azalttığından, tesislere maddi kazanç da sağlamaktır. Bu nedenle dünyada ve ülkemizde bu uygulamalar giderek yaygınlaşmaktadır, çünkü rekabet edebilirlik bunu gerektirmektedir. Genel anlamda mevcut en iyi teknolojilerin uygulanmasıyla, yukarıda belirtilenlere ilaveten partikül madde, NO_x ve diğer azot bileşikleri, SO₂ ve diğer kükürt bileşikleri, toplam organik bileşikler (TOC), uçucu organik bileşikler (VOC), poliklorlu dibenzo-p-dioksinler ve dibenzofuranlar (PCDD'ler ve PCDF'ler), hidrojen florür (HF), hidrojen klorür (HCl) ve karbon monoksit (CO) gibi kirletici gazların da azalması sağlanacak, bu sayede hava kalitesine olumlu etkiye bulunulacaktır.

Bu çalışma, ülkemizde çimento sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarının hesaplanması ve senaryolar vasıtasıyla gelecek projeksiyonu oluşturma konusunda yapılan ilk tez çalışmasıdır.

Özet olarak; çimento endüstrisi için enerji verimliliğini arttırmak ve sera gazı emisyonlarını azaltmak amacıyla;

- Yeni fırınlar ve donanımı iyileştirilecek fırınlar için, en verimli olan uygun tekniklerin benimsenmesinin teşvik edilmesi, atık ısıdan enerji üretim tesislerinin sayılarının arttırılması
- Alternatif yakıt kullanımının teşvik edilmesi ve kolaylaştırılması, RDF kullanımının arttırılması ve RDF tesislerinin çimento fabrikalarına entegre edilmesi
- Çimentoya katılan katkı maddelerinin, klinker yerine geçmesinin teşvik edilmesi ve kolaylaştırılması, alternatif hammadde kullanımının arttırılması
- Katkılı çimento kullanımı konusunda toplumun bilinçlendirilmesi
- Karbon yakalama ve depolama konusunda çalışmaların arttırılması, AR-GE çalışmalarına önem verilmesi
- Uluslararası seviyede öngörülebilir ve tarafsız politikalar oluşturulmasının sağlanması, istikrarlı karbondioksit sınırlamalarının ve enerji çerçevelerinin çizilmesi
- Teknolojinin uygulanması konusunda uluslararası işbirliğinin ve kamu-özel sektör ortaklığının teşvik edilmesi tavsiye edilmektedir.

9. ÖNERİLER

Dünya nüfusundaki sürekli artış ve kentleşme sonucu her türlü konut ve altyapı için yeni ihtiyaçlar doğacaktır. Teknolojik gelişmeler sonucu daha kaliteli ve yüksek dayanımlı çimentolar yüksek binalarda, uzun açıklıklı yapılarda ve çeşitli mimari uygulamalarda daha fazla kullanım alanı bulacaktır.

Bu çalışmada çimento üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması üzerinde durulmuştur. Söz konusu azaltma yöntemleri temel alınarak çimento sektöründe geleceğe dönük yapılabilecek araştırma önerileri su şekilde sıralanabilir:

- Potansiyel düşük karbonlu çimentolar üretilebilir. Bir dizi düşük karbonlu veya negatif karbonlu çimento, günümüzde geliştirilmiş olup, önümüzdeki yıllarda uygulamaya geçirilmesi planlanmaktadır. Mekanik özellikleri portland çimentosuna benzemekle beraber, henüz uygulanabilirliği ispatlanmamış ve uzun dönemde uygunluğu test edilmemiştir. Potansiyel düşük karbonlu çimento üretimi, geleceğin araştırma konularından olacaktır. Geleceğin çimentoları olarak tanımlanan, halen standartlarımızda bulunan mineral katkı çimentolara ilaveten;
 - Fillerli çimentolar,
 - Kontrollü tane boyu dağılımlı çimentolar,
 - Alkali-silika reaksiyonu dirençli çimentolar,
 - Yüksek dayanımlı çimentolar,
 - Beyaz ve renkli çimentoların üretimi üzerinde çalışılabilir.
- Daha önce de belirtildiği gibi alternatif hammadde ve yakıtlar kullanarak çimento üretiminde emisyon azaltımı ile ilgili atıktan türetilmiş yakıt (RDF) kullanımına dair çalışmalar da önümüzdeki dönemlerde gündemde olacak çalışmalardır.
- Karbon yakalama ve depoma (CCS), yeni bir teknoloji olup, karbondioksit emisyonlarını azaltma konusunda gündemde olan bir konudur. Henüz çimento sektöründe endüstriyel boyutta kendini kanıtlamamıştır. Fakat bu konu gelecek vaat etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] G. Kılıç, A. Tanış, Ö. Karaca ve D. Özdemir, "İklim Değişikliğinin Etkilerinin Araştırılması Çalışma Grubu Raporu", T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı ve Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 2004.
- [2] A. Erdoğan, "İklim Değişikliği ile Mücadele Faaliyetlerinin Türk Çimento Sanayine Etkileri", DT Uzmanlık Tezi, Ankara, 2008.
- [3] Çevre ve Orman Bakanlığı, "Ulusal İklim Değişikliği Strateji Belgesi 2010-2020", Ankara, 2010.
- [4] Çevre ve Orman Bakanlığı, "İklim Değişikliği Birinci Ulusal Bildirimi", Ankara, 2007.
- [5] J. DeJaa, A. Uliasz, E. Mokrzycki, "CO₂ Emissions From Polish Cement Industry", International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010.
- [6] E. Gartner, "Industrially Interesting Approaches to 'Low-CO₂' Cements", Cement and Concrete Research, 2004.
- [7] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolio, "Sustainable Cement Production—Present and Future", Cement and Concrete Research, 2011.
- [8] C. Valderrama, R. Granados, J. L. Cortina, C. M. Gasol, M. Guillem, A. Josa, "Implementation of Best Available Techniques in Cement Manufacturing: A Life-Cycle Assessment Study", Journal of Cleaner Production, 2012.
- [9] N. Pardo, J. A. Moya, A. Mercier, "Prospective on The Energy Efficiency And CO₂ Emissions in The EU Cement Industry", Energy, 2011.
- [10] N. A. Madloola, R. Saidur, M. S. Hossain, N. A. Rahim, "A Critical Review on Energy Use And Savings in The Cement Industries", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.
- [11] J. A. Moya, N. Pardo, A. Mercier, "The Potential For Improvements in Energy Efficiency and CO₂ Emissions in The EU27 Cement Industry and The Relationship With The Capital Budgeting Decision Criteria", Journal of Cleaner Production, 2011.
- [12] J. Ke, M. McNeil, L. Price, N. Z. Khanna, N. Zhou, "Estimation Of CO₂ Emissions From China's Cement Production: Methodologies And Uncertainties", Energy Policy, 2013.

- [13] E. Okandan, Y. Karakece, H. Çetin, İ. Topkaya, M. Parlaktuna, S. Akın, S. Bulbul, C. Dalha, S. Anbar, C. Cetinkaya, I. Ermis, M. Yılmaz, V. Ustun, K. Yapan, A. T. Erten, Y. Demiralın, E. Akalan, "Assessment Of CO₂ Storage Potential in Turkey, Modeling and A Prefeasibility Study For Injection into An Oil Field", Energy Procedia, 2011.
- [14] K. Kaygusuz, " Energy and Environmental Issues Relating to Greenhouse Gas Emissions For Sustainable Development in Turkey", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007.
- [15] M. Z. Sogut M, "A Research on Exergy Consumption and Potential Of Total CO₂ Emission in The Turkish Cement Sector", Energy Conversion and Management, 2012.
- [16] M. Arıkan, "Feasibility Analysis of Manufacturing High Performance-Ecological-Cement in Turkey", Building and Environment, 2004.
- [17] M. Kara, E. Günay, Y. Tabak, Ş. Yıldız, V. Enç, "Atıktan Türetilmiş Yakıtın Çimento Üretiminde Emisyon Açısından İrdelenmesi", Nuclear&Renewable Energy Resources Conference, Ankara, 2009.
- [18] N. Yıldız, "Çimento Üretimi", Ertem Basım, Ankara, 2012.
- [19] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Türkiye Çimento İstatistikleri, 2012.
<http://www.tcma.org.tr>
- [20] International Cement Review, "Global Cement Report, 9th Edition", 2011.
<http://www.cemnet.com/publications/global-cement-report>
- [21] The European Cement Association, "Cembureau Activity Report 2010", 2011.
<http://www.cembureau.eu/activity-reports>
- [22] T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, "Çimento Sektörü Raporu, 2012/1", Ankara, 2012.
- [23] The European Cement Association, "Cembureau Activity Report 2011", 2012.
<http://www.cembureau.eu/activity-reports>
- [24] Ö. Kuleli, "Çimento Mühendisliği El Kitabı", TÇMB/AR-GE, Ankara, 2010.
- [25] The European Cement Association, "Sustainable Cement Production: Co-processing of Alternative Fuels and Raw Materials in the Cement Industry", 2009.
<http://www.cembureau.eu/sustainable-cement-production-co-processing-alternative-fuels-and-raw-materials-cement-industry>

- [26] IPCC BREF 2010, European Commission, "Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries", Mayıs 2010.
- [27] K. Othmer, "Encyclopedia of Chemical Technology", Volume 5, J.Wiley & Sons, 1993.
- [28] CO2CRC, Greenhouse Gas Technologies, Ekim 2012.
<http://www.co2crc.com.au>
- [29] H.F.W. Taylor, "Cement Chemistry", 2nd Edition, Thomas Telford, London, 1997.
- [30] E. K. Peray, "The Rotary Cement Kiln", Chemical Publishing Co. Inc., New York, 1986.
- [31] DAL Makina, Ekim 2012.
http://www.dal.com.tr/tr/id_802
- [32] H. Joachim, "Trends in the packing and palletising of cement", Zement Kalk Gips, 2008.
- [33] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, "İklim Değişikliği Ulusal Eylem Planı 2011-2020", Ankara, 2011.
- [34] NCDC, National Climatic Data Center, Ocak 2012.
<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/ctl/about1a.html>
- [35] EPA, United States Environmental Protection Agency, 2006.
<http://yosemite.epa.gov/OAR/globalwarming.nsf/content/climate.html>
- [36] Y. Muslu, Ekoloji ve Çevre Sorunları, pp 223, 255-260, Aktif Yayınevi, İstanbul, 2000.
- [37] T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, İklim Değişikliği Koordinasyon Kurulu, 2006. <http://www.iklim.cevreorman.gov.tr>
- [38] D. L. Albritton, R. J. Cicerone, E. J. Barron, R. E. Dickinson, I. Y. Fung, J. E. Hansen and T. R. Karl, "Climate Change Science: An Analysis of Some Key Questions, pp9-14, Committee on Science of Climate Change", National Academy Press, Washington, D.C., 2001.
- [39] M. Gillenwater, M. M. Van Pelt and K. Peterson, "Greenhouse Gases And Global Warming Potential Values, Exerpt From The Inventory of US Greenhouse Emissions And Sinks: 1990-2000", pp 4-9, US Environmental Protection Agency, USA, 2002.

- [40] EPA, "Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2007", Washington, DC 20460 U.S.A, EPA 430-R-09-004, April 2009.
- [41] D. J. Jacob, "Introduction to Atmospheric Chemistry", Princeton University Press, 1999.
- [42] IPCC TAR WG1, J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. Van Der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. A. Johnson, "Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press, ISBN 0-521-80767-0 (pb: 0-521-01495-6), 2001.
- [43] IPCC AR4, "The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press, 2007.
- [44] IPCC SAR WG1, J. T. Houghton, L.G. Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, "Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press, ISBN 0-521-56433-6. (pb: 0-521-56436-0), 1996.
- [45] T. C. Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı, 2012.
http://www.eie.gov.tr/iklim_deg/emisyon_ticareti.aspx
- [46] Başbakanlık, Türkiye İstatistik Kurumu, Sera Gazı Emisyon Envanteri 1990-2010, Sayı 13141, 2012.
- [47] U.S. Environmental Protection Agency, 2008b, "Cement Process-Related CO₂ Emissions Calculation Methodology: a Review of Existing Reporting Programs", Climate Change Division, 2008.
- [48] IPCC, "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme", 2006.
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>
- [49] H. Van Oss and A. Padovani, "Cement Manufacture and the Environment. Part I: Chemistry and Technology", Journal of Industrial Ecology, 2002.
- [50] H. Van Oss, Personal Communication with Hendrik Van Oss, 2005.
- [51] World Business Council for Sustainable Development, "The Cement CO₂ Protocol: CO₂ Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry, Version 2", 2005.

- [52] International Energy Agency, “CO₂ Emissions From Fuel Combustion: Beyond 2020 Documentation 2010 Edition”, 2010.
- [53] World Business Council for Sustainable Development & Cement Sustainability Initiative, “The Cement CO₂ and Energy Protocol, Version 3”, 2011.
- [54] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, “Küresel Çimento Endüstrisinde Düşük Karbonlu Geleceğe Doğru”, Çimento ve Beton Dünyası Dergisi, Ankara, 2010.
- [55] Devkaynak, 2012.
<http://www.devkaynak.com/tag/c-nedir/>

ÖZGEÇMİŞ

Kumru RENDE, 1984 yılında Adana’da doğdu. İlkokul öğrenimini Dumlupınar İlkokulu’nda, Orta ve Lise öğrenimini Gebze Anibal Anadolu Lisesi’nde tamamladı ve 2003 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Kimya Mühendisliği bölümüne girmeye hak kazandı. Buradaki öğrenimini 2007 yılında tamamladı ve aynı yıl Oktay Karakoç Dış Ticaret A.Ş. firmasında ar-ge mühendisliği ile iş hayatına başladı. Daha sonra Kırıkkale’de MKEK Barut Fabrikası’nda kalite güvence mühendisi olarak çalıştı. 2009 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü’nde Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen, TUBİTAK, Marmara Araştırma Merkezi, Çevre Enstitüsü’nde araştırmacı olarak çalışmaktadır.

Ek-1 Program Kodu Örneği

İlk Değer Atama Bölümü (Form1.Designer.cs)

```

/// <summary>
/// Required designer variable.
/// </summary>
private System.ComponentModel.IContainer components = null;

// Sabitler
double dF = 1.02;

// Klinker Üretimi Degiskenler
double eFKals = 0;
double eMC02Kals = 0;

// Yakıt Tüketimi Sabitleri
double kefLi = 27.6;
double kefPet = 27.5;
double kefTk = 25.8;
double kefFo = 20.2;
double kefLpg = 17.2;
double kefDg = 15.3;
double Co2Li = 0;
double Co2Pet = 0;
double Co2Tk = 0;
double Co2Fo = 0;
double Co2Lpg = 0;
double Co2Dg = 0;
double eMC02Yak = 0;

// Alternatif Yakıt Sabitleri
double efK1 = 85;
double efAc = 83;
double efAy = 74;
double efRa = 83;
double efKa = 80;
double efKya = 80;
double efSya = 74;
double efSa = 74;
double efPka = 110;
double efDig = 80;
double Co2K1 = 0;
double Co2Ac = 0;
double Co2Ay = 0;
double Co2Ra = 0;
double Co2Ka = 0;
double Co2Kya = 0;
double Co2Sya = 0;
double Co2Sa = 0;
double Co2Pka = 0;
double Co2Dig = 0;
double eMC02AltYak = 0;

// Enerji Tüketimi
double efEnerji = 537;
double toplamEnerji = 0;
double eMC02Enerji = 0;

```

```

// Transportasyon Sabitleri
double efDizel = 74.1;
double efBenzin = 69.3;
double efLpg = 63.1;
double eMC02Diz;
double eMC02Ben;
double eMC02Lpg;
double eMC02Transp = 0;

// Senaryo Sabitleri
double efIthalKom = 96;
double efPetroKok = 92.8;
double efYerliLin = 101;
double efTaskom = 96;
double efDogalgaz = 56.1;
double efAltYak = 74;
double efKalsinas = 0.51;
double efElektrik = 327;

// OverAll Emisyon
double overAllEmisyon = 0;

```

Ana Program İşleyişi; (Form1.cs)

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace SeraGazi
{
    public partial class Form1 : Form{

        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
            InitializeVariables();
        }

        // Designer ın yapamadığı ilklendirmeleri yapar
        private void InitializeVariables()
        {
            // Tab 1
            this.textBox7.Text = this.kefLi.ToString();
            this.textBox8.Text = this.kefPet.ToString();
            this.textBox10.Text = this.kefTk.ToString();
            this.textBox9.Text = this.kefFo.ToString();
            this.textBox16.Text = this.kefLpg.ToString();
            this.textBox15.Text = this.kefDg.ToString();

            // Tab 2
            this.textBox28.Text = this.efK1.ToString();
            this.textBox27.Text = this.efAc.ToString();
            this.textBox24.Text = this.efAy.ToString();
            this.textBox23.Text = this.efRa.ToString();

```

```

        this.textBox20.Text = this.efKa.ToString();
        this.textBox19.Text = this.efKya.ToString();
        this.textBox36.Text = this.efSya.ToString();
        this.textBox33.Text = this.efSa.ToString();
        this.textBox32.Text = this.efPka.ToString();
        this.textBox38.Text = this.efDig.ToString();

        // Tab 3
        this.textBox4.Text = this.efDizel.ToString();
        this.textBox40.Text = this.efBenzin.ToString();
        this.textBox42.Text = this.efLpg.ToString();

        // Tab 4
        this.textBox58.Text = this.efIthalKom.ToString();
        this.textBox57.Text = this.efPetroKok.ToString();
        this.textBox54.Text = this.efYerliLin.ToString();
        this.textBox53.Text = this.efTasKom.ToString();
        this.textBox50.Text = this.efDogalgaz.ToString();
        this.textBox49.Text = this.efAltYak.ToString();
        this.textBox48.Text = this.efKalsinas.ToString();
        this.textBox66.Text = this.efElektrik.ToString();
    }

    private void numericUpDown1_ValueChanged(object sender, EventArgs e)
    {
        eFKals= (Convert.ToDouble(numericUpDown1.Value / 100) *
(43.97/56.03));
        textBox1.Text = eFKals.ToString();
    }

    private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        eMC02Kals = eFKals * Convert.ToDouble(numericUpDown2.Value) * dF;
        textBox2.Text = eMC02Kals.ToString();

        updateOverAllEms();
    }

    private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        eMC02Kals = 0;
        textBox2.Clear();
        updateOverAllEms();
    }

    private void checkBox4_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
    {
        if (checkBox4.Checked == true)
        {
            this.numericUpDown8.Enabled = true;
            this.numericUpDown9.Enabled = true;
            this.textBox12.Enabled = true;
        }
        else
        {
            this.numericUpDown8.Enabled = false;
            this.numericUpDown9.Enabled = false;
            this.textBox12.Enabled = false;
            this.textBox12.Clear();
            this.numericUpDown8.ResetText();
        }
    }

```

```

        this.numericUpDown9.ResetText();
        Co2Li = 0;
    }
}

private void checkBox3_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (checkBox3.Checked == true)
    {
        this.numericUpDown6.Enabled = true;
        this.numericUpDown10.Enabled = true;
        this.textBox11.Enabled = true;
    }
    else
    {
        this.numericUpDown6.Enabled = false;
        this.numericUpDown10.Enabled = false;
        this.textBox11.Enabled = false;
        this.textBox11.Clear();
        this.numericUpDown6.ResetText();
        this.numericUpDown10.ResetText();
        Co2Pet = 0;
    }
}

private void checkBox6_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (checkBox6.Checked == true)
    {
        this.numericUpDown12.Enabled = true;
        this.numericUpDown7.Enabled = true;
        this.textBox14.Enabled = true;
    }
    else
    {
        this.numericUpDown12.Enabled = false;
        this.numericUpDown7.Enabled = false;
        this.textBox14.Enabled = false;
        this.textBox14.Clear();
        this.numericUpDown12.ResetText();
        this.numericUpDown7.ResetText();
        Co2Tk = 0;
    }
}

private void checkBox5_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (checkBox5.Checked == true)
    {
        this.numericUpDown11.Enabled = true;
        this.numericUpDown5.Enabled = true;
        this.textBox13.Enabled = true;
    }
    else
    {
        this.numericUpDown11.Enabled = false;
        this.numericUpDown5.Enabled = false;
        this.textBox13.Enabled = false;
        this.textBox13.Clear();
        this.numericUpDown11.ResetText();
        this.numericUpDown5.ResetText();
        Co2Fo = 0;
    }
}

```

```

    }
}

private void checkBox8_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (checkBox8.Checked == true)
    {
        this.numericUpDown16.Enabled = true;
        this.numericUpDown14.Enabled = true;
        this.textBox18.Enabled = true;
    }
    else
    {
        this.numericUpDown16.Enabled = false;
        this.numericUpDown14.Enabled = false;
        this.textBox18.Enabled = false;
        this.textBox18.Clear();
        this.numericUpDown16.ResetText();
        this.numericUpDown14.ResetText();
        Co2Lpg = 0;
    }
}

private void checkBox7_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (checkBox7.Checked == true)
    {
        this.numericUpDown15.Enabled = true;
        this.numericUpDown13.Enabled = true;
        this.textBox17.Enabled = true;
    }
    else
    {
        this.numericUpDown15.Enabled = false;
        this.numericUpDown13.Enabled = false;
        this.textBox17.Enabled = false;
        this.textBox17.Clear();
        this.numericUpDown15.ResetText();
        this.numericUpDown13.ResetText();
        Co2Dg = 0;
    }
}

private void button4_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (this.checkBox4.Checked == true)
    {
        this.Co2Li = ((double)this.numericUpDown8.Value *
(double)this.numericUpDown9.Value * 1000 * 4.18618 * ((double)Math.Pow(0.1, 9))
* kefLi * 1 * 44 / 12);
        textBox12.Text = Co2Li.ToString();
    }
    if (this.checkBox3.Checked == true)
    {
        this.Co2Pet = ((double)this.numericUpDown6.Value *
(double)this.numericUpDown10.Value * 1000 * 4.18618 * ((double)Math.Pow(0.1, 9))
* kefPet * 1 * 44 / 12);
        textBox11.Text = Co2Pet.ToString();
    }
    if (this.checkBox6.Checked == true)
    {

```

```

        this.Co2Tk      =      ((double)this.numericUpDown12.Value      *
(double)this.numericUpDown7.Value * 1000 * 4.18618 * ((double)Math.Pow(0.1, 9))
* kefTk * 1 * 44 / 12);
        textBox14.Text = Co2Tk.ToString();
    }
    if (this.checkBox5.Checked == true)
    {
        this.Co2Fo      =      ((double)this.numericUpDown11.Value      *
(double)this.numericUpDown5.Value * 1000 * 4.18618 * ((double)Math.Pow(0.1, 9))
* kefLi * 1 * 44 / 12);
        textBox13.Text = Co2Fo.ToString();
    }
    if (this.checkBox8.Checked == true)
    {
        this.Co2Lpg      =      ((double)this.numericUpDown16.Value      *
(double)this.numericUpDown14.Value * 1000 * 4.18618 * ((double)Math.Pow(0.1, 9))
* kefLi * 1 * 44 / 12);
        textBox18.Text = Co2Lpg.ToString();
    }
    if (this.checkBox7.Checked == true)
    {
        this.Co2Dg      =      ((double)this.numericUpDown15.Value      *
(double)this.numericUpDown13.Value * 1000 * 4.18618 * ((double)Math.Pow(0.1, 9))
* kefLi * 1 * 44 / 12);
        textBox17.Text = Co2Dg.ToString();
    }

    eMC02Yak = Co2Li + Co2Pet + Co2Tk + Co2Fo + Co2Lpg + Co2Dg ;
    this.textBox6.Text = eMC02Yak.ToString();

    updateOverAllEms();
}

...
...
...

```