

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON AYAK İZİ UYGULAMALARI:
ÇİMENTO FABRİKASI ÖRNEĞİ

MURAT TANER ŞAHİN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2019

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON AYAK İZİ UYGULAMALARI:
ÇİMENTO FABRİKASI ÖRNEĞİ

MURAT TANER ŞAHİN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. NİHAL BEKTAŞ

GEBZE
2019

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**CARBON FOOTPRINT APPLICATIONS:
CEMENT FACTORY EXAMPLE**

MURAT TANER ŞAHİN
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. NİHAL BEKTAŞ

GEBZE
2019



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 26/06/2019 tarih ve 2019/29 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 23/10/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Murat Taner ŞAHİN'in tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Nihal BEKTAŞ

ÜYE

: Prof. Dr. Aykan KARADEMİR

ÜYE

: Prof. Dr. M. Salim ÖNCEL

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada karbon ayak izi uygulamalarında çimento fabrikaları örneğine yer verilmiştir. Yüksek hacimlerde ham madde, katkı malzemeleri ve enerji gerektiren çimento üretim prosesinde enerji kaynağı olarak yüksek miktarlarda kömür, petrol, fuel oil, biyokütle kullanılır. Çimento üretim sürecinde çevresel ortama birçok kirletici yayılır. Ana kirleticiler, çimento fırınından kaynaklanan atmosferik kirleticilerdir. Literatür araştırmalara göre, CO₂ emisyon kaynaklarının yaklaşık olarak %5'i, toplam sera gazı emisyonlarının %3'i çimento üretim prosesi sebebiyle oluşmaktadır. Çimento endüstrisinde CO₂ azaltma önlemlerinden biri olarak, atıkların alternatif yakıt olarak kullanımı söz konusudur. Atıkların içerdiği ısı enerjiden faydalanılarak çimento üretimi için gerekli olan yüksek enerjinin sağlandığı kömür sarfiyatından tasarruf edilmektedir. Çimento fabrikaları Çimento fabrikası ilgili bakanlıktan aldıkları “Çevre İzin ve Lisansı” kapsamında tehlikeli atıkları enerji üretimi amacıyla alternatif yakıt olarak yakarak bertaraf etmek konusunda yetkilidir. Böylece atıkların, depolama alanlarına ve alıcı ortama kontrolsüz olarak yayılmasının önüne geçilmekte, çevre kirliliğine neden olunması engellenebilmektedir. Kömüre ikame olarak kullanılan alternatif yakıtlar sayesinde doğal kaynakların ekonomik kullanımına fayda sağlanmaktadır. Üretim prosesi boyunca daha az kömür kullanıldığı için, dolaylı olarak karbon azaltımı faaliyetlerini destekleyici sonuçlar alınmaktadır. Böylece üretici firmalar, sera gazlarının canlı ve cansız varlıklar üzerindeki etkisinin azaltılmasına, küresel ısınmaya karşı sorumluluklarını yerine getirmesi konusunda destek olmaktadır.

Tez kapsamında çimento üretimi sırasında oluşan karbon emisyonları çalışılan tesis özelinde hesaplanmış, alternatif senaryolar ile oluşan karbon miktarının değişimi değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alternatif Hammadde ve Yakıt, Çevresel Etki, Çimento, Klinker, Karbon Ayak İzi.

SUMMARY

In this study, Carbon Footprint applications of Cement Factories are researched. The cement production process requires high volumes of raw materials, additives and energy, which is provided by high amounts of coal, petroleum, fuel oil and biomass. During the cement production process, many pollutants are emitted into the environment. The main pollutants are atmospheric pollutants from the cement kiln. According to literature studies, approximately 5% of CO₂ emission and 3% of total greenhouse gas emissions are caused by cement production process. As one of the CO₂ reduction measures in the cement industry, wastes are used as an alternative fuel. By utilizing the thermal energy contained in the wastes, coal consumption can be reduced during cement production. Cement plants are authorized to dispose hazardous wastes as alternative fuels for energy production within the scope of environmental licence received from the related ministry. So that environmental pollution can be prevented. Thanks to alternative fuels used as substitutes for coal, natural resources are saved. Since less coal is used during the production process, carbon reduction is possible in this matter. Cement producers support the reduction of the impact of greenhouse gases on living and non-living assets and fulfill their responsibilities towards global warming.

Within the scope of the thesis, the carbon emissions generated during cement production were calculated based on a specific plant and alternative scenarios were evaluated.

Keywords: Alternative Raw Material and Fuel, Environmental Impact, Cement, Clinker, Carbon Footprint.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgi ve tecrübelerini tüm samimiyetiyle benimle paylaşarak bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan tez danışmanım Prof. Dr. Nihal BEKTAŞ'a ve tüm yaşamımda göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
1.GİRİŞ	1
1.1.Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. KARBON AYAK İZİ VE ÇİMENTO ÜRETİMİ	3
2.1. Karbon Ayak İzi Kavramı	3
2.2. Karbon Ayak İzi Türleri	3
2.3. Sera Etkisi, Küresel Isınma ve Karbon Ayak İzi İlişkisi	4
2.4. Karbon Ayak İzi Değerlendirilmesi	6
2.4.1. Dünya'da Karbon Ayak İzi	11
2.4.2. Türkiye'nin Karbon Ayak İzi	12
2.4.2.1. Düşük Karbon Ekonomisi İçin Türkiye'de Önlemler	13
2.4.2.2.Türkiye'de Karbon Ekonomisinde Tehditler	14
2.4.2.3. Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Potansiyeli	16
2.4.3. Türkiye'de ve Dünya'da Karbon Ayak İzi Mevzuatları	19
2.4.4. İklim Değişikliği	22
2.4.5. Sera Gazı ve Sera Gazı Emisyonu	23
2.4.6. Hayat Boyu Değerlendirme Yönetmeliği	26
2.4.7. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Yöntemi	27
2.5. Çimento Sektörü ve Çimento Üretim Prosesi	29
2.5.1. Çimento Türleri	30
2.5.2. Dünyada ve Türkiye'de Çimento Sektörü	30
2.5.2. Çimento Üretim Prosesi	36
2.5.2.1. Madencilik Faaliyetleri	38

2.5.2.2. Hammadde Hazırlama	38
2.5.2.3. Farin Üretimi	38
2.5.2.4. Klinker Üretimi	39
2.5.2.5. Çimento Öğütme	41
2.5.2.6. Paketleme	43
2.5.3. Çimento Tesislerinde Üretim Süreci	43
2.5.4. Çimento Üretiminde Oluşan Emisyonlar	45
2.5.4. Çimento Sektöründe Enerji Kullanımı	48
2.5.5. Çimento Üretiminde Alternatif Hammadde ve Yakıt Kullanımı	50
2.5.5.1. Alternatif Hammadde Kullanımı	50
2.5.5.2. Alternatif Yakıt Kullanımı ve Beraber Yakma Faaliyetleri	51
3. MATERYAL VE METOT	57
3.1. Çalışılan Tesis	58
3.2. Emisyon Hesaplaması	62
3.2.1. Klinker Kaynaklı Emisyon Hesaplaması	62
3.2.2. Tüketilen Yakıt ve Atıklardan Kaynaklı Emisyonların Hesaplaması	63
3.2.2.1 Petrokok Kaynaklı Emisyonlar	63
3.2.2.2 Taş Kömürü Kaynaklı Emisyonlar	64
3.2.2.3 Doğalgaz Kaynaklı Emisyonlar	65
3.2.2.4 Fuel-Oil Kaynaklı Emisyonlar	66
3.2.2.5. Kuru Çamur Kaynaklı Emisyonlar	67
3.2.2.6. Atıktan Türetilmiş Yakıt Kaynaklı Emisyonlar	68
3.2.2.7 Atık Yağ Kaynaklı Emisyonlar	69
3.2.2.8. Motorin Kaynaklı Emisyonlar	70
3.3. Sonuçların Karşılaştırılması	72
3.4 Alternatif Senaryoların Oluşturulması	74
3.4.1. Senaryo 1 Doğalgaz Miktarının Arttırılması	76
3.4.2. Senaryo 2 Atıktan Türetilmiş Yakıt Miktarının Arttırılması	78
4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	80
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	94

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
AHY	: Alternatif Hammadde ve Yakıt
ATY	: Atıktan Türetilmiş Yakıt
CML	: Center for Environmental Studies (Çevresel Çalışmalar Merkezi)
DS	: Dry Sludge (kurutulmuş arıtma çamuru)
EDIP	: Environmental Design of Industrial Products (Endüstriyel Ürünlerin Çevresel Dizaynı)
ELU	: Environmental Load Unit (Çevresel Yük Birimi)
EPS	: Environmental Priority Strategies (Çevresel Öncelik Stratejileri)
IEA	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli)
KM	: Katı Madde
MJ	: Megajul
MSW	: Municipal Solid Waste (Kentsel katı atık)
YDD	: Yaşam Döngüsü Değerlendirme
WHR	: Waste Heat Recovery (Atık Isı Geri Kazanımı)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1:	Sektörel bazda küresel sera gazı salınımı. 11
2.2:	Türkiye’de klinker ve çimento üretiminin yıllara göre değişimi. 32
2.3:	Çimento üretimi öngörüler. 33
2.4:	2015 Dünyada en yüksek CO ₂ emisyonu salımı yapan ülkeler. 34
2.5:	Sera gazı emisyon kaynaklarının Türkiye’deki dağılımı. 35
2.6:	Türkiye’de CO ₂ emisyonlarının yıllara göre değişimleri. 36
2.7:	Çimento üretim prosesi. 37
2.8:	Ön ısıtıcılı ve ön kalsinasyonlu çimento fırını. 40
2.9:	Çimento türleri. 42
2.10:	Çimento üretimi aşamalarının enerji tüketim payları. 49
2.11:	Farklı ülkelerdeki alternatif yakıt kullanımları. 52
2.12:	Mutlak emisyonlar. 53
2.13:	Metan Emisyonları 54
3.1:	Siklonlar ve döner fırın 59
3.2:	Döner fırın. 61
3.3:	Emisyon Kaynakları Dağılımı (2017 yılı). 73
3.4:	Emisyon Kaynakları Dağılımı (2018 yılı). 73
3.5:	Senaryo için baz alınan verilerin yüzdesel dağılımı. 76
3.6:	Emisyon Kaynakları Dağılımı Senaryo 1 – Doğalgaz 77
3.7:	Emisyon Kaynakları Dağılımı Senaryo 2 – ATY 79

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Karbon ayakizi tanımlamaları.	8
2.2: Yıllara göre karbon emisyon düzeyleri.	12
2.3: Türkiye’de karbon ayak izinin bileşenleri.	13
2.4: Enerji kaynaklarına göre elektrik enerjisi üretimi.	15
2.5: Yenilenebilir enerji kaynakları ve kurulu güç.	17
2.6: Çimento üreten G20 ülkeleri.	31
2.7: Sabit (Stationary) CO ₂ kaynaklarının, endüstrilere göre dağılımı	34
2.8: Çimento üretiminde kullanılan hammadde kaynakları.	36
2.9: Klinker üretiminde gerçekleşen bazı reaksiyonlar.	41
2.10: Türkiye’de çimento fırınlarından oluşan emisyon değerleri.	47
2.11: Fırın prosesine göre termal enerji tüketimi.	48
2.12: Kuru ve yaş proseslerde elektrik enerjisi tüketimleri.	50
2.13: Çimento üretiminde alternatif hammadde ve kaynaklar.	51
2.14: Çimento üretiminde kullanılan yakıtların kıyaslaması.	51
2.15: Alternatif yakıtların karşılaştırması.	55
3.1: Fırın sistemine giren ısı dağılımı.	58
3.2: Fırın sisteminden çıkan ısı dağılımı.	59
3.3: Klinkerleşme reaksiyonları.	61
3.4: 2017 yılı seragazı emisyon tablosu.	72
3.5: 2018 yılı seragazı emisyon tablosu.	72
3.6: Tez çalışması kapsamında oluşturulan alternatif senaryolar.	75
3.7: Senaryo 1’e göre seragazı emisyonlarının hesaplanması	76
3.8: Senaryo 2’ye göre seragazı emisyonlarının hesaplanması	78

1. GİRİŞ

Çimento üretimi, yüksek hacimlerde ham madde, katkı malzemeleri ve enerji gerektiren ve enerji kaynağı olarak yüksek miktarlarda kömür, petrol, fuel oil, biyokütle kullanılan bir prosestir. Çimento üretim sürecinde çevresel ortama birçok kirletici yayılır. Ana kirleticiler, çimento fırınından kaynaklanan atmosferik kirleticilerdir. Literatür araştırmalara göre, CO₂ emisyon kaynaklarının yaklaşık olarak %5'i, toplam sera gazı emisyonlarının %3'i çimento üretim prosesi sebebiyle oluşmaktadır. Çimento endüstrisinde CO₂ azaltma önlemlerinden biri olarak, atıkların alternatif yakıt olarak kullanımı söz konusudur. Atıkların içerdiği ısı enerjiden faydalanılarak çimento üretimi için gerekli olan yüksek enerjinin sağlandığı kömür sarfiyatından tasarruf edilmektedir. Çimento fabrikaları Çimento fabrikası ilgili bakanlıktan aldıkları “Çevre İzin ve Lisansı” kapsamında tehlikeli atıkları enerji üretimi amacıyla alternatif yakıt olarak yakarak bertaraf etmek konusunda yetkilidir. Böylece atıkların, depolama alanlarına ve alıcı ortama kontrolsüz olarak yayılmasının önüne geçilmekte, çevre kirliliğine neden olunması engellenebilmektedir. Kömüre ikame olarak kullanılan alternatif yakıtlar sayesinde doğal kaynakların ekonomik kullanımına fayda sağlanmaktadır. Üretim prosesi boyunca daha az fosil yakıtın kullanılması ile karbon azaltımı faaliyetlerini destekleyici sonuçlar alınmaktadır. Böylece üretici firmalar, sera gazlarının canlı ve cansız varlıklar üzerindeki etkisinin azaltılmasına, küresel ısınmaya karşı sorumluluklarını yerine getirmesi konusunda destek olmaktadır.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Çimento fabrikaları kapsamında tehlikeli atıkları enerji üretimi amacıyla alternatif yakıt olarak yakarak bertaraf etmek konusunda yetkilidir. Böylece atıkların, depolama alanlarına ve alıcı ortama kontrolsüz olarak yayılmasının önüne geçilmekte, evre kirliliğine neden olunması engellenmektedir. Diğer yandan tehlikeli atıkların içerdiği ısıl enerjiden faydalanılarak imento üretimi için gerekli olan yüksek enerjinin sağlandığı kömür sarfiyatından tasarruf edilmektedir. Kömüre ikame olarak kullanılan alternatif yakıtlar sayesinde doğal kaynakların ekonomik kullanımına fayda sağlanmaktadır. Üretim prosesi boyunca daha az kömür kullanıldığı için, dolaylı olarak karbon azaltımı faaliyetlerini destekleyici sonuçlar alınmaktadır.

2. KARBON AYAK İZİ ve ÇİMENTO ÜRETİMİ

2.1. Karbon Ayak İzi Kavramı

Karbon ayak izi, bireylerin ihtiyaçlarının giderilmesine ilişkin gerçekleştirilen her çeşit tüketme işleminin tabiattaki etkisi olarak tanımlanabilir. Daha geniş bir açıdan karbon ayak izi, kişilerin ya da devletlerin tüketim etkinliklerinin evrende sebep olduğu etkinin boyutunun tespitinde, mukayese edilmesinde, meydana gelen evrensel ve yerel problemlere çözümler sunulmasında ehemmiyetli bir ölçüm aracı olarak açıklanabilir [Lynas, 2009], [Wiedmann and Minx, 2008]. Literatürde yer alan diğer karbon ayak izi tanımlamaları incelendiğinde ise aşağıdaki açıklamalarla karşılaşmıştır.

Birey etkinliklerinin; karbondioksit cinsinden ölçülü ve üretilmiş sera gazı miktarı bakımından çevreye verilen zararın ölçüsü karbon ayak izi olarak tanımlanmıştır [Bekiroğlu, 2011].

Karbon ayak izi, yaşayan herhangi bir şeyin kütlesine ve ayak büyüklüğüyle ilişkili zamana bağlı olarak değişebilen izdir [Özer, 2002].

Diğer bir ifade ile karbon ayak izi, insanların küresel ısınmaya sebep olduğu kişisel olumsuz katkısının ölçülmesi olarak tanımlamıştır [Tatar, 2010].

Bir başka tanımlamaya karbon ayak izi; oluşturduğu sera etkisiyle arttırdığı küresel ısınmayı tükettikleri fosil yakıtların atmosfere saldıkları karbondioksite (CO₂) maruz bıraktığında hasarla sonuçlanan durum olarak açıklanmıştır. Başka bir deyişle sonuçlanan bu duruma karbon ayak izi gerekçe gösterilmektedir [Web 8, 2019].

2.2. Karbon Ayak İzi Türleri

Kurumlar tarafından karbon ayak izi hukuki müeyyideler, kurumsal ve toplumsal yükümlülük, müşteri ya da yatırımcı istekleri, kurum ve pazarlama prestiji, mecburi veya gönüllü sera gazı emisyonu azaltımı ve de emisyon ticaret mekanizmalarına katılım maksadıyla ölçülmektedir. Literatürde karbon ayak izi 2 grupta değerlendirilmiştir [Bekiroğlu, 2011];

- Kişisel Karbon Ayak İzi: İnsanların senelik yaşam etkinlikleri esnasında tabiata salınan emisyonun bireysel bakımdan yükümlü olunan miktarı değerlendiren bir terimdir. Hedefi, şahsi bilincin meydana gelmesine imkan vererek emisyonların azaltımına bireylerden başlamaya yöneliktir. Nitekim kuruluşlarında kökeninde insan bulunmaktadır. Kişisel Karbon Ayak İzi ise iki çeşittir
 - i) Birincil Karbon Ayakizi: İnsanlar tarafından tüketilen fosil yakıtlardan, evlerinde ve elektrikten tüketilen ve evlerde ve taşıtlarda (araba, uçak gibi) tüketilen fosil yakıtlardan kaynaklanan bir CO₂ emisyonu ölçüsüdür.
 - ii) İkincil Karbon Ayakizi: İnsanların kullandığı ürünlerin tüm yaşam döngüsündeki, yani imalattan nihai bozulmaya kadar dolaylı CO₂ emisyonlarının ölçüsüdür.
- Kurumsal Karbon Ayakizi: Kurumların yıllık faaliyetleriyle ilgili emisyonları gösteren kavramdır. Kurumsal Karbon Ayakizi 2 ana bölümden oluşmaktadır;
 - i) Doğrudan Karbon Ayakizi (Kapsam 1): Kurumların faaliyetleri için kullandıkları fosil yakıtlar (ısıtma veya üretim süreci için) ve kuruma ait araçların kullandıkları fosil yakıtların emisyonları Kapsam-1 kapsamında değerlendirilmiştir.
 - ii) Dolaylı Karbon Ayakizi (Kapsam 2): Kurumlar tarafından tüketilen elektrik enerjisinden kaynaklanan karbon salınımları,

2.3. Sera Etkisi, Küresel Isınma ve Karbon Ayak İzi İlişkisi

İnsanlar tarafından atmosfere yayılan gazların sera etkisi nihayetinde, evrende sıcaklığın artmasına küresel ısınma denir. İklim sisteminde büyük rolü bulunan sera gazları, güneşi ve yer ışıınımını koruyarak atmosferin ısı dengesini korur. Dar bir bilimsel ortamda başlayan ve daha sonra bilimsel kanıtlarla beslenen olguya göre, özellikle 20. yüzyılda ısınmanın artmasının en önemli sebebi, özellikle 20. yüzyılda ısınmanın artması için beklenmeyen artıştır. atmosfer. Bu nedenle, ısınmaya neden olan gazların emisyon kontrolünün insanların elinde olduğu ve iklim değişikliğini önlemeye yönelik çabaların söz konusu gazların kaynaklarını bulma ve kontrol etme yönünde yönlendirildiği anlaşılmaktadır. İklim sistemi 18. yüzyıla kadar dengede iken,

sanayi devrimi sonucu bu denge bozulmuştur. Sanayileşme yoluyla artan fosil yakıt kullanımı, artan ihtiyaçları karşılamak için yeni alanların açılmasıyla yaratılan ormansızlaşma, sera gazlarının sanayinin farklı dallarından atmosfere deşarjı küresel ısınmanın meydana gelmesinin esas sebepleridir [Bekiroğlu, 2011].

Gelişen teknolojinin olumsuz etkileri gözlenmektedir. Bu olumsuz etkilerin en önemlisi çevresel zarardır. Özellikle sınai faaliyetler sırasında ve süreçlerin bir sonucu olarak ortaya çıkan atıklar genellikle kimyasal elementler içermektedir. İşletmelerin maliyetli olarak gördükleri atık bertaraf işlemlerine yaklaşmaması, bu atıkların çevreye salınmasına neden olmaktadır. Yıllardır kaybolmayan atıklar, atmosfere salınan zehirli gazlar ve çöp de su ve toprağı kirletiyor. Ek olarak, bunların tümü, tüm dünyayı yüzyıllar boyunca geri dönüşü olmayan sonuçlara yol açabilecek doğal bir felakete sürüklüyor. Küresel ısınma bu doğal afetlerin önde gelen nedenidir. Eriyen buzullar küresel ısınmayı sembolize ediyor. Yavaş hareket eden bir işlem gibi görünse de, görüldüğü kadar yavaş değildir. Dünyayı çevreleyen atmosferik tabaka sera gazları tarafından aşırı derecede zarar görmüştür. Normal şartlar altında atmosfer güneşten gelen zararlı ışınları tutar ve gerekli ışınların geçişini sağlar ve dünyaya orantılı olarak ısınmasını sağlar. Dünya, basitçe açıklanan basit ilkeler sayesinde canlılara uygun sıcaklık dengesine ulaşabilir. Küresel ısınmada karbon ayakizinin olumsuz rolü bilinmektedir. Karbon ayakizinin dayandığı sera gazlarının tümü ısı tutma özelliğine sahipken, karbondioksit ısı tutma kapasitesi çok yüksek olan bir sera gazıdır. Bu nedenle, karbondioksit ve diğer sera gazlarındaki artış arttıkça, yeryüzü sıcaklığı artar. Bu durum sera gazlarının küresel ısınmadaki yerini belirler [Web 7, 2019].

İnsan kaynaklı aktiviteler sonucunda atmosferdeki sera gazı oranındaki artış, gezegenimizin uzun dalga radyasyonuyla soğutma verimliliğini zayıflatan ve daha fazla ısınma eğilimi yaratan pozitif radyasyon zorlamasının oluşumuna yol açar. Dünya / atmosfer ortak sisteminin enerji dengesine olumlu katkı yapmasına, sera etkisinin artması denir. Bu etkiyle dünyanın ortalama sıcaklıklarındaki artışa küresel ısınma denir. Gelişmiş sera etkisinin neden olduğu küresel ısınmanın büyüklüğü, her bir sera gazı birikimindeki artışın, bu gazların küresel ısınma potansiyelleri, atmosferde kalma sürelerinin, atmosferdeki bu gazların diğerleriyle birikimine bağlıdır [REC, 2015].

Küresel ısınma, değişen iklim koşullarının karşı karşıya kaldığı en büyük zorluklardan biridir. Küresel ısınmaya neden olan ana faktörler karbondioksit ve metan

gazlarıdır. Her ikisi de zararlı olsa da, karbondioksit metan gazından daha tehlikelidir. Araştırmalara göre, çevre bilimcilerin ulaştığı ortak bir nokta var. Evrenin sıcaklığındaki artış, doğrudan karbondioksit artışıyla orantılıdır. Atmosfere giren karbondioksit, onu zayıflatarak güneşten gelen zararlı ışınların toprağa sızmasına izin verir. Bu durum dünyanın zararlı bir şekilde ısınmasıyla sonuçlanmaktadır [Neale, 2009].

2.4. Karbon Ayak İzi Değerlendirilmesi

Dünyada üretim ve tüketimin artması, sanayi sektörünün hızla gelişmesi kentleşme ve çevre sorunlarını arttırmaktadır. Doğal yapının bozulması, iklim değişikliği, çölleşme ve bazı biyolojik türlerin giderek azalması ciddi tehlike oluşturmaktadır [Rana et al., 2016].

Nüfusun hızla artması, kentlerde artan nüfus, iktisadi etkinlikler, tüketicilerin çeşitlendirilmiş tüketme tutumları; tabi ortamlarda ve çevredeki baskıyı arttırmıştır. Çevre kirliliği, iklim değişikliği, kuraklık, ormanların tahribi, susuzluk ve küresel ısınma ile ilişkin problemler küresel gündemde kalmaya devam ediyor. Sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için, küresel bazda başlayan yeni üretim modeli, ekonomiyi yeşil ekonomi kavramı ile açıklamıştır. Düşük karbonlu bir ekonomi olan yeşil iktisadi dönüşüm prosesinde, bu durum öngörülmektedir. İmalat iş sahalarında temiz üretim ve eko-verimlilik hem çevreyi koruyacak hem de rekabet gücünü artıracaktır [Kalkınma Bakanlığı, 2013].

İnsanoğlu, hayatı süresince yaptığı tüketim ve üretim faaliyetlerinden dolayı dünyada bir iz bırakmıştır. Yiyecekleri, giysileri, tüm dayanıklı ve dayanıklı olmayan tüketim mallarını, ısıtma ve ulaştırma için kullandığımız kaynakları ve bunlardan kaynaklanan atıkları göz önüne aldığımızda, bu iznin küçük olmayacağı açıktır. Bu kaynakların üretiminde yararlanılan ilk maddeler, ara ürünler ve yatırım malları da vardır. Bilindiği gibi ekonomi bir kıtlık bilimidir. İnsanlığın gereksinimlerinin sonu yoktur, fakat evrenin kaynaklarına bir son vardır. Bu kaynakların bazıları yenilenebilir, bazıları ise yenilenemez. Sürdürülebilirliği gerçekleştirmek amacıyla, yenilenebilir doğal kaynakların tüketim seviyesi, doğanın aynı zaman zarfında üretebileceği kaynak miktarını geçmemelidir. Sürdürülebilir kalkınma, kaynak tüketimini kaynağın yenilenme oranından daha hızlı önlemeyi hedeflemektedir [Han ve Kaya, 2013].

İnsanlar üretim ve tüketim etkinlikleri nihayetinde meydana gelen ekolojik ayak izi, biyolojik kapasite ile karşılanmalıdır. Tüketilen kaynak (ekolojik ayak izi) ve kullanılacak kaynak (biyolojik kapasite) düzeyi ilişkisi sürdürülebilirlik hususunda ciddi önem arz etmektedir [WWF, 2012a]. Ekolojik ayak izinin faktörleri aşağıdaki gibidir [WWF, 2012a]:

- Karbon ayak izi
- Tarım arazisi ayak izi
- Orman ayak izi
- Yapılandırılmış alan ayak izi
- Balıkçılık sahası ayak izi
- Otlak ayak izi

Bu çalışmada ise karbon ayak izi üzerine araştırmalar yapılacaktır. Karbon ayak izi ifadesinin ilk kez ne zaman ve kim tarafından kullanıldığına dair kesin bir kanıt bulunmamakla birlikte, 2000 yılının başlarında çıkan gazete makalelerinde karbon ayak izi kavramının görüldüğü ve bu durumun 2005 yılına kadar yaygınlaşarak bilimsel literatürde kullanılmasına kadar vardığı bilinmektedir. Kullanımının popülerliğine rağmen karbon ayak izinin evrensel olarak kabul edilmiş bir tanımı yoktur ve günümüzde sera gazı (GHG) emisyon ölçümünün en yaygın yorumlamalarından en az bilgi sahibi olunanıdır [Ercin and Hoekstra, 2012], [Gunathilaka and Gunawardana, 2015].

Fosil yakıtların kullanımı ile ortaya çıkan sera gazları, toprak ve arazinin düzensiz kullanımı iklim değişikliğine neden olan etkenlerin başında gelmektedir ve orman alanlarının azaltılması kullanımı karbon tutma potansiyelini azaltmaktadır. Yirminci yüzyılın ikinci yarısı ile birlikte sanayileşme, enerji tüketimi vb. durumlardan kaynaklanan küresel ısınma etkisini göstermiş, önlem alınmazsa daha sonraki dönemlerde de etkisinin süreceği ve bu etkinin telafisi olmayan bir durum getireceği belirtilmiştir. Fosil yakıtların bilinçsiz ve verimsizce kullanılması küresel ısınmanın kaynağı CO₂ başta olmak üzere atmosferdeki sera gazlarını artışına sebep olmaktadır. Ülkeler sera gazı salınımlarını azaltma amacına yönelik hedef koyamaması ve gerekli alt yapıyı hazırlayamaması sebebiyle bir sözleşmeye gerek duyulmuş ve 2005 yılında yürürlüğe giren Kyoto Protokolü ile bu durum giderilmiştir.

Protokol kapsamında çeşitli mekanizmalar oluşturulmuştur [Özçelik, 2017]. Tüm bu ifade edilen sorun ve öneriler, yaklaşımlar, oluşturulan mekanizmalar; karbon salınımını azaltmaya yönelik ülkelere, kurum ve kuruluşlara, yatırımcılara, üreticilere farkındalık oluşturmuştur ve karbon ayak izini belirleme çalışmaları hız kazanmıştır [Bonamente et al., 2015].

Karbon ayak izi hesabı, bir kişinin bir yıl içerisinde doğa ortamına saldığı CO₂ miktarının belirlenmesi ile bulunur. Ulaşım, ısınma, yeme, içme vb. aktiviteler ile üretilen ve tüketilen ürünler sonucunda oluşan karbon miktarı karbon ayak izini belirlemektedir. Kişilerin küresel ısınmadaki payının ölçüsünü karbon ayak izi belirler. Bir başka ifade ile bir karbon ayak izi kişinin, kurumların veya herhangi bir üründen kaynaklı olarak doğaya bırakılan sera gazlarının genel toplam içindeki oranıdır. Karbon ayak izi hesabı, araçlarla kat edilen toplam yol, ısıtma amaçlı kullanılan enerji miktarı vb. birçok parametreyi içersine almaktadır. Bu bakımdan karbonun birincil ve ikincil izleri belirlenirken dikkat edilmelidir. Karbon ayak izi doğrudan (birincil) ve dolaylı (ikincil) olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir. Evsel enerji tüketimi, ulaşım, fosil yakıt kullanımı ile meydana gelebilecek CO₂ salınımları belirlemede birincil ayak izi, tüm yaşam boyunca kullandığımız ürünlerin imalatı ve son olarak bozulmasına kadar atmosfere salınan CO₂'yi belirlemede ise ikincil ayak izi kullanılır [Kaypak, 2013].

Tablo 2.1: Karbon ayakizi tanımlamaları.

Çalışma	Tanım
Wiedmann ve Minx (2007)	Bir faaliyetin doğrudan veya dolaylı olarak neden olduğu veya bir ürünün ömrü boyunca biriktirdiği toplam CO ₂ emisyonlarının bir ölçüsüdür.
EPLCA (2007)	Bir karbon ayak izi (CF), bir ürünün tedarik zinciri boyunca ve bazen de ömrünün sonunda geri kazanılması ve bertarafı ile ilişkili toplam karbon dioksit (CO ₂) ve diğer sera gazı emisyonlarıdır (metan ve gülen gaz gibi). .

Tablo 2.1: Devam.

Moss et al. (2008)	Tüm yaşam döngüsü boyunca bir birey, şirket veya ürün tarafından doğrudan veya dolaylı olarak salınan toplam sera gazı kütesidir.
Peters (2010)	İşlevsel bir birimin karbon ayakizi, tanımlanmış mekansal ve zamansal sistem sınırları içindeki üretim ve tüketime ilişkin tüm emisyon kaynaklarını, evyeleri ve depoları dikkate alan belirli bir iklim etkisidir.
Pandey et al. (2011)	Belirli bir sınır dahilinde bir birey, organizasyon, süreç, ürün veya olay tarafından atmosfere salınan CO ₂ eşdeğeri cinsinden ifade edilen sera gazı miktarı.

Karbon ayak izi, ürün yaşam döngüsünün her adımında (üretim, taşıma, kullanım ve elden çıkarma) meydana gelen CO₂ emisyonlarının bir ölçütüdür [Wiedmann and Minx, 2008]. CO₂ ayak izi, iki şekilde meydana gelmektedir. İlki birincil/doğrudan diğeri ise ikincil/dolaylıdır. Doğrudan ayak izi; evsel enerji kullanımı, ulaşımı (taşıtlar) içeren fosil yakıtların tüketimi sonrasında meydana gelen birincil karbon emisyonlarının, dolaylı ayak izi ise tüketilen ürünlerin bütün yaşam döngüsünden bu ürünlerin üretimi ve nihayetinde bozulmasına ilişkin ikincil karbon salınımlarının ölçüsüdür [Sağlık Bakanlığı, 2014].

Karbon emisyonları fosil yakıtlar sebebiyle ortaya çıkmaktadır.Yerkabuğundan elde edilen petrol, kömür, doğalgaz gibi fosil yakıtlar ekolojik döngü içerisinde yenilenebilir niteliğe sahip değildir. Dolayısıyla söz konusu bu yakıtlar yandığında karbon açığa çıkmaktadır. Öte yandan karbon ayak izini yalnızca yerel değil yabancı ülkelerden de elde edilen yabancı ürünlerin üretiminde de salınan karbon ve fosil yakıt dışı CO₂ emisyonları da (çimento imalatındaki kimyasal reaksiyonlardan meydana gelen salınımlar benzeri) kapsamaktadır [WWF, 2012b].

Karbon emisyonlarını tutmada gerek duyulan biyolojik potansiyeli ölçümleyen olgu karbon ayak izidir. Fakat diğerlerinin aksine karbonda hesaplanmış biyolojik potansiyelden bahsetmek güçtür. Bu durum sebebiyle ölçümlerde atmosfere salınan her ton karbonun depolanması amacıyla (fotosentez aracılığıyla) hasat edilmemiş orman arazilerinden yararlanılmaktadır. Hesaplama baz alınan orman arazisinin büyüklüğünün ve üretkenliğinin atmosfere salınmış CO₂ miktarını depolamada yeteriz

kalması, karbon emisyon grubunda ekolojik açık meydana getirmektedir [WWF, 2012a].

Doğal dengenin bozulmasıyla beraber fosil yakıt tüketimi haricinde atmosfere salınmış sera gazları diğer bir deyişle CO₂ salımı, ekosistemin tutabileceğinden çok yüksek düzeydedir. Atmosferde depolanmış yüksek düzeyde olan sera gazlarından karbon, bugünün en ciddi ekolojik problemlerinden olduğu gibi aynı zamanda okyanusların asitlenmesi benzeri başka çevresel sorunlarda ortaya çıkarmaktadır.

Karbon haricinde Kyoto Protokolünde 5 sera gazı daha ifade edilmektedir. Bunlar; Metan (CH₄), Azot oksit (N₂O), Hidroflorokarbonlar (HFCs), Perflorokarbonlar (PFCs) ve Kükürt Heksaflorid (SF₆) olarak diğer sera gazlarını ifade etmektedir. Bu gazlar CO₂ eşdeğeri türünden hesaplanmaktadır. Karbon eşdeğeri; karbon dışında başka sera gazlarının aynı miktar karbona nazaran kaç kat daha fazla ısı depolayabilme potansiyeli barındırdığını gösterir. Böylece bütün sera gazları eş bir paydada bir araya getirilerek, gerçekleşen salınım ölçümlerinin kavranmasını basitleştirir. Ciddi tehlike arz eden sera gazı Kükürt Heksaflorit, iken asgari düzeyde tehlike barındıran sera gazı ise karbon olarak tanımlanmasına karşın, miktar bakımından karbon diğerlerine nazaran çok daha yüksek düzeyde olması sebebiyle koşullar aksi yönde ilerlemektedir [Bekiroğlu, 2011].

Çevrenin neden olduğu iklim değişikliğinin karbon ayak izini ve sürdürülebilir bir yaşam için küresel ısınmayı azaltmak için yeni önlemler alınabilir [Kumaş vd., 2019];

- Çevresel problemler ve küresel iklim değişikliği hakkında farkındalığı arttırmak için eğitim seminerleri ve projeleri düzenlenmelidir.
- Karbon emisyonlarını azaltmak için düzenli ağaçlandırma faaliyetleri yapılmalıdır.
- Çevresel ürünlerin ve geri dönüştürülmüş malzemelerin tüketimini teşvik edecek projeler oluşturulmalıdır.
- Su, doğal gaz, atık, elektrik, ısıtma, karbon ayakizini etkileyen hususlarda tasarruf edilmelidir.
- Alternatif enerji kaynaklarının tüketimi desteklenmeli ve bu alana ilişkin çabalara ivme kazandırılmalıdır.
- Kamu teşebbüsleri kendi elektriğini üretebilmelidir.

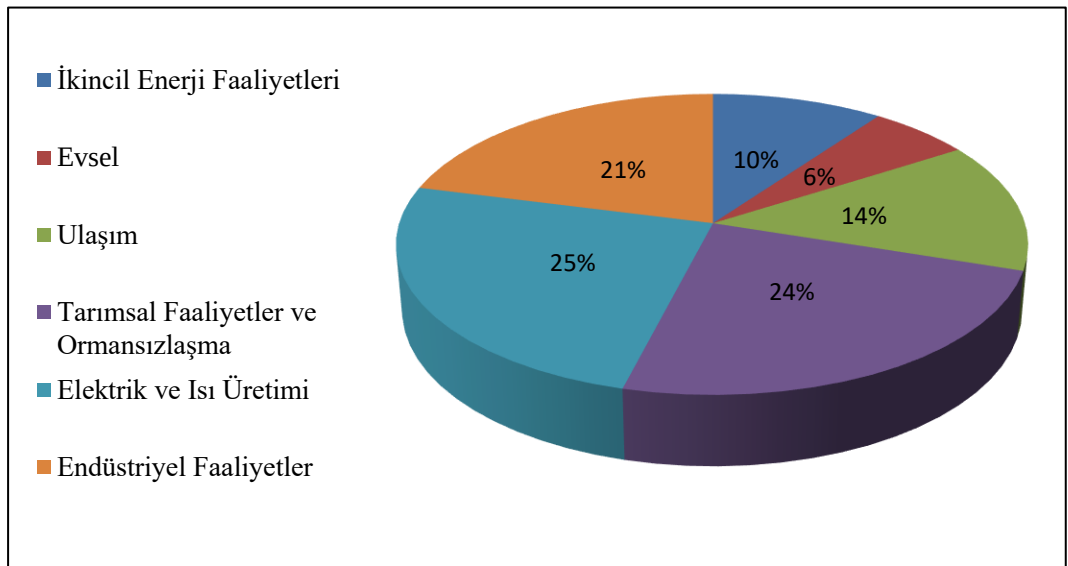
2.4.1. Dünya'da Karbon Ayak İzi

ABD Ticaret Bakanlığı sürdürülebilir üretimi yüksek öncelikli bir performans hedefi şeklinde belirtmiştir. Üretimde sürdürülebilirlik negatif ekolojik etkileri minimize eden, enerji ve doğal kaynakları muhafaza eden, personeller, topluluklar ve tüketiciler için güvenli ve iktisadi olarak uygun olan süreçlerden faydalanılarak üretilen ürünlerin oluşturulması şeklinde açıklanmaktadır [Latif, 2015].

Sürdürülebilir üretimde Sıfır Karbon Üretimi, imalatın mühim bir bileşeni olarak kabul edilebilir. Sıfır Karbon Üretimi, enerji ve atık süreç planlamasını anlayarak ve kontrol ederek sistemin çevresel performansını iyileştirmeyi içerir. Buna göre, sistemin ve bileşenlerinin kara kutu görüntüsü benimsenir ve kontrol süreçlerinin girdi ve çıktılarına odaklanılır. Sürdürülebilir üretime ulaşmak için karbon azaltma programları büyük önem taşımaktadır [Ball et al., 2009].

Ekolojik değişimle savaşmada düşük karbon ekonomisi en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilir ve başlangıçta karbon olmak üzere sera gazı emisyonlarını en aza indirmeyi amaçlar [Sözen, 2010].

Küresel çapta karbon ayak izi hacmine ilişkin yüzdesel dağılımlar Şekil 2.1'deki gibidir.



Şekil 2.1: Sektörel bazda küresel sera gazı salınımı.

2.4.2. Türkiye'nin Karbon Ayak İzi

Devletlerin Ayakizi ve biyolojik potansiyel çıktıları, Global Ayakizi Ağlarınca senelik bazda ölçülmektedir. Küresel Ayak İzi Ağı, dünya genelinde 150'den fazla devletin biyolojik kapasite gereksinimi hesaplamakta ve her yıl Ulusal Ayak İzi Hesapları yayınlamaktadır [Erden, 2014].

Yaşayan Gezegen Raporuna göre, 2008 yılında Türkiye’de kişi başı ekolojik ayak izi 2.55 kha, biyolojik kapasitesi ise 1.31 kha’dır. Ülkemizde imalatın ekolojik ayak izi, biyolojik kapasitesinin ortalama iki katına yükselmiştir. Başka bir ifadeyle, ülkemizde insanların 365 günde tükettikleri tabii kaynakların tekrardan üretimi ve atmosfere saldıkları karbonun depolanması için 2 seneye gerek duyulmaktadır. Maalesef bu sonuç, ülkemizin varolan üretim ve tüketim potansiyelinin sürdürülebilir olmadığını göstermektedir. Toplamda Türkiye’nin ekolojik ayak izinde maksimum payı yüzde 46 (kişi başı 1.17 kha) gibi ciddi payla karbon ayak izi oluşturmaktadır [WWF, 2012b].

TÜİK tarafından 1990-2015 yıllarına ait sera gazı emisyonlarının yansıtıldığı verilere göre Türkiye için 2015 yılında toplam seragazı emisyonu karbon eşdeğeri olarak 475.1 milyon ton (Mt)’dur. Öte yandan 2015 yılı emisyonlarında karbon eşdeğeri olarak maksimum oranı yüzde 71.6 ile enerji kaynaklı emisyonlar oluştururken, devamında yüzde 12.8 ile endüstriyel etkinlikler ve ürün kullanımı, yüzde 12.1 ile tarımsal etkinlikler ve yüzde 3.5 ile atığın izlediği ifade edilmektedir. [TÜİK, 2017].

Tablo 2.2: Yıllara göre karbon emisyon düzeyleri.

	Yıllar Bazında Karbon Emisyon Düzeyi (metrik ton/kişi)				
	1960	1990	2000	2010	2013
DÜNYA	3.1	4.2	4	4.8	5
OECD Ülkeleri	7.3	10.6	11.1	10.1	9.7
Türkiye	0.6	2.7	3.4	4.1	4.2

Tablo 2.2'den de görüleceği üzere Türkiye'nin yıllık bazda karbon emisyon düzeyleri devamlı artış göstermiştir. Elektrik ve ısı üretimi, tarımsal faaliyetler ve ormansızlaşma, dünyadaki karbon ayak izi büyüklüğünün temel nedenleri olarak düşünülebilir. Daha sonra, endüstriyel faaliyetler, ulaştırma, ikincil enerji faaliyetleri ve ev içi faaliyetler listelenebilir.

Tablo 2.3: Türkiye’de karbon ayak izinin bileşenleri.

Ekolojik Ayak İzleri	Oranı
Elektrik üretimi	0.26
İmalat sanayii ve inşaat	0.22
İthal ürünlerin gömülü emisyonları	0.16
Ulaştırma	0.15
Konut ve hizmetler (elektrik dışı)	0.12
Uluslararası taşımacılık kaynaklı emisyonlar	0.04
Tarım, orman, balıkçılık	0.02
Enerji üretimi (elektrik dışı)	0.02

Tüketilmiş elektrik, bütün ürün ve hizmetlerin imalatında mühim bir girdi olarak yararlanıldığından, elektrik üretimi salınımlarının indirgenmesi ve meydana gelen değişiklikler birçok ekolojik ayak izi kategorisinde eş yönde sonuçlanacaktır. Örneğin, fosil yakıtlar yerine yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimi, kendisini meydana getiren diğer faktörlerin azaltılmasını destekler [WWF, 2012a].

2.4.2.1. Düşük Karbon Ekonomisi İçin Türkiye'de Önlemler

Endüstri inkılabından sonra meydana gelen endüstrileşme akımı sonucunda fosil yakıtların tüketimi zamanla çoğalmıştır. Fosil yakıt tüketimindeki artış sonucunda ekonomik, toplumsal ve ekolojik problemler meydana gelmiş ve bu problemler politika yapımcıları alternatif kaynakların arayışına yöneltmiştir [Şirin ve Ege, 2012].

Fosil yakıt yoğunluğundaki üretim şekli bugün Kahverengi Ekonomi olarak tanımlanmaktadır. Yeşil ekonomi fikrinin arka planında ise fosil yakıt tüketiminin kısıtlanması ve ikame yenilenebilir enerji kaynaklarına eğilim düşüncesi bulunmaktadır. Yeşil Ekonomi (Green Economy) su, hava ve topraklara ilişkin ekolojik zararları ve bunlarla beraber atık, gürültü ve eko-sisteme ilişkin problemleri hesaplamayı, engellemeyi, kısıtlamayı, azaltmayı ve elimine etmeyi hedefleyen her çeşit temiz teknoloji ürün ve hizmet imalat etkinliklerinden meydana gelen bir düşük karbon ekonomisidir [Özsoy, 2013].

Ülkemizde de karbon ayak izinin en mühim sebebi elektrik üretimidir. Bu amaçla bir düşük karbon ekonomisi olan yeşil ekonomi takip edilmektedir. Enerji üretiminin klasik elektrik güç kaynaklarından ziyade yenilenebilir enerji kaynaklarıyla sağlanması yeşil enerji olarak tanımlanabilir. Bu kaynaklar hem temiz hem de çevreyle uyumludur. Buna göre yeşil enerji düşük karbon salan su, jeotermal, biyokütle, rüzgar ve güneş olarak açıklanabilir [Balat, 2008].

Zamanla artan enerji ihtiyacı ve artan fosil yakıt tüketimi birçok sorunlar meydana getirmiş bu sebeple devletler daha güvenli ve tutarlı enerji kaynak tüketimine odaklanmışlardır [Şirin ve Ege, 2012]. Ülkemizde yerli fosil enerji kaynakları kısıtlı ve yeteri düzeyde olmadığı için yüksek seviyelerde enerji alımına eğilim gösterilmektedir. Böylece dışa bağımlılığın indirgenebilmesi amacıyla mevcut sürdürülebilir enerji kaynaklara odaklanılmalıdır. Sürdürülebilir enerji kaynakları esasen uzun vadede enerji ihtiyacını giderebilecek düzeydedir. Öte yandan bu kaynaklarla yeşil ekonominin sunduğu iktisadi, sürdürülebilir ve çevreyle uyumludur [Çapık vd., 2012]. Yeşil ekonomi faaliyetleri ülkemiz için karşılaşılan tehdit ve olası sürdürülebilir enerji kaynaklarının varlığının olası fırsatları düşük karbon ekonomisinde önemli hususlardır.

2.4.2.2. Türkiye'de Karbon Ekonomisinde Tehditler

Türkiye'de karbon salımının sebep olduğu mevcut karşılaşılan ve karşılaşılmaması olası sorunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir [Erdem, 2010]:

- Enerjide dışa bağımlılık
- Enerji fiyatlarının her geçen sene bir evvelki seneye kıyasla yükselmesi
- Çevre problemlerinin artması.

Ülkemizde zamanla yükselen enerji gereksinimi bazında salınan CO₂ düzeyi artmaktadır. Ülkemiz 2009 tarihinde BM İklim Değişimi Çerçeve Sözleşmesine üye olmasına karşın Kyoto Protokolüne üyeliğine karşın CO₂ salınımını kısıtlandırmak için kalitatif bir amaç geliştirilememiştir [Kick, 2011]. Ülkemizin kümülatif sera gazı emisyonu 1990 tarihinde 100 olarak kabullenilirken 2000' de 158.8 ve 2010 tarihindeyse yükselerek 214.9 seviyelerine gelmiştir. 9 yıl önceyse enerji açığının sanayinin gelişimini sürdürdüğü bir ekonomi olan Türkiye'de global karbon ayak izi oranının ülkemizde daha da artacağını göstermektedir. Türkiye sera gazı emisyon oranının yüzde 71'i enerji kaynakları, yüzde 13 ise endüstriyel faaliyetler, yüzde 9 atıklar, yüzde 7'de tarımsal etkinlik kökenlidir [TÜİK, 2012].

TÜİK verilerine göre kişi başına sera gazı emisyonu (ton CO₂ eşdeğeri) ise 1990 yılında 3.42, 2000 yılında 4.64, 2012 yılında ise 5.85'e yükselmiştir. Türkiye'nin karbon ayak izi hızla artmaktadır. Türkiye'de karbon ayak izinin en büyük bileşeni olan elektrik kullanımı ve dolayısıyla üretimi de hızla artma eğilimindedir. Türkiye elektrik enerjisi brüt tüketimi (Türkiye brüt üretimi+dış alım-dış satım) 2003 yılında 141.2 Milyar kWh iken, 2012 yılında 242.4 Milyar kWh olarak gerçekleşmiştir [TEİAŞ, 2013]. Enerji kaynaklarına göre elektrik enerjisi üretimi ile ilgili gelişmeler Tablo 2.4' de bulunmaktadır. 2012 yılı elektrik tüketim ve üretim büyüklüğünü karşılaştırdığımızda brüt elektrik enerjisi tüketimi 242.4 milyar kWh, elektrik üretimi ise 239.5 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 2.4: Enerji kaynaklarına göre elektrik enerjisi üretimi.

Yıl	Toplam (GWh)	Kömür	Sıvı Yakıtlar	Doğalgaz (%)	Hidrolik	Yenilenebilir Enerji Atıklar
1990	57.543	35.1	6.9	17.7	40.2	0.1
2000	124.922	30.6	7.5	37.0	24.7	0.3

Tablo 2.4: Devam.

2012	239.497	28.4	0.7	43.6	24.2	3.1
------	---------	------	-----	------	------	-----

Türkiye enerjisinin günden güne yükselen enerji talebini karşılaması, ithalat bağımlılığını arttırması için zorlandı. Türkiye 1970'lerde toplam birincil enerji tüketiminin% 77'sini kendi kaynakları ile yaparken, bu oran 2010'da % 28'e geriledi. Sorunu daha somut bir şekilde ortaya koymak için, bu karşılaştırmayı sunmak yeterli görünüyor. Türkiye, hızla artan nüfusun en önemli nedenlerinden ve yeni enerji kapasitesi arasındaki enerji dengesizliği yüksek olan ekonominin ihtiyaçlarından yüksek enerji taleplerine sahiptir. Diğer bir önemli neden ise fosil yakıtların, bu rolün bir sonucu olarak, petrol ve doğal gaz gibi nispeten ucuz fosil yakıtlara ulaşma imkanı sağlayan, Türkiye için bir geçiş ülkesi olmasıdır [Kick, 2011].

2011 ve 2012 yıllarında dış ticaret açığının sırasıyla yüzde 45 ve yüzde 62'si net enerji ithalatından kaynaklanmıştır. Hızla büyümekte olan enerji talebinin karşılanabilmesi için petrol, doğal gaz ve taşkömürü ithalatı sürekli artmaktadır. Bu durum enerjide yüksek oranlı dışa bağımlılığın sürmesine yol açmakta, cari işlemler dengesi ve enerji arz güvenliği üzerinde baskı oluşturmaktadır [Kalkınma Bakanlığı, 2013].

2.4.2.3. Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Potansiyeli

Sürdürülebilir enerji kaynakları hidroelektrik, güneş, rüzgar, biyokütle ve jeotermal olarak sıralanabilir. Ülkemiz AB ülkeleriyle kıyaslandığında azami hidroelektrik (150 TWh), rüzgar (200 TWh) ve jeotermal (15 TWh) enerji potansiyelleri bulunmaktadır. Ek olarak senelik güneş enerjisi kapasitesi (15.120 TWh) ortalama 1.3 mega ton yağa eşittir. Senelik biyokütle kapasitesinin 372 TWh olduğu tahmin edilmektedir. Ancak Türkiye 1970 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak enerji talebinin% 35'ini karşılamakta, bu oran 2010 yılına kadar yüzde 10'a düşmüştür [Kick, 2011].

Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi (2009), Türkiye'nin 2023 yılına dek elektrik üretimindeki sürdürülebilir enerji oranına göre yüzde 30'un

üzerinde olması hedeflenmektedir. Ek olarak 2023 tarihine dek tüm hidroelektrik potansiyelleri kullanılacak, rüzgar enerjisi 20.000 MW'a dek elektrik üretimine, güneş enerjisinden maksimum düzeyde yararlanmaya, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarından maksimum düzeyde yararlanmaya uygun olarak belirlenmiş jeotermal potansiyele sahip olacaktır. Böylece doğal gazın elektrik üretimindeki payını azaltmak için alınacak önlemler neticesinde tüketim yüzde 30'dan alt seviyelerde düşürebilecektir [Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2013].

Türkiye'nin mevcut yüksek CO₂ emisyonunu makul bir seviyeye düşürebilmek için yapması gereken, sahip olduğu yenilenebilir enerji potansiyelini elektrik üretiminde kullanması ve böylelikle şu anki üretiminde kullandığı fosil yakıtlarla ikame etmesidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin ekonomik olarak fizibilitesine bağlı olarak, üretim süreci ve ulaştırma fosil yakıt kullanımından yenilenebilir kaynaklara dönüştürülebilir. Bu dönüşüm sayesinde Türkiye daha fazla enerji güvenliği ve fiyat istikrarı sağlayabilir, enerjide dışa bağımlılık azalabilir [Kick, 2011].

Türkiye'nin günümüzde hızla artan karbon ayak izi oranını ve sera gazı emisyonunu azaltması için fosil yakıtların ithalinden çok yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesi gerekmektedir. Bu noktada yakıt ihtiyacından, ulaşım ve elektrik üretimine kadar her alanda yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim mümkündür. Bu teknolojinin fırsata dönüştürülmesi Türkiye'nin ekonomik olarak enerji ithalin minimuma düşürülmesi ile de elini kuvvetlendirecektir [Kick, 2011]. Tablo 2.5'te Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyeli ve kurulu gücü gösterilmiş olup ülkenin önündeki fırsatın daha net anlaşılmasına fayda sağlayacaktır [Görez ve Alkan, 2016].

Tablo 2.5: Yenilenebilir enerji kaynakları ve kurulu güç.

Yenilenebilir Enerji Kaynağı	Ekonomik Yönden Değerlendirilebilen Potansiyel	Kurulu Güç (2012)	2023 Hedefi
Hidroelektrik	36.000	16.609	36.000
Güneş	50.000	-	3.000
Biokütle	2.000	-	2.000

Tablo 2.5: Devam.

Rüzgar	48.000	2.261	20.000
Jeotermal	600	162	600
Toplam	136.600	22.032	61.600

Türkiye'nin sürdürülebilir büyüme ve gelişme potansiyeli ekonomisi, yerel kaynakları gerçekleştirebilmek için enerji üretmek için yönlendirmelidir. Özellikle, hem birincil enerji arzı hem de elektrik üretimi için yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması açısından önemlidir. Onuncu gelişim planında, yerli kaynaklara dayalı enerji üretim programı bu bilinçle tasarlanmıştır. Bu programla, yerli kaynakların enerji üretimindeki payını artırarak, yabancı kaynaklara enerjiye olan bağımlılığı azaltmak amaçlanmaktadır. İlgili programın amaçları, plan belgesinde aşağıdaki şekilde sıralanmıştır [Kalkınma Bakanlığı, 2013] :

- Yerli ve uluslararası petrol ve doğal gaz çıkarımları dahil yerli kaynakların payını, birincil enerji üretiminde yüzde 28'den 2018 sonuna kadar yüzde 35'e çıkarmak
- 2012 yılında linyit bazlı elektrik üretiminin 39 milyar kWh, 2018'de 60 milyar kWh'a çıkarılması.
- Plan döneminde 10.000 MW ek hidrolik kapasitesinin devreye alınması Program hedeflerine ulaşmak için; elektrik üretimi için yerli kömür, yerli ve uluslararası petrol ve doğal gaz aramaları artırılmalı, elektrik üretimi için su kaynakları kullanılmalı, su dışındaki yenilenebilir kaynaklar değerlendirilmelidir.

Türkiye enerji yoğunluğunda, OECD ve AB-27 ortalama enerji yoğunluğuna göre onuncu kalkınma planında daha yüksek seviyelerde olduğu hususuna odaklanılmaktadır. Türkiye, son yıllarda enerji verimliliği alanında kaydedilen ilerlemeyi kaydetmiş olsa da, gelişmiş ülkelere kıyasla "enerji yoğun" ekonomiden biridir. Türkiye'nin gelişmiş ülkelere göre daha yüksek enerji yoğunluğunun azaltılması ve enerji verimliliğinde iyileştirmeler yapılması sürdürülebilir kalkınma açısından önemlidir. Bu amaçla, enerji verimliliği iyileştirme programı onuncu

kalkınma planına dahil edilmiştir. Öte yandan, doğal kaynakların etkin kullanımını sağlayacak ve tüm sektörlerde çevresel bozulmayı önleyecek temiz teknolojiler ve katma değeri yüksek yeşil ürünler geliştirmek için Ar-Ge ve inovasyon faaliyetlerinin destekleneceği plan belgesinde vurgulanmaktadır [Kalkınma Bakanlığı, 2013].

2.4.3. Türkiye’de ve Dünya’da Karbon Ayak İzi Mevzuatları

1988 yılında Birleşmiş Milletler Çevre Programı ve Dünya Meteoroloji Örgütü tarafından kurulan Hükümetlerarası İklim Değişikliği Panelinin (IPCC) rolü, bilimsel temel, potansiyel etkiler ve uyum hakkında kapsamlı, nesnel, teknik ve sosyo-ekonomik bir anlayış sağlar. ve insan kaynaklı iklim değişikliği riskinin azaltma seçenekleri. Bilimsel olarak açık ve şeffaf olarak değerlendirmek. IPCC'nin ana faaliyeti iklim değişikliği ile ilgili bilgilerin periyodik değerlendirme raporlarını sağlamaktır. Bu raporların sonuncusu Kasım 2014'te tamamlanan Beşinci Değerlendirme Raporu'dur. Nisan 2016'da yapılan IPCC'nin 43. oturumunda, 6. Değerlendirme Raporunun (AR6 Sentez Raporu) 2022 yılına kadar tamamlanması gerektiğine karar verildi [IPCC, 2016].

BM çerçevesinde Rio de Janeiro'da 1992 tarihinde Çevre ve Kalkınma Konferansında imzalanan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, iklim değişikliği problemine ilişkin küresel tepkinin temelini oluşturulması için 1992 tarihinde onaylanmıştır. 21 Mart 1994'te yürürlüğe giren Sözleşme neredeyse evrensel üyeliğe ulaşmıştır. Anlaşmanın nihai maksadı, atmosferdeki sera gazı birikiminin, iklim sistemi üzerindeki tehlikeli insan kaynaklı etkiyi önleyecek düzeyde durdurmadır. UNFCCC, genel kuralları, kuralları ve yükümlülükleri bir çerçeve sözleşme olarak tanımlar. Sözleşme, iklim sisteminin bütünlüğünü esas olarak sanayi ve diğer sektörlerden kaynaklanan karbondioksit ve diğer sera gazı emisyonlarından etkilenebilen ortak bir varlığı kabul eder [T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018].

Türkiye, BMİDÇS'in imzaya açıldığı 1992 yılında, İktisadi İşbirliği ve Gelişme Teşkilatı (OECD) üyesi olması nedeniyle, hem Ek-I hem de Ek-II listelerinde gelişmiş ülkelerle birlikte yer almıştır. Türkiye, amacını ve genel prensiplerini desteklemekle birlikte, sözleşmedeki adil olmayan konumundan dolayı 2004 yılına kadar sözleşmeye taraf olmamıştır. 2001 yılında Marakeş'te yapılan 7. Taraflar Konferansı'nda, "Türkiye'nin isminin Ek-II'den silineceği ve özgün koşulları tanınarak diğer Ek-I

lkelerinden farklı bir konumda Ek-I’de yer alacağı” yönündeki kararın ardından Türkiye, 24 Mayıs 2004 tarihinde BMİDÇS’ye ve 26 Ağustos 2009 tarihinde Kyoto Protokolü’ne taraf olmuştur [Binyıl Kalkınma Hedefleri Raporu, 2010].

Kyoto Protokolü 1997’de Kyoto’da gerçekleştiren ve BMİDÇS’in eki olarak kabul edilen uluslararası bir anlaşmadır. Protokolün ana amacı, atmosferdeki sera gazı yoğunluğunun, iklime tehlikeli etki yapmayacak seviyelerde dengede kalmasını sağlamaktır. Protokol, sera gazı emisyonunu azaltma amacı doğrultusunda sanayileşmiş ülkelere bir dizi bağlayıcı hedefler öngörmüştür. BMİDÇS, emisyonun azaltılması için ‘teşvik edici uygulamalar’, Protokol ise ‘zorlayıcı yaptırımlar’ öngörmektedir. Protokol kabul edildiğinde BMİDÇS tarafı olmayan Türkiye, EK-I Taraflarının sayısallaştırılmış salım sınırlama veya azaltım yükümlülüklerinin tanımlandığı Protokol EK-B listesine dâhil edilmemiştir. Dolayısıyla, Protokol’n 2008-2012 yıllarını kapsayan birinci yükümlülük döneminde ve 2012-2020 yıllarını kapsayan ikinci yükümlülük döneminde Türkiye’nin herhangi bir sayısallaştırılmış salım sınırlama veya azaltım yükümlülüğü bulunmamaktadır [T.C. evre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018].

Türkiye, Kyoto Protokolü’nn esneklik mekanizmalarından yararlanamamakla birlikte, Karbon Piyasası için gönüllü çevresel ve sosyal sorumluluk projeleri ilkesine uygun olarak kurulan bu mekanizmaların bağımsız çalışması uzun zamandır geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Firmalar sera gazı emisyonu miktarlarını ölçerek Gönüllü Emisyon Azaltma sertifikası alırlar [Mutlu, 2018].

2015 yılında Paris’te düzenlenen 21. BMFCCC Konferansında kabul edilen ve 4 Kasım 2016’da yürürlüğe giren Paris Anlaşması, 2020 sonrası iklim değişikliği rejiminin çerçevesini oluşturmaktadır. Paris Anlaşmasında, tüm ülkelerin katkılarına dayanan bir sisteme karar verildi. Anlaşma, iklim değişikliğine karşı mücadelede ülkelerin sınıflandırılmasını ve bu bağlamda sorumluluklarını anlamalarını temel alıyor. Bu sınıflandırma gelişmiş / gelişmekte olan bir ülkedir. Paris Anlaşması, 2020 sonrası dönemde iklim değişikliği tehdidine karşı küresel sosyo-ekonomik dayanıklılığı güçlendirmeyi amaçlamaktadır. Paris Anlaşmasının uzun vadeli hedefi, küresel sıcaklığın sanayileşme öncesi döneme kıyasla mümkün olduğu kadar 2 ° C kadar düşük tutulmasıdır. Bu kapsamda fosil yakıtlara karşı yenilenebilir enerji fikri önem kazanmıştır. Türkiye, 22 Nisan 2016 tarihinde New York’ta 175 ülkenin

temsilcisiyle Paris Anlaşmasını imzaladı. Ulusal Beyanımız, anlaşmayı geliştirmekte olan bir ülke olarak imzaladığımızı vurgulamaktadır [T.C. Dışişleri Bakanlığı, 2018].

Türkiye kendi özelinde gönüllü olarak karbon piyasasına yönelik proje geliştirme faaliyetlerine 2005 yılından beri devam etmektedir. Bu projeler 2014 yılına kadar 178'i aşmaktadır. Buna göre projelerin sayesinde Türkiye'nin 11.845.505 ton CO₂ eşdeğeri karbon salımını azaltabilme kapasitesi belirlemiştir [Binboğa, 2014].

Türkiye'nin kendi geliştirdiği projelerin yanında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Teşkilatı (United Nations Industrial Development Organization) ile birlikte organize ettiği projelerde bulunmaktadır. Bu noktada öncelikle devam eden projeleri incelemekte fayda görüyoruz. Bunlardan biri; Ozon Tabakasını İncelten Maddelerin Bertarafına Yönelik Pilot Proje 'sidir [T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015]. Buna göre projeyle "Ülke içerisinde dağınık olarak bulunan Kloroflorokarbon(CFC) grubu gazların toplanması ve Amerika'ya (plazma teknolojisine sahip bertaraf tesislerinde) bertaraf edilmek üzere götürülmesi ve bertaraf edilen gazlardan karbon piyasalarında gelir elde edilerek ülkede oluşturulacak sürdürülebilir bir bertaraf sistemi temelleri atılması planlanmaktadır." olarak belirlenmiştir [T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016].

İkinci ortak yürütülen proje ise; Hidrokloroflorokarbon (HCFC) Gazlarının Sonlandırılması Yönetim Planı Projesi (HPMP) projesi olarak adlandırılmıştır [T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016a]. Bu projede güdülen amaç ise yine projeyi yürüten Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından şu şekilde belirlenmiştir. "Türkiye'nin HCFC sonlandırma takvimi çerçevesinde sonlandırma faaliyetlerinin uygulanmasına yönelik mali ve teknik destek ve uygulama çerçevesinin tanımlanması" [T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016b].

Ülkemizin karbon ayak izi üzerine yürüttüğü üçüncü yürütülen son proje ise, "Kurumsal Kapasitenin Güçlendirmesi Projesi (6.Aşama)" şeklinde adlandırılmıştır [T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016c]. Projenin amacı; Montreal Protokolü ve ozon tabakasının korunmasına yönelik diğer ilgili ulusal ve uluslararası mevzuatın uygulanmasına yönelik idari ve teknik kapasitesinin güçlendirilmesine destek olmaktır. Faaliyetler, mevzuat geliştirme, kamuoyu bilinçlendirme ve bilgilendirme, kurumsal teknik altyapı güçlendirilmesi başlıklarında yayın, çalıştay, eğitsel faaliyet olarak gerçekleştirilmektir" şeklinde belirtilmiştir [T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016d].

2.4.4. İklim Değişikliği

İklim değişikliği hakkında bilgi edinmek için önce iklimin ne olduğunu iyice anlamak gerekir. İklimin hava durumundan farklı bir terim olduğu yaygın bir şekilde bilinmektedir. Hava durumunun ne olduğu genel olarak biliniyor olabilir. Hava durumu günden güne gördüğümüz ve dışarıda hissettiğimiz değişikliklerden oluşur. Bir gün yağmur yağabilir ve ertesi gün güneşli olabilir. Bazen soğuk bazen sıcak hava durumu yaşayabiliriz. Hava durumu bir yerden bir yere değişebilir. İklim, bir yerin normal havasıdır. İklim farklı mevsimler için farklı olabilir. Bir yer yaz aylarında çoğunlukla ılık ve kuru olabilir. Aynı yer kışın serin ve ıslak olabilir. Farklı yerler farklı iklimlere sahip olabilir. Her zaman kar yağın bölgelerin iklimi farklı iken her zaman sıcak havaya sahip olan bir bölgede iklim daha farklıdır. Dünya'nın iklimi de vardır. Dünyanın iklimi, dünyadaki bütün iklimleri bir araya getirdiğinizde elde ettiğiniz iklimdir [Weber, 2016].

İklim değişikliği, bir yerde bulunan normal hava koşullarındaki bir değişikliktir. Bu, bir yıl içinde genellikle bir yılda ne kadar yağmur yağdığının değişmesi olabilir. Ya da bir ayın veya mevsim için bir yerin normal sıcaklığındaki bir değişiklik olabilir. İklim değişikliği aynı zamanda Dünya'nın iklimindeki bir değişikliktir. Bu, Dünya'nın normal sıcaklığındaki bir değişiklik olabilir veya yağmurun ve karın genelde Dünya'ya düştüğü yerde bir değişiklik olabilir. Hava durumu birkaç saat içinde değişebilir. İklimin değişmesi yüzlerce, hatta milyonlarca yıl sürer [Weber, 2016].

Dünyanın iklimi her zaman değişir. Dünya'nın ikliminin şimdi olduğundan daha sıcak olduğu zamanlar da olmuştur ve dahasoğuk olduğu zamanlar da olmuştur. Bu zamanlar binlerce veya milyonlarca yıl sürebilir. Dünya'yı inceleyen insanlar Dünya'nın ikliminin ısınmakta olduğunu görmektedirler. Son 100 yılda Dünya'nın sıcaklığı bir derece Fahrenheit artmıştır. Bu pek görünmeyebilir ve hissedilmeyebilir. Ancak Dünya'nın sıcaklığındaki küçük değişikliklerin büyük etkileri olabilir. Bazı etkiler zaten kendini Dünya'da yaşayan canlılara hissettirir. Dünya'nın ikliminin ısınması kar ve buzulların erimesine neden olmuştur. Isınma aynı zamanda okyanusların yükselmesine de neden olmaktadır.

Birçok şey iklimin kendi başına değişmesine neden olabilir. Dünyanın güneşten uzaklığı zaman içerisinde değişebilir. Güneş az ya da çok enerji gönderebilir. Okyanusların seviyesi ve sıcaklığı değişebilir. Bir volkan patladığında iklimimizi

değiştirebilir. Çoğu bilim insanı insanoğlunun iklimi de değiştirebileceğini söylemektedir. İnsanlar araba kullanırlar, evlerini ısıtır ve soğuturlar, yemek pişirirler ve bütün bunlar enerji alır. Enerji almamızın bir yolu da kömür, petrol ve gaz yakmaktır. Bunları yakmak, gazları havaya salar. Gazlar havanın ısınmasına neden olur. Bu bir yerin iklimini değiştirebilir. Aynı zamanda Dünya'nın iklimini de değiştirebilir.

Bilim adamları, Dünya'nın sıcaklığının önümüzdeki 100 yıl boyunca artmaya devam edeceğini düşünüyor. Bu daha fazla kar ve buzun erimesine neden olur. Okyanusların seviyesinin daha da yükseleceği öngörülüyor. Bazı yerler daha sıcak olabilecekken diğer yerlerde daha çok kar yağın daha soğuk kışlar olabilir. Bazı yerlerde daha fazla yağmur yağabilir. Diğer yerlerde daha az yağmur yağabilir. Bazı yerlerde daha güçlü kasırgalar olabilir. [Clavero et al., 2011].

Bilim adamları, iklimin değişmesini önlemek için bir şeyler yapabileceğimizi vurgulamaktadırlar. İnsanlar iklim değişiminin önüne geçebilmek adına daha az enerji ve su kullanarak yardımcı olabilir. Bir odadan çıkarken ışıkları ve elektrikli cihazları olabildiğince kapatarak enerjiden tasarruf edilebilir. Ayrıca dünyaya ağaç dikerek de yardımcı olunabilir. Yardım etmenin başka bir yolu da Dünya'yı iyi tanımaktır. Dünya hakkında ne kadar fazla şey bilerseniz, iklim sorunlarının çözümünde o kadar fazla yardımcı olabilirsiniz [Schneider, 2011].

2.4.5. Sera Gazı ve Sera Gazı Emisyonu

Küresel ısınma ve iklim değişikliğini ele alma mücadelesinin ardında atmosferimizdeki sera gazlarındaki artış yatıyor. Bir sera gazı, atmosferdeki kızılötesi radyasyonu emebilen ve böylece atmosferdeki ısıyı tutan ve tutan herhangi bir gaz halindeki bileşiktir. Atmosferdeki ısıyı artırarak, sonuçta küresel ısınmaya yol açan sera etkisinden sera gazları sorumludur [Angel et al., 1998].

Küresel ısınma bilimde yeni bir kavram değildir. Bu fenomenin temelleri, 1896'da Svante Arrhenius tarafından bir asırdan fazla bir süre önce açıklanmıştır. Felsefe ve Bilim Dergisi'nde yayınlanan makalesi, karbon dioksitin şimdiye dek sera etkisi dediği bilim insanlarına katkısını ölçen ilk kişi olmuştur. Sera etkisi, güneşin Dünya'yı atmosferini gözle görülür ışık, artı ultraviyole (UV), kızılötesi (IR) ve insan

gözüyle görülemeyen diğer radyasyon türleri şeklinde vuran çok miktarda radyasyonla bombalaması nedeniyle oluşur. Dünya'ya saldıran radyasyonun yaklaşık yüzde 30'u bulutlar, buz ve diğer yansıtıcı yüzeylerle uzaya yansır. Kalan yüzde 70, NASA'ya göre okyanuslar, kara ve atmosfer tarafından emilir.

Radyasyonu emer ve ısınırken okyanuslar, kara ve atmosfer, atmosferden uzaya geçen IR termal radyasyon şeklinde ısı yayar. NASA'ya göre, gelen ve giden radyasyon arasındaki denge, Dünya'nın genel ortalama sıcaklığını yaklaşık 59 derecede Fahrenheit'ta (15 santigrat derece) tutar. Dünya'yı ısıtan bu gelen ve giden radyasyon değişimi, sera etkisi ile aynı şekilde çalıştığı için sera etkisi olarak adlandırılır. Gelen UV radyasyonu bir seranın cam duvarlarından kolayca geçer ve içindeki bitkiler ve sert yüzeyler tarafından emilir. Bununla birlikte, zayıf IR radyasyonu, cam duvarlardan geçmekte zorlanır ve içine sıkışıp serayı ısıtır.

Atmosferdeki radyasyonu emen gazlar sera gazı olarak bilinir (bazen sera gazı olarak kısaltılır) çünkü sera etkisinden büyük ölçüde sorumludurlar. Sera etkisi, küresel ısınmanın önde gelen nedenlerinden biridir. Çevre Koruma Ajansına (ÇKA) göre en önemli sera gazları su buharı (H_2O), karbondioksit (CO_2), metan (CH_4) ve azot oksittir (N_2O). Oksijen (O_2) atmosferimizdeki en bol bulunan ikinci gaz olmasına rağmen, O_2 'nin termal kızılötesi radyasyonu absorbe etmediği söylenmiştir.

Bazıları küresel ısınmanın doğal bir süreç olduğunu ve her zaman sera gazı olduğunu iddia ederken, atmosferdeki gazların miktarı yakın tarihte fazlasıyla artmıştır. Sanayi Devrimi'nden önce, atmosferik CO_2 buzullarda milyonda 180 ppm (ppm) ile sıcak arası dönemlerde 280 ppm arasında dalgalanmıştır. Endüstri Devrimi'nden bu yana, Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi'ne (NOAA) göre CO_2 miktarı son buzul çağının sona ermesinden sonra 100 kat daha hızlı arttı.

Florlu gazlar- yani, hidroflorokarbonlar, perflorokarbonlar ve kükürt heksaflorür dahil, elementli flüorun eklendiği gazlar, endüstriyel işlemler sırasında oluşturulur ve ayrıca sera gazları olarak kabul edilir. Çok küçük konsantrasyonlarda bulunmalarına rağmen, ısıyı çok etkili bir şekilde hapsederek, onları yüksek küresel ısınma potansiyeli (GWP) gazları haline getirirler. Bir zamanlar soğutucu ve aerosol itici gazlar olarak kullanılan, uluslararası anlaşmaya varılana kadar kloroflorokarbonlar (CFC'ler) da sera gazlarıdır.

Herhangi bir sera gazının küresel ısınmayı etkileme derecesini etkileyen üç faktör vardır:

- Atmosferdeki bolluğu.
- Atmosferde ne kadar kalacağı.
- Küresel ısınma potansiyeli.

Karbondioksit, kısmen atmosferdeki bolluğundan dolayı küresel ısınma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. ÇKA'ya göre, 2016 yılında ABD sera gazı emisyonları 6.511 milyon mt (7.177 milyon ton) karbondioksit eşdeğeridir ve bu da insan kaynaklı sera gazlarının yüzde 81'ine eşittir - önceki yıla göre yüzde 2.5 bir artış mevcuttur. Ek olarak, CO₂ atmosferde binlerce yıl kalır. Bununla birlikte, metan, radyasyon emiliminde CO₂'den yaklaşık 21 kat daha etkilidir ve ÇKA'ya göre atmosferde sadece 10 yıl kalmasına rağmen daha yüksek bir GWP derecesi verir.

Metan gibi bazı sera gazları, hayvan gübresi dahil, tarımsal uygulamalarla üretilmektedir. CO₂ gibi diğerleri, büyük ölçüde solunum gibi doğal işlemlerden ve kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların yanmasından kaynaklanır. Duke Üniversitesi tarafından yayınlanan araştırmaya göre, CO₂ salımının ikinci nedeni ormansızlaşmadır. Ağaçlar mobilya veya ısınma materyali üretmek için kesildiğinde normalde fotosentez için depolanan karbonu serbest bırakırlar. 2010 Küresel Orman Kaynakları Değerlendirmesi'ne göre, bu süreç yılda atmosfere yaklaşık bir milyar ton karbon salmaktadır [Schelling, 2002].

ÇKA'ya göre, ormancılık ve diğer arazi kullanım uygulamaları bu sera gazı emisyonlarının bir kısmını dengeleyebilir. Daley Live Science Dergisi'ne göre, ağaçların çoğalması karbon dioksitin fotosentez yoluyla elimine edilmesiyle atmosferdeki karbondioksit birikimini azaltmaya yardımcı olur. Ancak, ormanlar fosil yakıtların yanmasıyla atmosfere salınladığımız tüm karbondioksiti sınırlayamaz ve atmosferde birikmeyi önlemek için fosil yakıt emisyonlarında bir düşüşe ihtiyaç vardır. Dünya çapında, sera gazı yayılması, ciddi bir endişe kaynağıdır. Sanayi Devrimi'nin 2009 yılına başladığı andan itibaren, atmosferik CO₂ seviyeleri neredeyse yüzde 38 arttı ve NASA'ya göre metan seviyeleri yüzde 148 arttı, ve bu artışın çoğu son 50 yılda gerçekleşti. Dünya ısınması nedeniyle 2016, rekordaki en sıcak yıldır ve dördüncü en sıcak olma yolunda 2018 ile, Dünya Meteoroloji Örgütü'ne göre, 1998'den sonra 20 en sıcak yıl yaşandı.

Mevcut eğilimler devam ederse, bilim adamları, hükümet yetkilileri ve gittikçe artan sayıda vatandaş, küresel ısınmanın en kötü etkilerinin - aşırı hava, yükselen deniz seviyeleri, bitki ve hayvan tükenmeleri, okyanus asitleşmesi, iklimdeki büyük değişimler ve benzeri görülmemiş toplumsal karışıklıktan - korkuyorlar. Sera gazlarının küresel ısınmasının yol açtığı sorunlara cevaben, ABD hükümeti 2013 yılında bir iklim eylem planı hazırladı. Nisan 2016'da, 73 ülkeden temsilciler, sürdürülebilir bir ülkeye yatırım yaparak iklim değişikliğiyle mücadele için uluslararası bir anlaşma olan Paris Anlaşmasını imzaladılar Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne (UNFCCC) göre düşük karbonlu gelecek. ABD, 2016 yılında anlaşmayı kabul eden ülkeler arasında yer aldı, ancak Haziran 2017'de Paris Anlaşması'ndan çekilmeye başlandı. Dünyanın dört bir yanındaki araştırmacılar, sera gazı emisyonlarını azaltmanın ve etkilerini azaltmanın yollarını bulmak için çalışmaya devam ediyor. Virginia'daki Longwood Üniversitesi'ndeki biyolojik ve çevre bilimleri profesörü Dina Leech'in, bilim insanlarının araştırdığı potansiyel çözümlerden birinin atmosferdeki karbondioksiti emmek ve süresiz yere gömmek olduğunu belirtti [Schelling, 2002].

2.4.6. Hayat Boyu Değerlendirme Yönetmeliği

Üretilen ve tüketilenlerin çevre üzerindeki artan negatif etkisi beraberinde çevrenin korunmasının ehemmiyetinin artmasına sebep olmuş söz konusu etkilerin elimine edilmesi için ise tekniklerin geliştirilmesine ilişkin alanlara odaklanılmaya başlanılmıştır. Bahsi geçen yöntemlerin başında hayat boyu değerlendirme gelmektedir. HBD [ISO 14040, 2006];

- Ürünlerin hayatı boyunca çeşitli noktalardaki çevresel performansının iyileştirilmesi için imkânların belirlenmesinde,
- Sanayide, kamu kuruluşlarında veya sivil toplum kuruluşlarında (stratejik planlama, öncelik belirleme, ürün ve süreç tasarımı veya yeniden tasarımı amaçları için) karar vericilerin bilgilendirilmesinde,
- Ölçme teknikleri de dahil olmak üzere, ilgili çevresel performans göstergelerinin seçiminde,

- Pazarlamada (çevre etiketi uygulaması, çevresel bir beyanın hazırlanması veya çevresel ürün açıklaması geliştirilmesinde), yardımcı olabilir.

HBD uygulayıcıları için ISO 14044, bir HBD'nin yapılması için gereklilikleri sunmaktadır. HBD, üretim için kullanılan hammadde tedarikinden kullanıma, yaşam sonu işleme, geri dönüşüm ve son elden çıkarma işlemine kadar (örneğin kaynakların kullanımı ve emisyonların çevresel sonuçları gibi) çevresel yönleri ve potansiyel çevresel etkileri inceler. HBD çalışmasında dört aşama vardır [ISO 14040, 2006]:

- Amaç ve kapsam tanımı safhası,
- Envanter analizi safhası,
- Etki değerlendirmesi safhası,
- Yorum safhası

Isıl işleme ilgili olarak, çevresel gereksinimlerin artması ve çimento üretim sürecinin bu nedenle emisyon azaltma için gittikçe artan birimlerle güçlendirilmesi ve bunun sonucunda güç tüketiminde önemli bir artışa neden olması beklenebilir [ECRA, 2017].

HBD, hammaddenin çıkarılmasından ve tedarikinden başlayarak, enerji ve malzemelerin üretimi, kullanımı ve kullanım sonrası işlem ve nihai bertaraf yoluyla, bir ürünün ömrünü dikkate alır. Böyle bir sistematik bütünsel bakış açısı ile, yaşam boyu aşamalar veya bağımsız işlemler arasındaki olası çevresel yükün sapması belirlenebilir ve mümkünse önlenir. HBD, bir ürün sisteminin çevresel yönlerini ve etkilerini incelenmektedir. İktisadi ve toplumsal boyutlar ve etkiler genelde HBD kapsamı haricindedir. Daha kapsamlı değerlendirmeler için diğer araçlar HBD ile entegre edilebilir [ISO 14040, 2006].

2.4.7. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Yöntemi

Yaşam döngüsü, bir ürünün hammaddelerinin çıkarılması, işlenmesi, ambalajlanması, nakliyesi, inşaatı, tüketimi, bakımı ve gerektiğinde onarımı, bertaraf edilmesi, ömrünün sonunda geri dönüşümü, çeşitli işlemler nihayetinde ürünün

tekrardan elde edilmesini sağlayan süreçtir [Commission of the European Communities, 2001].

Yaşam döngüsü hakkındaki ilk görüşler, 1960'larda enerjinin verimli kullanımı, hammadde tüketimi ve atık maddeler benzeri çevresel konulara ilişkin araştırmalar ve 1980'lerin sonunda hızlanan bu çalışmalar ile hızları artmıştır [Paulson and Brog, 2003], [Jensen et al., 1997]. 1992 yılındaysa YDD, yapı ürünlerinin yaşam döngüleri süresince çevresel etkilerini değerlendirmenin bir yöntemi olarak küresel çapta kabullenilmiştir [Menke et al., 1995]. YDD, bir ürün ya da hizmetin muhtemel çevresel etkilerini incelemek amacıyla kullanılmakta olan bir tekniktir [Çelebi ve Aydın, 2005].

Bir inşaat ürününün yaşam döngüsündeki çevresel etkilerini değerlendirmek için, sistem kısıtları kapsamında, inşaat ürünü, inşaat ürününün yaşam döngüsü ve inşaat ürününün sistemi açıklanmalıdır [Trinius, 1999]. Bu açıklama Yaşam Döngüsü Değerlendirme yöntemi çerçevesinde kullanılabilir. Tanımlanan amaç ve kapsam bakımından YDD, yapı ürünleri sisteminin girdi ve çıktılarını belgelemek, yapı ürünlerinin muhtemel çevresel etkilerini değerlendirmek ve çıktıların yorumlarken yararlanılan bir tekniktir [Skone, 2000].

Sanayi ürünlerin çevresel etkilerinin yaşam döngüleri süresince incelenmesine ilişkin meydana gelen YDD yöntemi, zaman geçtikçe yapı sektöründe de kabullenilmiştir. YDD tekniğinde “yaşam döngüsü” terimi bir mal/hizmetin “beşikten mezara” takibini açıklamaktadır. “Beşik” kavramı mal/hizmetin imalatında yararlanılan ilk maddenin çıkarılması ve gereken enerji tüketimini içerdiği süreçle ilişkindir. “Mezar” ise ürün ve yararlanılan kaynakların tabiata geri döndüğü mekan ve vakit şeklinde açıklanan süreçle ilgili bir terimdir [Paulsen, 2001].

Uluslararası standart ISO 14040’a göre YDD tekniğine aşağıdaki sahalarda gereksinim duyulmaktadır [ISO, 2006].

- Bir mal/hizmetin çevre ile ilişkisinin farklı yaşam döngüsü aşamalarında tanımlanması ve bu ürün veya hizmetin iyileştirmek ve geliştirmek,
- Kamu ve özel sektörde stratejik planlama, önceliklendirme, ürün ve hizmet tasarımı ve mevcut tasarımların yenilenmesine karar vermek,
- Değerlendirme yöntemleri dahil olmak üzere çevresel performans ibareleri hakkında bir kamu politikası oluşturmak,

- Çevre beyanları ve çevre etiketler benzeri pazarlama enstrümanlarının iyileştirilmek

2.5. Çimento Sektörü ve Çimento Üretim Prosesi

Çimento, yapı inşaat sektörünün en temel malzemelerindendir. İnşaat sektörünün gelişmesiyle doğru orantılı olarak, çimento gereksiniminde ciddi artış vardır. Esas olarak çimento, kalsiyum, silisyum, alüminyum, demir oksitleri muhtevasında bulundurak kalker, marn, kiln ve demir cevherlerinin karıştırılması, oluşan farin adlı karışımın döner fırında yüksek ısıda pişirilip, elde edilen klinkerin farklı katkı maddeleri ile birlikte öğütülmesiyle elde edilir. Bu malzemenin aynı zamanda hidrolik bağlayıcı özelliği vardır. [Özdöl, 2004], [Web 1, 2013].

Çimento, su ile reaksiyona girince hidrolik bağlayıcı özelliği gösteren bir yapı malzemesidir. Çimentonun su ile karıştırılmasıyla oluşturulan harç, saat bazında kısa süre içerisinde suyu bağlamak suretiyle sertleşir ve çevresel etkilere dayanıklı bir madde haline gelir.

Kelime anlamı olarak “Çimento”, latince “caementum” kelimesinden türetilmiş, yoltulmuş taş kırıntısı anlamına gelmektedir. Bağlayıcı madde olarak daha öncelerde kireç kullanılmış olsa da yerini Çimento almıştır.

Kireç’in bağlayıcı özelliğinin yaklaşık 4.000 yıl önce bulunduğu tahmin edilmektedir. Akdeniz’den Mezopotamya’ya yapı malzemesi olarak kirecin kullanıldığı bilinmektedir. Tarih boyunca Mısır Piramitleri, Çin Seddi gibi görkemli yapıların inşası sırasında içerisinde bulunan dönemi yansıtan birçok bağlayıcı madde kullanılmıştır.

Dünya çapında çimentonun üretim ve satış faaliyetlerine 1878 yılında başlanmış, Türkiye’de ise 1912 yılında ilk özel müteşebbis ile çimento sektörü hayata geçmiştir. Türkiye’de kurulan ilk çimento fabrikası 1912 yılında faaliyete başlamıştır. Günümüzde 50 adet çimento fabrikası, 19 adet öğütme tesisi bulunmaktadır.

2.5.1. Çimento Türleri

CEM çimentosu Hidrolik sertleştirme esas olarak kalsiyum silikatların hidrasyonu ile üretilen çimentodur ve içindeki toplam reaktif CaO ve reaktif SiO₂ miktarı kütlece en az yüzde elli olmalıdır. Kompozisyon portland çimentosu klinkeri, kalsiyum sülfat ve çeşitli mineral katkılarıdır. Ölçünler bazında, CEM Çimento, 27 alt tipi kapsayan 5 esas çeşittir [Öztürk, 2016] ;

- CEM I Bu grupta, Portland Çimento klinkerin sadece kalsiyum sülfat ve ağırlıkça% 0-5 oranında küçük bir katkı maddesi ile öğütülmesiyle elde edilmektedir.
- CEM II Bu gruptaki mineral katkıların miktarı% 6-35 arasındadır. Katkı tipine bağlı olarak, bu gruptaki çimentolar ayrıca Portland Slag ve Portland Pozolan olarak da adlandırılır.
- CEM III Bu grup yüksek fırın cüruf çimentolarını içermektedir. Katkı maddesi miktarı% 36-95 arasındadır.
- CEM IV Bu grup Pozzolanik Çimentoları içerir. Cüruf veya kireçli katkı maddesi olarak kullanılmazlar. Katkı içeriği, puzzolan ve uçucu kül katkılarıyla % 11-55 arasında değişmektedir.
- CEM V Kompozit Çimentolar bu grupta bulunur. Hem cüruf (% 18-50) hem de puzzolan ve uçucu kül (% 18-50) belirtilen limitler dahilinde toplanır ve klinker oranı% 20-64 arasında kalacak şekilde miktarları ayarlanır.

2.5.2. Dünyada ve Türkiye’de Çimento Sektörü

Çimento üretim prosesi, yüksek hacimlerde ham madde, katkı malzemeleri ve enerji gerektirir. Enerji kaynağı olarak yüksek miktarlarda kömür, petrol, fuel oil, biyokütle kullanılır. Çimento üretim sürecinde çevresel ortama birçok kirletici yayılır. Ana kirleticiler, çimento fırınından kaynaklanan atmosferik kirleticilerdir. [Valderrama et al., 2012]. Literatür araştırmalara göre, CO₂ emisyon kaynaklarının yaklaşık olarak %5’i, toplam sera gazı emisyonlarının %3’i çimento üretim prosesi

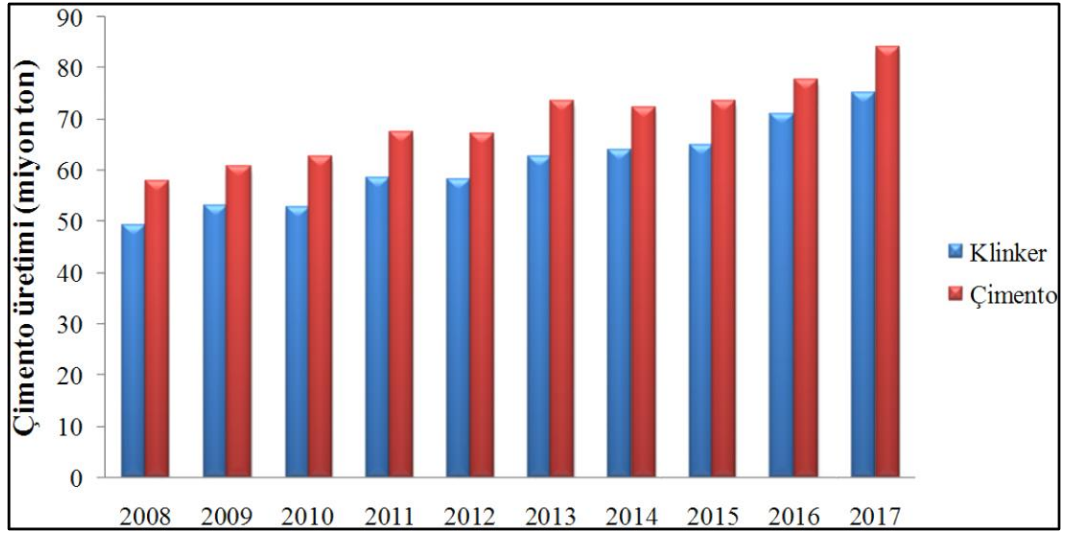
sebebiyle oluşmaktadır. [IPCC, 2005], [Ali et al., 2011], [Galvez-Martos and Schoenberger, 2014].

2007 ile 2016 yılları arasında G20 ülkelerindeki çimento üretimi miktarları ve yıllara göre değişimler Tablo 2.6’da listelenmiştir. İlgili veriler yorumlanır ise, çimento ihtiyacının gelişmiş ülkelerde azalma eğilimi, gelişmekte olan ülkelerde ise artış eğiliminde olduğu gözükmemektedir. [Stafford et al., 2016]. Söz konusu yıllarda, toplam çimento üretimindeki en yüksek oran %65 ile Çin’e aittir. Çin, 2016 yılında G20 ülkeleri arasında %68 ile en yüksek orana sahip iken; Türkiye için ise bu oran %2’dir. 2007 ile 2016 yılları arasındaki toplam çimento üretim rakamları değerlendirildiğinde, Türkiye G20 ülkeleri arasında 5. Sırada yer almaktadır.

Tablo 2.6: Çimento üreten G20 ülkeleri.

Ülke	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Çin	1361.2	1388.4	1644.0	1881.9	2063.2	2137.0	2420.0	2480.0	2350.0	2410.0
Hindistan	170.5	185.0	205.0	220.0	240.0	270.0	280.0	260.0	270.0	290.0
EU28	269.1	250.8	209.0	192.1	191.6	172.6	166.6	166.8	167.2	169.1
ABD	95.5	86.3	63.9	65.2	68.6	74.9	77.4	83.2	83.4	85.9
Türkiye	49.3	51.4	54.0	62.7	63.4	63.9	72.7	71.2	72.8	75.4
Endonezya	35.0	38.5	36.9	39.5	45.2	32.0	56.0	65.0	65.0	63.0
Arabistan	30.3	37.4	37.8	42.5	48.0	50.0	57.0	55.0	55.0	61.0
Brezilya	45.9	51.6	51.7	59.1	63.0	68.8	70.0	72.0	72.0	60.0
Rusya	59.9	53.5	44.3	50.4	56.1	53.0	72.0	68.4	69.0	56.0
Japonya	71.4	67.6	59.6	56.6	56.4	51.3	57.4	53.8	55.0	56.0
G.Kore	52.2	51.7	50.1	47.4	48.2	48.0	47.3	63.2	63.0	55.0
Meksika	38.8	37.1	35.1	34.5	35.4	35.4	34.6	35.0	39.8	40.8
Almanya	33.4	33.6	30.4	29.9	33.5	32.4	31.5	32.1	31.1	32.7
İtalya	47.5	43.0	36.3	34.4	33.1	26.2	23.1	24.0	20.8	19.3
Fransa	22.1	21.2	18.1	18.0	19.4	18.0	17.5	16.4	15.6	15.9
G. Afrika	13.7	13.4	11.8	10.9	11.2	13.8	14.9	13.8	14.0	13.6
Kanada	15.1	13.7	11.0	12.4	12.0	12.5	12.1	12.8	12.5	11.9
Arjantin	9.6	9.7	9.4	10.4	11.6	10.7	11.9	11.8	12.2	10.9
İngiltere	12.6	10.5	7.8	7.9	8.5	7.9	8.5	9.3	9.6	9.4
Avustralya	9.2	9.4	9.2	8.3	8.6	8.8	8.6	9.3	9.3	9.4
Toplam	2442.3	2453.8	2625.4	2884.1	3117	3187.2	3539.1	3603.1	3487.3	3535.9

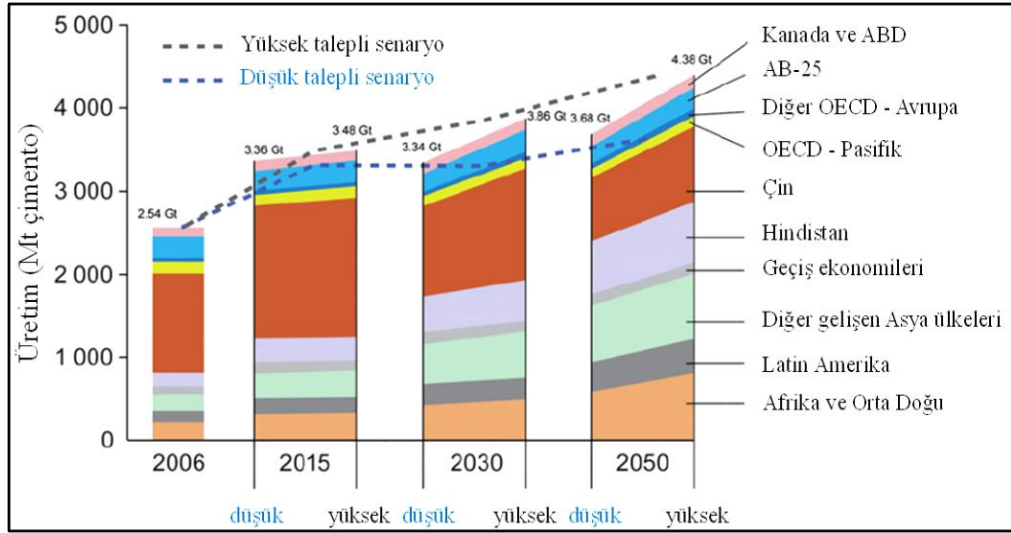
Türkiye’de, 52 adet entegre çimento fabrikası ve 20 adet çimento öğütme-paketleme tesisi bulunmaktadır [Web 2, 2019]. 2017 yılında klinker üretim kapasitesi 83 milyon ton, çimento üretim kapasitesi ise 135 milyon tondur. 2008 ile 2017 yılları arasında Türkiye’de üretilen klinker ve çimento miktarları (milyon ton) Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Belirtilen 10 yılda klinker üretimi %52; çimento üretimi ise %46 artmıştır.



Şekil 2.2: Türkiye’de klinker ve çimento üretiminin yıllara göre değişimi.

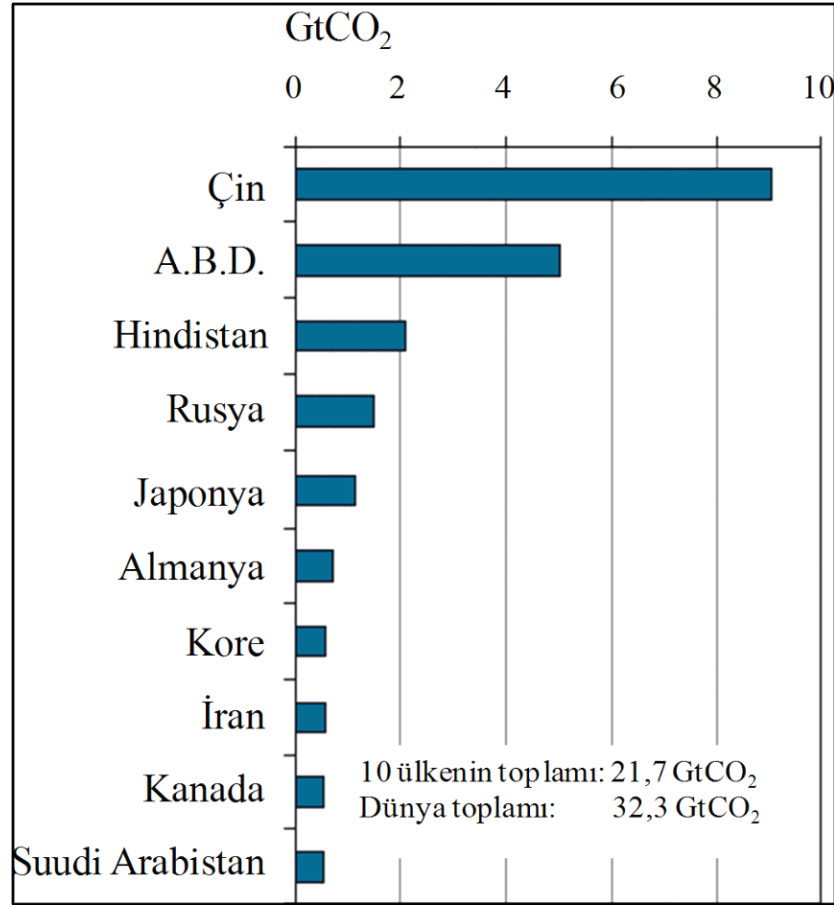
Uluslararası Enerji Ajansı’nın (IEA) yayınladığı raporda, 2030 ve 2050 yılları için çimento üretimi rakamları değerlendirilmiştir. Rapor verilerine göre 2006 yılında 3.7 Mt olarak gerçekleşen çimento üretiminin, yıllık %0.8-1.2 artış oranı ile 2030 yılında 3,9 Mt’ye, 2050 yılında 4.4 Mt’ye ulaşacağı öngörülmüştür. Çimento üretimindeki artışa Çin, Hindistan başta olmak üzere, gelişmekte diğer ülkelerin büyük oranda neden olacağı belirtilmiştir [Gürsel, 2014], [Web 3, 2019] (Şekil 2.3). Çimento üretimindeki büyümenin, artan enerji tüketimi ve buna bağlı olarak CO₂ emisyonlarında önemli miktarda artışa sebebiyet vermesi beklenmektedir. [Gürsel, 2014].

Düşük ve yüksek talepli senaryolara göre çimento üretim öngörülleri Şekil 2.3’de listelenmiştir;



Şekil 2.3: Çimento üretimi öngörülleri.

Literatür bilgilerine göre, çimento sektörü yeryüzündeki karbon dioksit emisyonlarının %5-7'sinin kaynağı olarak belirtilmektedir [Galvez-Martos and Schoenberger, 2014]. Sürecin takip edilebilmesi adına çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları yıl bazında izlenmektedir. 1972-2011 yılları baz alınarak yapılan incelemelere göre, global CO₂ emisyonları 14.8 GtCO₂'den 31.3 GtCO₂'e kadar yükselmiştir [Gürsel, 2014]. 2015 yılında ise bu değer 32.3 GtCO₂ olarak tayin edilmiştir. [IEA, 2017]. Tüm CO₂ emisyonlarının, takribi olarak üçte birini Çin oluşturuken, takip eden diğer 2 ülke ise Amerika Birleşik Devletleri ve Hindistan'dır. (Şekil 2.4).



Şekil 2.4: 2015 Dünyada en yüksek CO₂ emisyonu salımı yapan ülkeler.

CO₂ emisyonlarının oluşumuna sebep olan kaynaklar sektörel bazlı incelendiğinde, enerji üretiminin en yüksek CO₂ emisyonu kaynağı olduğu görülmektedir (takribi olarak %78). (Tablo 2.7).

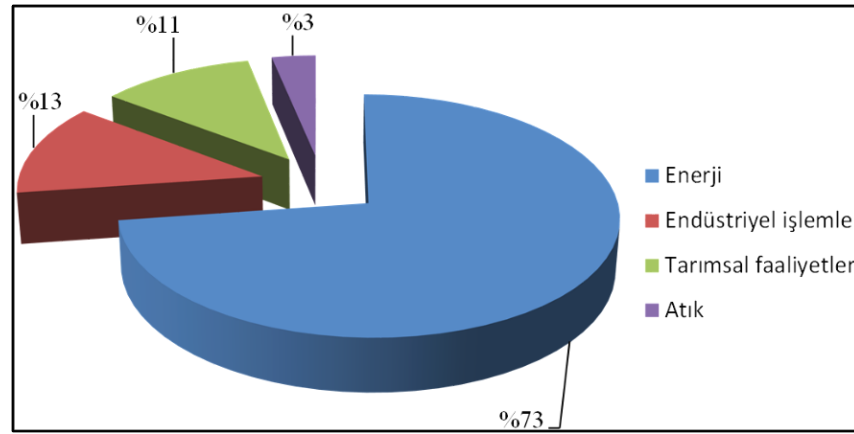
Tablo 2.7: Sabit (Stationary) CO₂ kaynaklarının, endüstrilere göre dağılımı

Proses	Kaynak sayısı	Emisyon (MtCO ₂ /yıl)
Fosil yakıtlar		
Enerji	4942	10539
Çimento üretimi	1175	932
Rafineri	638	798
Demir ve çelik endüstrisi	269	646
Petrokimya endüstrisi	470	379
Petrol ve gaz endüstrisi	Uygulanamaz	50
Diğer kaynaklar	90	33

Tablo 2.7: Devam.

Biyokütle		
Biyoetanol ve biyoenerji	303	91
Toplam	7887	13466

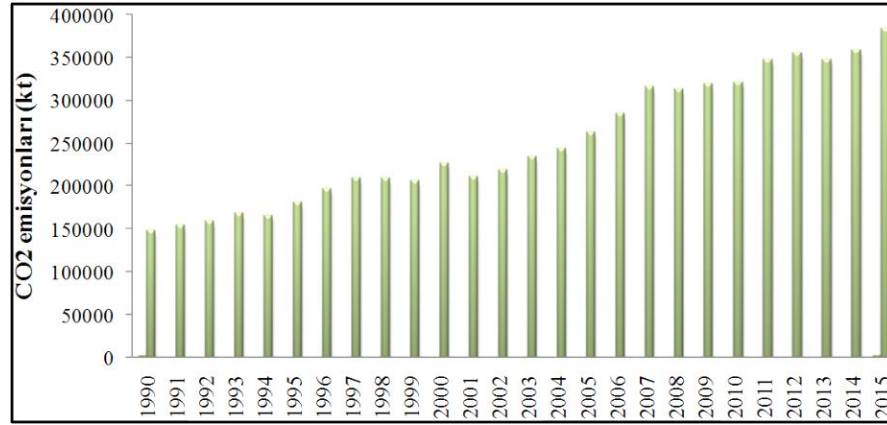
Türkiye özelinde toplam sera gazı salınımlarının %81'ini CO₂ emisyonları oluşturmaktadır. Dünya geneline göre incelenir ise, enerji üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonları %73 ile en yüksek orandadır. Diğer yüksek emisyon kaynakları ise endüstriyel işlemler ve tarımsal faaliyetler olarak sıralanmaktadır.



Şekil 2.5: Sera gazı emisyon kaynaklarının Türkiye'deki dağılımı.

2016 yılı TÜİK verilerine göre, çimento üretiminin de dahil olduğu mineral ürünlerin üretimin sırasında oluşan CO₂ emisyonları, toplam CO₂ emisyonlarının %10'unu oluşturmaktadır [TÜİK, 2016].

Türkiye'de CO₂ emisyonu miktarlarının 1990 ve 2015 yılları arasında değişimleri Şekil 2.6'de belirtilmiştir.İlgili yılları arasında CO₂ emisyonlarındaki artış oranı %158 olarak gerçekleşmiştir. Türkiye'nin küresel CO₂ emisyonu salımındaki payı ise %1.2'dir. [Web 4, 2019].



Şekil 2.6: Türkiye’de CO₂ emisyonlarının yıllara göre değişimleri.

2.5.3. Çimento Üretim Prosesi

Çimento üretim prosesi, önemli miktarda hammadde ve enerji (termal ve elektrik), klinker üretim teknikleri (ıslak sistem, kuru sistem, ön ısıtma, resirkülasyon vb.) ve çeşitli yakıt kaynakları (kömür, fuel oil, doğal gaz, lastik, tehlikeli atık, petrokok vb.) içeren oldukça kompleks bir prosestir [Stajanča and Eštokova, 2012], [Rahman et al., 2015].

Çimento üretiminde kullanılan hammadde kaynakları Tablo 2.8’de verilmektedir [Akkapeddi, 2008], [Schneider et al., 2011].

Tablo 2.8: Çimento üretiminde kullanılan hammadde kaynakları.

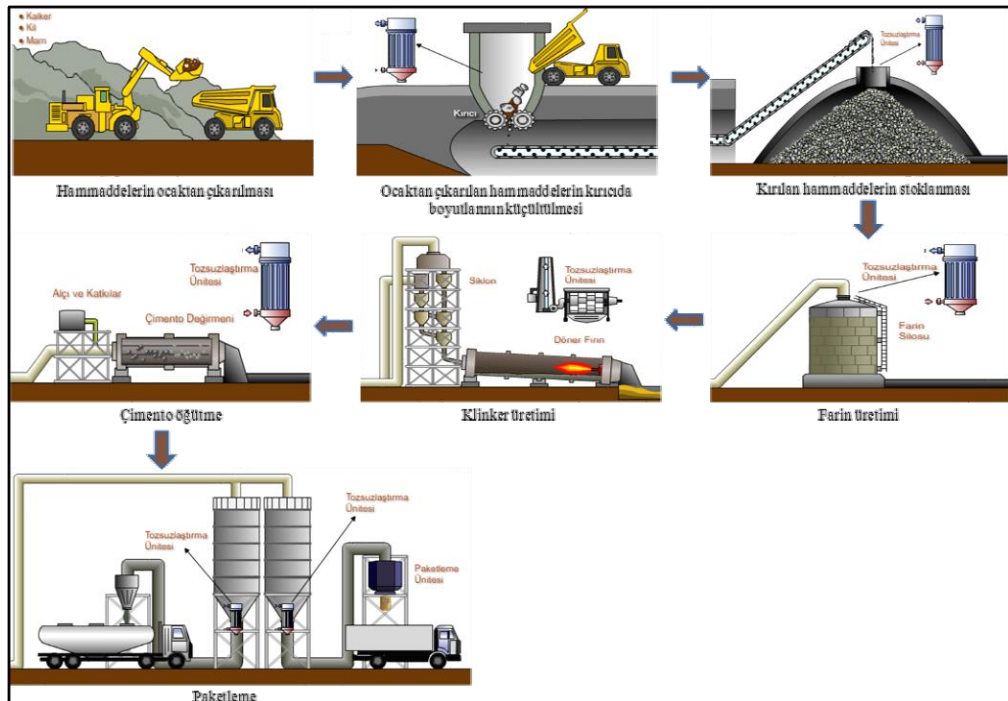
Grup	Hammadde
Ca	*Kalker, *marn, *aragonik kireçtaşı, *kalsit, Diğerleri: kireç çamuru, sulu kireç çamuru, köpük beton granülü, alkali atıklar, deniz kabuğu, mermer,
Si	*Kum, *kil, *marn, *killi şist Diğerleri: kullanılmış döküm kumu, çamur,
Si-Al	Kil Bentonite/kaolinit

Tablo 2.8: Devam.

Fe	*Demir cevheri, *kil, *haddehane pulu (demir oksit katmanı), killi şist Kontamine olmuş cevher, pirit külü, demir oksit/uçucu kül karışımları, çelik fabrikalarından çıkan tozlar, cevher yıkama.
Si-Al-Ca	Granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül, tras, bitümlü şist, kağıt artıkları, yakma prosesi külleri, petrolle kirlenmiş toprak..vb.
Al	*Al cevheri artıkları, *kil, *uçucu kül, *killi şist, metal endüstrisinden çıkan Al içerikli maddeler (Alüminyum hidroksit..vb), boksit, cevher yıkama.
S	Doğal alçıtaşı, doğal anhidrit, baca gazı kükürtünün giderilmesinden kaynaklanan alçıtaşı

*: En yaygın kullanılan kaynak.

Entegre bir çimento fabrikasında çimento üretimi genel olarak 6 aşamadan oluşmaktadır: hammaddelerin ocaktan çıkarılması, hammadde hazırlama, farin üretimi, klinker üretimi, çimento öğütme ve paketlenme. Çimento üretimi aşamaları Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7: Çimento üretim prosesi.

2.5.2.1. Madencilik Faaliyetleri

Çimento üretiminde hammaddeler kalsiyum oksit, silisyum oksit, alüminyum oksit ve demir oksitleri içeren minerallerin karışımlarıdır [EEA, 2016]. Kalker, çimento üretimi için gerekli olan kalsiyum karbonatın (CaCO_3) en uygun kaynağıdır [Caruso, 2006]. Kalker, alçı, marn ve kili içeren temel hammaddeler, genellikle patlayıcı maddeler yardımı ile doğadan temin edilmektedir [Bilgin ve Koç, 2013]. Çoğu zaman çimento fabrikaları, kalker, gibi temel hammaddelerin temin edildiği madenlere yakın konumdadır [EEA, 2016]. Çimento üretiminde düşük miktarlarda kullanılan demir cevheri, boksit, killi şist, kil ve kum gibi malzemelere, ilave mineral içeriği temin etmek amacıyla ihtiyaç duyulmaktadır [Web 5, 2019].

2.5.2.2. Hammadde Hazırlama

Hammadde ocaklarından genellikle patlayıcı maddeler yardımıyla çıkarılan hammaddeler (kalker, marn,vb), yükleyici iş makineleri ile nakil araçlarına yüklenerek kırıcılara taşınmaktadır [Bilgin ve Koç, 2013], birincil kırılarda 25 cm boyutlarına, ikincil kırıcılarda ise 5-10 cm cm boyutlarına düşürülmektedir [Caruso, 2006]. Kırıcılarda boyutları düşürülen hammaddeler çeşitlerine göre stoklanmaktadır [Web 1, 2013], [Web 5, 2019].

Bir ton klinker üretmek için ortalama 1.5 – 1.6 ton hammadde gerekmektedir [Holcim, 2006], [EEA, 2016], [Georgiopolou et al., 2018].

2.5.2.3. Farin Üretimi

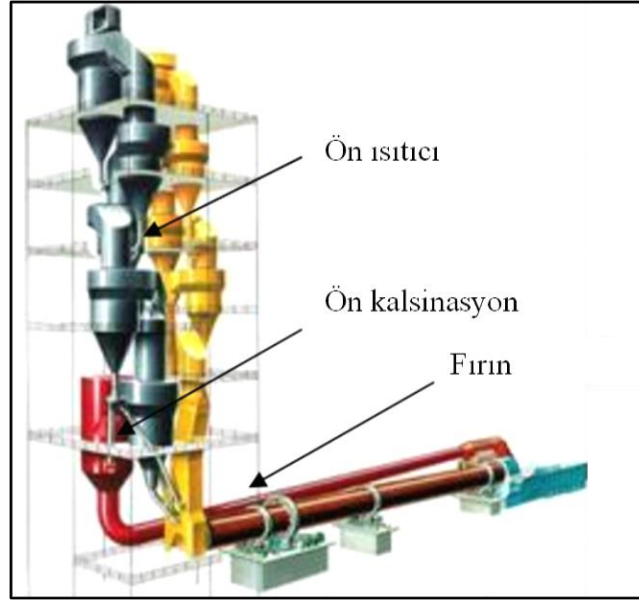
Bantlı konveyör gibi taşıyıcılar yardımıyla stoktan alınan hammaddeler farin değirmenlerinde belirli oranlarda karıştırılıp öğütülerek, hammadde karışımı olarak da adlandırılan farin üretilmektedir [Yeğinobalı, 2003], [Bilgin ve Koç, 2013]. Hammadde öğütmenin amacı uygun kimyasal oranlarda bir hammadde karışımı elde etmektir. Ayrıca, bu karışım fırında istenen yanma şartını karşılayabilmek için uygun tane büyüklüğü ve inceliğinde olmalıdır. Bu şartı sağlayabilmek için hammadde homojenize edildikten tekrar bir öğütme işleminden daha geçirilmesi gerekmektedir.

Bu öğütme işlemi de farin değirmenlerinde yapılmaktadır [Bilgin ve Koç, 2013]. Öğütme, düşey değirmenlerde veya yatay bilyalı değirmenlerde gerçekleşir [Yeğınobalı, 2003].

Kireç (CaO) daha ziyade kalker veya marn gibi kalsiyum karbonat içeren kayalardan ortama girer. Silis (SiO₂) için ise başlıca kaynak kildir. Alüminyum (Al₂O₃) ve demir oksit (Fe₂O₃) de genellikle kilden elde edilirler veya ilaveten katılırlar. Farin fırında pişerken bu oksitler önce serbest hale gelirler ve sonra, sıcaklık yükseldikçe aralarında yeni bileşikler oluştururlar. Burada kireç miktarının yeterli olması ve hammaddelerin gereken oranlarda birleştirilmesi önem kazanır [Yeğınobalı, 2003].

2.5.2.4. Klinker Üretimi

Klinker üretimi, yoğun enerji kullanımı, emisyon oluşumu, ürün kalitesi ve maliyeti açısından çimento üretim prosesinin en önemli aşamasıdır [EEA, 2016]. Bu aşama, ön ısıtıcı kulede ve fırında gerçekleşmektedir. Ön ısıtıcı kule, ısıyı fırından hammaddelere aktaran bir dizi karşıt siklonlardan oluşmaktadır. Yeni teknoloji ön aşamada, hammaddelerin kalsinasyonu başlamakta ve CO₂ oluşmaktadır [Caruso, 2006]. Hammadde karışımı olarak da adlandırılan farin, kalsiyum oksit ve diğer elementlerle reaksiyona girerek 1400-1450 °C sıcaklıkta kalsiyum silikat ve alüminatlar oluşturmak için beslenmekte ve klinker adı verilen ara ürün oluşmaktadır [Stajanča and Eštokova, 2012], [Bilgin ve Koç, 2013]. Klinkerde, kalsiyum, silisyum, alüminyum ve demir elementleri belirli oranlarda bulunmaktadır. Tüm bu hammaddeler yakıtla birlikte karıştırılarak tipik klinker kompozisyonunu oluşturmaktadır: CaO= 65 ± 3%, SiO₂= 21 ± 2%, Al₂O₃= 5 ± 1.5%, and FeO₃ = 3 ± 1% [Caruso, 2006]. Oluşan klinker, klinker stok holünde stoklanmaktadır [Bilgin ve Koç, 2013].



Şekil 2.8: Ön ısıtıcılı ve ön kalsinasyonlu çimento fırını.

Klinker üretiminin (kurutma ve ön ısıtma harici) kimyasal/mineralojik reaksiyonları için teorik termal enerji ihtiyacı 1700 MJ/t.klinker'dir. Fiili termal enerji ihtiyacı ise farklı fırın sistemleri ve boyutlarına göre değişmekle birlikte yaklaşık 3000 – 6500 MJ/t.klinker'dir [BAT, 2013], [EEA, 2016]. Çimento fırınlarında klinker oluşumu için gerekli olan yüksek sıcaklıklara ulaşabilmek için çeşitli enerji kaynakları kullanılmaktadır; fosil yakıtlar, kömür, fuel oil, petrokok, doğalgaz, dizel, alternatif yakıtlar (atık veya biyokütle vb.) gibi. Dolayısıyla, klinker üretiminde kalkerin parçalanması nedeniyle oluşan CO₂ emisyonları kadar fosil yakıt kullanımından oluşan CO₂ emisyonları da önem taşımaktadır [Stafford et al., 2016]. Çimento üretimi prosesindeki CO₂ emisyonlarının genellikle %60'ı kalkerin parçalanmasından kaynaklanırken; kalan kısmı ise yakıt yanmasından kaynaklanmaktadır [WBCSD and IEA, 2009].

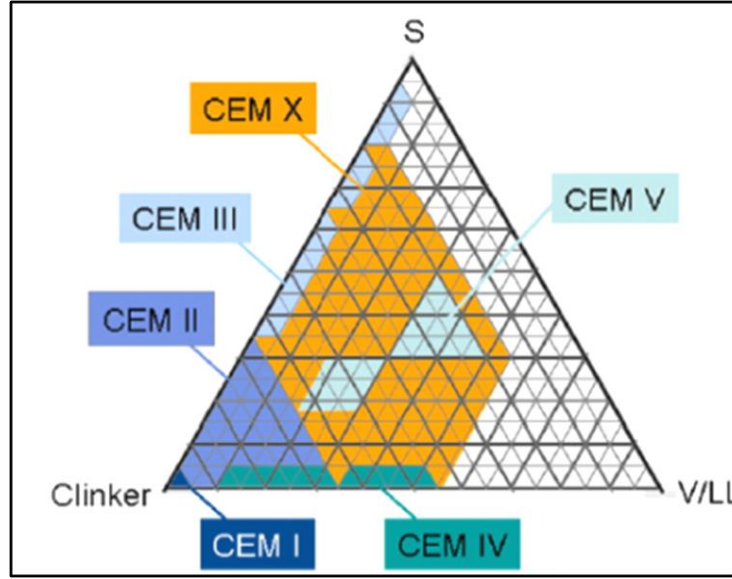
Klinker bileşiminin %90'ından fazlasını karma oksit formundaki dört ana bileşen oluşturur: C₄AF, C₃A, C₂S (belit) ve C₃S (alit). Klinker üretiminin gerçekleştiği döner fırın içerisinde oluşan kimyasal reaksiyonlar Tablo 2.9'da özetlenmiştir [Kaplan, 2018].

Tablo 2.9: Klinker üretiminde gerçekleşen bazı reaksiyonlar.

Reaksiyon adı	Etki	Reaksiyon bölgesi	Kimyasal reaksiyon	Sıcaklık (°C)
MgCO ₃ ayrışması	Ayrışma Kalsinasyon	Ön ısıtma Fırın	$\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$	550 – 960
CaCO ₃ ayrışması	Ayrışma Kalsinasyon	Ön ısıtma Fırın	$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	550 – 960
β -C ₂ S oluşumu	Geçiş	Fırın	$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$	600 - 1300
C ₄ AF oluşumu	Geçiş	Fırın	$4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_3\text{O}_{10}$	1200 - 1280
C ₃ A oluşumu	Geçiş	Fırın	$3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	1200 - 1280
C ₃ S oluşumu	Yanma Sinterleşme	Fırın	$\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{CaO} \rightarrow \text{Ca}_3\text{SiO}_5$	> 1280
Erimiş faz oluşumu	Yanma Sinterleşme	Fırın	$\text{Klinker}_{\text{katı}} \rightarrow \text{Klinker}_{\text{sıvı}}$	> 1280
Klinkerin katılaşması	Soğuma	Fırın soğutucu	$\text{Klinker}_{\text{katı}} \rightarrow \text{Klinker}_{\text{sıvı}}$	150 - 200

2.5.2.5. Çimento Öğütme

Çimento değirmenlerinde, farklı oranlarda klinker, kalker, alçı taşı ve çeşitli katkı maddeleri katılarak, çimento üretimi gerçekleştirilmektedir. Portland çimentosu, klinker ve alçı taşı ve anhidrit gibi sülfatların birlikte öğütülmesiyle üretilmektedir. Sülfatlar, çimentonun istenen ortam ayarlarının sağlanması için gereklidir. Katkılı çimentolarda (kompozit çimentolar), yüksek fırın cürufu, yapay/doğal puzzolanlar, kalker gibi diğer katkı maddeleri bulunmaktadır [EEA, 2016].



Şekil 2.9: Çimento türleri.

Klinkerin sadece kalsiyum sülfat ve minör bileşen ağırlıkça en fazla %0-5 arası mineral katkı ile öğütülmesi sonucunda Portland Çimentosu olarak adlandırılan CEM I tipi çimento elde edilir. CEM II tipi çimentoda ise, mineral katkı miktarı %6-35 arasındadır. Katkı türüne bağlı olarak bu gruptaki çimentolar Portland Cürufllu, Portland Puzolanlı gibi isimler de almaktadır. CEM III tipi olarak adlandırılan çimento grubunda, yüksek fırın cürufllu çimentolar bulunur. Katkı miktarı %36-95 arasındadır. CEM IV grubunda, puzolanik çimentolar yer alır. Bu çimentolarda cüruf veya kalker katkı maddesi olarak kullanılmaz. Katkı madde oranı puzolan ve uçucu kül katkıları ile birlikte %11-55 arasında değişmektedir. CEM V tipi çimentolar, kompoze çimentolardır. Bu tip çimentolara, cüruf (%18-50), puzolan ve uçucu kül (%18-50) miktarı belirlenen sınırlar içerisinde değiştirilerek birlikte katılır, miktarları klinker oranı %20-64 arasında kalacak şekilde ayarlanır [Web 9, 2019].

CEM I tip çimento %59'a yaklaşan kullanım oranı ile iç pazarda en yüksek oranda kullanılan çimentodur. 33.7 Mt'a ulaşan iç tüketimi ağırlıklı olarak (%90) 42.5 dayanımdadır. CEM I tip çimentoları 21.2 Mt tüketim ile CEM II tip çimentolar takip etmiştir. CEM tip çimentoların kullanımı 6.1 Mt olarak gerçekleşmiştir. Cüruf katkılı CEM III ve CEM V tipi çimentoların toplam kullanımı ise 2 Mt'a ulaşmıştır [Web 9, 2019].

2.5.2.6. Paketleme

Çimento değirmenlerinde öğütüldükten sonra silolarda depolanan çimento, torbalı veya dökme çimento olarak paketlenir. Torbalı çimentoda, çimento üç katlı özel Kraft kağıttan torbalara konur. Türkiye’de ve birçok ülkede, bu torbalar 50 kg’lıktır. Ancak bazı ülkelerde 25 kg’lık torbalar da kullanılmaktadır. Dökme çimentoda ise, çimento silodan özel tankerlere (silobas) yüklenerek hazır beton tesislerindeki veya inşaat yerindeki beton santrallerine sevk edilir [Web 1, 2013].

2.5.4. Çimento Tesislerinde Üretim Süreci

Çimento yapısında demir (Fe), alüminyum (Al), silika (Si), kalsiyum (Ca) gibi çeşitli mineraller bulunur. Tehlikeli olmayan atık çamur, fosfopsum, pirit külü, uçucu kül ve kum gibi malzemeler de bu mineralleri yapılarında içerir ve bu nedenle çimento üretimi için alternatif bir hammadde oluşturur. Yukarıda belirtilen alternatif hammaddelerin çoğu, Türkiye'deki entegre bir çimento tesisinde kullanılmaktadır [The European Cement Association, 2009].

Çimento imalatında en yaygın kullanılan hammaddeler kireçtaşı, alçı ve kildir, ancak çimento kombinasyonuna 30'dan fazla hammadde dahil edilebilir. Çimento imalatında yararlanılan hammaddenin miktarlarının doğruluğu ve imalat süresince stabil olması, imal edilen çimento kalitesi için önemlidir. Bir sonraki adımda toplanan hammadde tercih edilir, ezilir ve öğütülür ve klinker üretiminin bir sonraki aşaması için beklenen incelik ve kimyasal bileşimi sağlayacak biçimde hazırlanmaktadır. Kireçtaşı, marn, demir cevheri ve çimento üretiminde kullanılan diğer uygun hammaddelerin karıştırılması ve öğütülmesinden sağlanan klinkerin hammaddesi ise farin olarak adlandırılır. Öğütülmüş malzemedeki taşlar çıkarılır [Erdoğan, 2008].

Kırma fırın içerisinde veya fabrikada yapılabilir. Kireçtaşı, kil ve tras gibi malzemeler bir / iki aşamada ayrı ayrı parçalanır ve boyutları cm seviyesine indirilir. Tane boyut dağılımı, malzemenin homojenliğini sağlamak için daha dar bir alana çekilir. Malzemenin sertliği ve nemi kırıcının seçimini belirler. Kırma işlemi, kırılacak malzemenin yapısına göre bir veya daha fazla kılavuz çekme veya çarpma, sürtünme,

kesme ve sıkıştırma kuvvetlerinin uygulandığı kırıcılarla gerçekleştirilir. Çimento hammaddelerini kırmak için kullanılan kırıcılar şunlardır [Rende, 2013]:

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

Kireçtaşı, kil, demir cevheri, alçı taşı, çimento üretim tesislerinde kullanılan kül, kömür, petrok, akaryakıt, klinker gibi yarı mamul veya çimento gibi ürün gibi hammaddelerin stoklanması gerekir. Çimento fabrikalarında, bu malzemelerin belirli miktarlarını depolamak için uygun genişlikte depolama alanlarına ihtiyaç vardır [Yıldız, 2012]. Çimento endüstrisinde kullanılan elektriğin 2 / 3'ü hammadde, klinker ve kömür öğütme işlemlerinde tüketilmektedir [Kuleli, 2010].

Islak çimento imalatı esnasında tüketilen enerji 1300-1600 kcal / kg klinker arasında değişmektedir. Bu değer yarı ıslak çimento üretiminde 900 ila 1100 kcal / kg klinker arasındadır. Kuru üretim sürecinde 850-900 kcal / kg klinker olan enerji kullanımı, kalsinasyon sistemi üretiminde 700-800 kcal / kg klinker'e düşer. Tesislere yedek değirmen kurmak asla ekonomik değildir. Bununla birlikte, gerekli kapasite için birden fazla öğütme devresi kurulabilir ve gerekirse devrelerden biri durdurulabilir ve korunabilir. Birinci aşama öğütmede kullanılan değirmenlerin kapasiteleri çok yüksektir. İnce öğütme amaçları için kullanılan değirmenlerin kapasiteleri, istenen ürün ebadı küçüldükçe azalırken, ton başına enerji ve diğer öğütme maliyetleri artmaktadır [Yıldız, 2012].

Taşlamada kullanılan değirmen tipleri 2 tiptir: bilyalı ve dikey değirmen tipleri. Ülkemizde her iki değirmen çeşidi kullanılmaktadır. Bilyalı değirmenler çimento öğütmede kullanılır; Dikey değirmenler çoğunlukla hammadde öğütmek için kullanılır. Ancak, fabrikalarda kapasite artışı veya yenilenmesi durumunda, yüksek kapasiteler ve düşük enerji tüketimi nedeniyle dik değirmenler kullanılır [Rende, 2013].

2.5.5. Çimento Üretiminde Oluşan Emisyonlar

Çimento üretiminin atıksu, katı atık ve gürültü oluşumu gibi çevresel etkileri olmakla birlikte; en temel çevresel problemler havaya verilen emisyonlar ve enerji kullanımıdır [IFC, 2007]. Çimento üretiminde atık su, yüzey suyu kullanımı ve soğutma suyu kullanımına bağlı olarak oluşmaktadır ve su kirliliği üzerinde önemsenecek düzeyde bir etkisi bulunmamaktadır. Yakıtların depolanması, toprak ve yeraltı suyu kirliliğinin potansiyel kaynağıdır [BAT, 2013].

Çimento üretiminden oluşan temel emisyonlar, fırın sistemlerinden havaya verilen emis. Çimento fırını bacalarından çıkan gazların temel bileşenleri, yanma havasından kaynaklanan azot, CaCO_3 'ün kalsinasyonu ve yakıt yanmasından kaynaklanan CO_2 , yanma proseslerinden ve hammaddelerden kaynaklanan su buharı ve fazla oksijendir [BAT, 2013]. Avrupa Birliği tarafından yayınlanan Mevcut En İyi Teknikler Referans dökümanında, çimento üretim prosesinde oluşan kirleticiler şu şekilde sıralanmıştır [BAT, 2013], [EEA, 2016]: azot oksitler (NO_x), kükürt oksitler (SO_2) ve diğer sülfürlü bileşikler, toz, uçucu organik bileşikler (UOB), dioksin ve furanlar, metaller ve bileşikleri, hidrojen florür (HF), hidrojen klorür (HCl), karbon monoksit (CO), amonyak (NH_3) [Mishra and Siddiqui, 2014], [EEA, 2016], [Holcim, 2006], [Georgiopolou et al., 2018].

Listede adı geçmeyen CO_2 'in çimento üretimi ile ilgisi olduğu kabul edilmektedir [BAT, 2013]. IPCC'ye göre, çimento üretim prosesinden oluşan CO_2 , küresel CO_2 emisyonlarının enerji dışı endüstriyel proseslerinin en önemli kaynağıdır [Web 6, 2018]. Küresel antropojenik emisyonlarının yaklaşık %5-7'si, çimento üretiminden; diğer kısmı (yaklaşık %30-40'ı) fırın için gerekli olan sıcaklığın sağlanması için yakıtların yanmasından kaynaklanmaktadır. Yaklaşık %10'luk kısım ise, elektrik kullanımı ve nakliye işlemlerine bağlı olarak oluşmaktadır [Web 7, 2019], [Ali et al., 2011]. CO_2 emisyonları genellikle üretim prosesi ve kullanılan türüne bağlıdır. Örneğin, tipik bir 5 aşamalı ön ısıtıcı ön kalsinasyonlu ve yakıt olarak %100 petrokok kullanan bir fırında, kimyasal reaksiyonlar nedeniyle oluşan CO_2 emisyonu yaklaşık 0.53 t/klinker iken; yakıt tüketimine bağlı oluşan CO_2 emisyonu ise yaklaşık 0.31 t/klinkerdir [Georgiopolou et al., 2018]. CO_2 emisyonlarının azaltılması ve kontrolü için önerilen teknikler: katkılı çimentoların üretimi, enerji verimliliğini artırıcı proseslerin tercih edilmesi (kuru, ön ısıtıcı, ön kalsinasyonlu sistem gibi), doğal

gaz, fuel oil, atık yakıtlar gibi yakıtların tercih edilmesi, organik madde içeriği düşük hammaddelerin tercih edilmesi olarak belirtilebilir [IFC, 2007].

Karbon monoksitin (CO) ise sera gazı emisyonları üzerindeki katkısı oldukça düşüktür (toplam salınan gazların %0.5-1'inden azı). Bu emisyonlar genellikle hammaddelerin organik madde içeriği ile ilgilidir [IFC, 2007].

Azot oksitler yanma prosesinde, yanma havasında azotun oksidasyonu (termal NO_x) veya yakıttaki azot bileşiklerinin oksidasyonu (yakıt NO_x) ile oluşurlar. Termal NO_x 1200°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda oluşmaktadır. Çimento fırınlarındaki çok yüksek sıcaklıklardan dolayı, termal NO_x baskındır. Azot oksitlerin yaklaşık %95'ini azot monoksit (NO) oluştururken; %5'ini azot dioksit (NO₂) oluşturur [EEA, 2016].

Çimento fabrikalarında oluşan SO₂ emisyonları, temel olarak toplam kükürt bileşikleri girdisine ve kullanılan prosesin tipine bağlı olmakla birlikte, kükürt içeren hammaddelerin oksidasyonu ve kükürt içeren yakıtların yanması sonucu oluşur [Web 9, 2019], [Mishra and Siddiqui, 2014]. Hammadde döner fırında 370 – 420°C sıcaklıkta oksitlenerek SO₂ ve SO₃ oluşturur. SO₂, klinker içindeki kalsiyum sülfatın termal dekompozisyonu ile oluşur. SO₃ ise anhidrit olarak bulunur ve kolayca SO₂ ve O₂'ye ayrışır [Mishra and Siddiqui, 2014].

Bu kükürt oksitleri, fırının çıkışındaki düşük sıcaklıktan SO₂ olarak ortama verilir. Hammaddelerin içinde sülfat olarak bulunan kükürt sadece yüksek sıcaklıklarda bileşenlerine ayrışır ve fırını neredeyse tamamen klinker ile terk eder. Fırın içindeki kükürt, yakıtlarla birlikte SO₂'ye oksitlenir ve sinterleme bölgesinin, kalsinasyon bölgesinin ve ön ısıtıcının alt kademesinin güçlü alkali doğası gereği önemli miktarda SO₂ emisyonuna sebep olmaz [Web 9, 2019], [EEA, 2016].

Partikül maddeleri içeren toz emisyonları, çimento üretimi ile ilgili temel çevresel biridir. Tozların ana kaynakları, çimento fırınlarındaki bacalardır. Ayrıca, hammadde, yakıt, çimento ve klinkerin öğütülmesi, depolanması ve üretim sahasında kullanılan taşıtlar da tozların kaynakları arasındadır [EEA, 2016]. Bir çimento tesisindeki aşağıda yan prosesler, atık kullanımından bağımsız olarak toz emisyonlarına yol açar: hammaddelerin kırılması, hammadde konveyörleri ve elevatörleri, hammadde ve çimento depolama, hammadde, çimento ve kömür öğütme değirmenleri, yakıtların (petrokok, taş kömürü, linyit) depolanması ve çimento sevkiyatı yükleme [BAT, 2013].

Hammadde karışımı ısıtıldıkça, hammadde içinde bulunan kirleticiler (organik maddeler gibi) buharlaşıyorsa; fırın prosesinin girişinde (ön ısıtıcı, prekalsinasyon)

uçucu organik bileşikler (UOB), CO ve NH₃ oluşabilmektedir [EEA, 2016]. Ayrıca, amonyak emisyonları, NO_x azaltımında ikincil teknikler (seçici katalitik olmayan indirgeme – SNCR gibi) kullanılması durumunda da oluşabilmektedir [BAT, 2013].

Dioksin ve furanlar, fırın ve proses dizaynı, yanma şartları, hammaddeler ve emisyon kontrol sistemlerinin türü ve işletmesine bağlı olarak farklı oluşum mekanizmalarına sahiptir. Avrupa’da, tehlikeli ve tehlikesiz atıklar yakıt olarak kullanıldığı zamanlarda bile, çimento üretimi nadiren dioksin ve furanların önemli emisyon kaynağıdır [EEA, 2016]. Döner fırınlarda, yüksek sıcaklıktan (1200°C) ve uzun bekleme süresinden dolayı yakıt içeriğindeki tüm organikler tamamen parçalanmaktadır. Çimento ön ısıtıcı kulelerde ve soğutma sırasında ‘De novo sentezi sıcaklık aralığı’ olan 250 – 400°C sıcaklıkta dioksin ve furanların yeniden oluşma ihtimali mevcuttur ancak, gazın fırından çıkarken hızlıca soğutulması sayesinde D/F’lerin tekrar oluşumu beklenmez [Werther and Ogada, 1999], [Derinöz Gencel, 2011].

Çimento fırınına hammaddeler veya yakıtlar ile giren metaller, fırın çıkışındaki salımda veya klinkerin yapısında bulunabilmektedir. Ağır metallerin büyük çoğunluğu klinker yapısına katılmaktadır. Civa ve i çok uçucu metaller ise, klinker yapısına diğer metaller kadar katılmamaktadır [EEA, 2016]. Dolayısıyla, çimento prosesinde beraber yakma sürecinde, ağır metal emisyonları problem oluşturmamaktadır [Werther and Ogada, 1999].

Tablo 2.10: Türkiye’de çimento fırınlarından oluşan emisyon değerleri.

Kirlenici adı	mg/Nm ³	kg/t.klinker	t/yıl
NO _x (NO ₂)	145 - 2040	0.33 – 4.67	334 – 4670
SO ₂	4837’ye kadar	11.12’ye kadar	11125’e kadar
Toz	0.27 - 227	0.00062 – 0.5221	0.62 – 522
CO	200 - 2000	0.46 – 4.6	460 - 11500
CO ₂	-	yaklaşık 672 g/t.çimento	1.5456 milyon
TOK/UOB	1 - 60	0.0023 – 0.138	2.17 - 267
HF	0.009 – 1.0	0.021 – 2.3 g/t	0.21 - 23
HCl	0.02 – 20.0	0.046 – 46 g/t	0.046 – 46 g/t
PCDD/F	0.000012 – 0.27 Ng I-TEQ/Nm ³	0.0276 – 627 ng/t	0.0000276 – 0.627 g/yıl
Civa	0 – 0,03	0 – 69 mg/t	0 – 1311 kg/yıl

Tablo 2.10: Devam.

Σ (Cd, Tl)	0 – 0.68	0 – 1564 mg/t	0 – 1564 kg/yıl
Σ (As, Sb, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	0 – 4.0	0 – 9200 mg/t	0 – 9200 kg/yıl

2.5.6. Çimento Sektöründe Enerji Kullanımı

Çimento üretimi, yüksek enerji (termal ve elektrik) ihtiyacı olan bir prosestir. Proseste, teral enerji en çok yanma esnasında kullanılırken; elektrik enerjisi ise en çok çimento öğütmede kullanılmaktadır [Rahman et al., 2015]. Üretim girdilerine ve proses işleyişine bağlı üretimi için 3000 MJ ile 6500 MJ'dan daha fazla termal enerji kullanılabilmektedir [Web 9, 2019]. Bu aşamada, kullanılan üretim teknikleri (kuru proses, yaş proses, yarı yaş proses, yarı kuru proses gibi) önem taşımaktadır [Rahman et al., 2015]. Örneğin, Amerika'da kuru proses üretime geçilmesiyle birlikte, 1970'li yıllardaki enerji tüketimine oranla %25'lerde azalma sağlanmıştır. Tablo 2.11'de ise, fırın proseslerine göre, sp termal enerji tüketimlerdeki değişimler verilmektedir.

Günümüzde, klinker üretimi için mevcut en iyi teknik çok aşamalı ön ısıtıcı ve ön kalsinasyonlu kuru proses fırınlardır. Modern çimento fabrikalarında enerji tüketimi 3000 – 3300 MJ/t.klinker iken; ıslak proses fırınlarda bu değer 6000 MJ/t.klinker'e ulaşmaktadır [Holcim, 2006].

Tablo 2.11: Fırın prosesine göre termal enerji tüketimi.

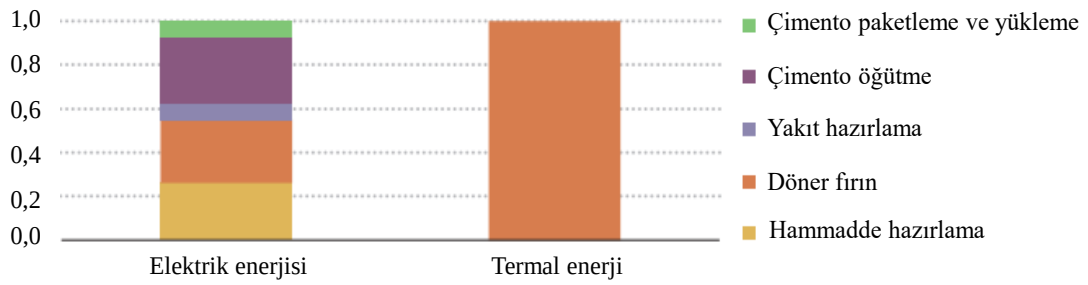
Fırın prosesi	Termal enerji tüketimi (GJ/t.klinker)
Yaş proses	5.86 – 6.28
Uzun kuru proses	4.60
Bir aşamalı siklon ön ısıtıcı	4.18
İki aşamalı siklon ön ısıtıcı	3.77
Üç aşamalı siklon ön ısıtıcı	3.55

Tablo 2.11: Devam.

Dört aşamalı siklon ön ısıtıcı ve kalsinasyonlu	3.14
Beş aşamalı siklon ön ısıtıcı, yüksek verimli soğutucu	3.01
Altı aşamalı siklon ön ısıtıcı, kalsinasyonlu yüksek verimli soğutucu	< 2.93

Tablo 2.11’den de görüldüğü gibi farklı aşamalı ön ısıtıcı sistemler, enerji tüketimini önemli miktarda azaltmaktadır. Klinkerin ön ısıtılmasında ise, çeşitli kaynaklardan edinilen döner fırın kullanıldığında, enerji tüketimindeki düşüşün %8-11’e ulaştığı belirlenmiştir [Mikulcic et al., 2016].

Çimento üretimi prosesinde enerji tüketimi, elektrik enerjisi açısından ele alındığında, %6’sını, nakliye-paketleme-yükleme aşaması ise %5’ini oluşturmaktadır [WBCSD, 2014]. Şekil 2.10’de, çimento üretimi proseslerinin elektrik enerjisi ve termal enerji tüketimindeki payları gösterilmektedir.



Şekil 2.10: Çimento üretimi aşamalarının enerji tüketim payları.

Termal enerjiye ek olarak, 1 ton çimentonun üretilmesi için büyük kısmı hammadde ve ürün değirmenleri, egzoz fanları ve konveyör bantlarında olmak üzere 80 kWh ile 130 kWh arası elektrik enerjisi kullanılmaktadır [Web 10, 2019]. Modern bir çimento fabrikasında tipik elektrik enerjisi tüketimi 110 – 120 kWh/t.çimento’dur [Rahman et al., 2015]. Tablo 2.12’de, çimento üretimi aşamalarının elektrik enerjisi ihtiyacı, kuru ve yaş çimento prosesleri için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kuru prosesin, yaş proses ile karşılaştırıldığında daha verimli olduğu gözlenmektedir. Yaş proseste, nem içeriği olan yaş çimento harcının, neminin giderilmesi için ekstra enerji ihtiyacı olmaktadır. Kuru prosesler, yaş proseslere oranla, %13 daha az elektrik enerjisi ve %28 daha az yakıt tüketimine sahiptir [Ali et al., 2011].

Tablo 2.12: Kuru ve yaş proseslerde elektrik enerjisi tüketimleri.

Üretim aşaması	Elektrik enerjisi tüketimi (kWh/t)	
	Kuru sistem	Yaş sistem
Hammadde hazırlama ve kırma	4	3
Harmanlama	44	10
Fan ve soğutucular	23	25
Toz toplayıcılar	6	8
Çimento değirmeni	45	45
Nakliye	8	58
Toplam elektrik ihtiyacı (kWh/t)	130	149
Fırınlarda yanan yakıt (lt/t)	112.5	156

2.5.7. Çimento Üretiminde Alternatif Hammadde ve Yakıt

Bu başlık altında çimento üretiminde kullanılan alternatif hammadde ve genellikle kullanılan yakıt türlerinden bahsedilecektir. İlgili kaynakların seçiminde prosese uygunluk, yüksek kalorifik değeri, düşük nem içeriği, depolama ve taşıma vb. hususlar dikkate alınmaktadır.

2.5.5.1. Alternatif Hammadde Kullanımı

Alternatif yakıtlar çimento prosesinde sadece alternatif enerji kaynağı olarak değil, hammadde kaynağı olarak da kullanılmaktadır [Akkapeddi, 2008]. Organik kısım yanarak proseste olarak kullanılmaktadır [Akkapeddi, 2008]. Tablo 2.13’de, çimento üretiminde alternatif hammadde olarak kullanılan atıklar, endüstriyel kaynakları ve ikame edildiği çimento temel hammaddeleri verilmektedir [Holcim, 2006].

Tablo 2.13: Çimento üretiminde alternatif hammadde ve kaynaklar.

Temel hammadde	Alternatif hammadde (atık)	Endüstriyel kaynak
Kil minerali (Al_2O_3)	Kaplama artıkları Alüminyum çamuru	Dökümhaneler Alüminyum endüstrisi
Kalker ($CaCO_3$)	Endüstriyel kireç (atık kalker) Kireç çamuru	Nötralizasyon prosesi Arıtma tesisi
Silikatlar (SiO_2)	Dökümhane kumu Kirlenmiş toprak	Dökümhaneler Toprak remediasyonu
Demir oksit (Fe_2O_3)	Pirit külü Mekanik çamur Kırmızı çamur	Metal yüzey kaplama Metal endüstrisi Endüstriyel atıksu arıtımı
Si-Al-Ca-Fe	Uçucu kül Kırma kum	Yakma tesisi Dökümhaneler
Sülfür	Desülfürizasyon sonucu oluşan alçı taşı Kimyasal alçı taşı	Yakma Nötralizasyon prosesi
Klor	CaF_2 (Kalsiyum florür) filtre çamuru	Alüminyum endüstrisi

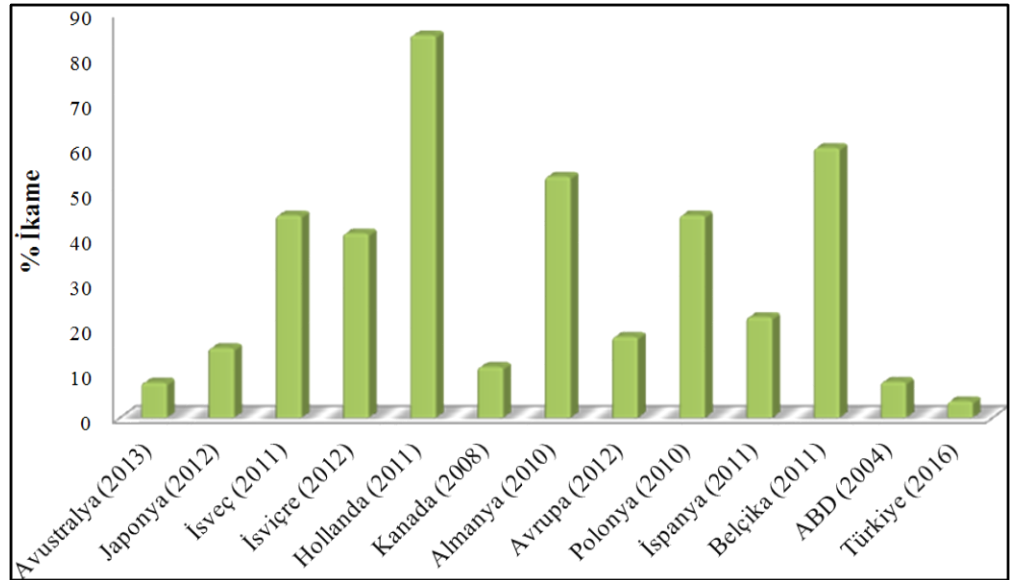
2.5.5.2. Alternatif Yakıt Kullanımı ve Beraber Yakma Faaliyetleri

Bazı ülkelerde, çimento endüstrisi sektörü toplam enerji kullanımının %12-15'ini oluşturmaktadır [Ali et al., 2011]. Çimento fırınları, klinker üretimi için gerekli yüksek sıcaklığın sağlanmasında çok çeşitli enerji kaynakları kullanmaktadır. Bunlar arasında en yaygın olanları; kömür, fuel oil ve petrokoktur. Çimento üretiminde en sık kullanılan yakıtlar ve enerji içerikleri Tablo 2.14'de verilmiştir [Caruso, 2006].

Tablo 2.14: Çimento üretiminde kullanılan yakıtların kıyaslaması.

Yakıt	Enerji içeriği (MJ/kg)	CO_2 emisyon faktörü (kg/MJ)
Kömür	32	0.103
Fuel oil	40	0.077
Doğal gaz	36	0.056
Petrokok	34	0.073 – 0.095

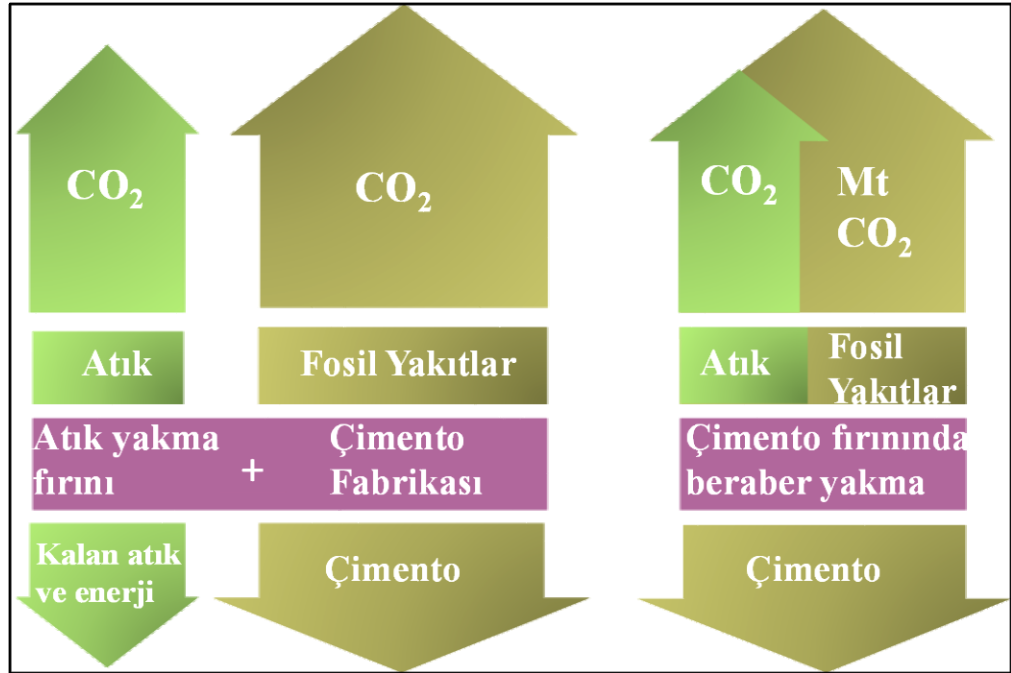
Son yıllarda, doğal gaz ve alternatif yakıtlar çimento üretiminde kullanım alanı bulmaktadır ve bu yakıtların kullanımı çevre için olduğu kadar çimento üreticileri için de geri kazanımı amacıyla kullanımı ve ikame yolu ile fosil yakıtların ve/veya hammaddelerin kullanımının azaltılması olarak tanımlanmaktadır [UNEP, 2011]. Yüksek CO₂ salımına neden olan çimento üretimi, dünya çapında hızlı bir şekilde artmaya devam ettiğinden, CO₂ emisyonları da gittikçe artmaktadır [Ali et al., 2011], [Galvez-Martos and Schoenberger, 2014]. Plastikler, ömrünü tamamlamış lastikler, arıtma çamurları, solventler, boya atıkları, atık kağıtlar, toksik olmayan metallerin katı atık bileşikleri, çimento fabrikalarında kullanılan alternatif yakıtlardandır [Rahman et al., 2015], [Lamas et al., 2013]. Kentsel katı atıklar (MSW), heterojen kompozisyonları nedeniyle kompleks ve çok değişken yakıtları oluşturmaktadır. Fiziksel ve kimyasal özellikleri eksiksiz bir atıklar, yüksek nem içeriği, düşük kalorifik değer, çok farklı boyutlarda partiküller ve yüksek kül içeriğine sahiptir. Bu nedenle, işlenmemiş kentsel atıkların yakıt olarak kullanılması zordur. Kentsel katı atıklar, mekanik (MT) veya mekanik-biyolojik işlemlerle (MBT) ayrılarak, atıktan türetilmiş yakıt elde edilmektedir [Hasanbeigi et al., 2012].



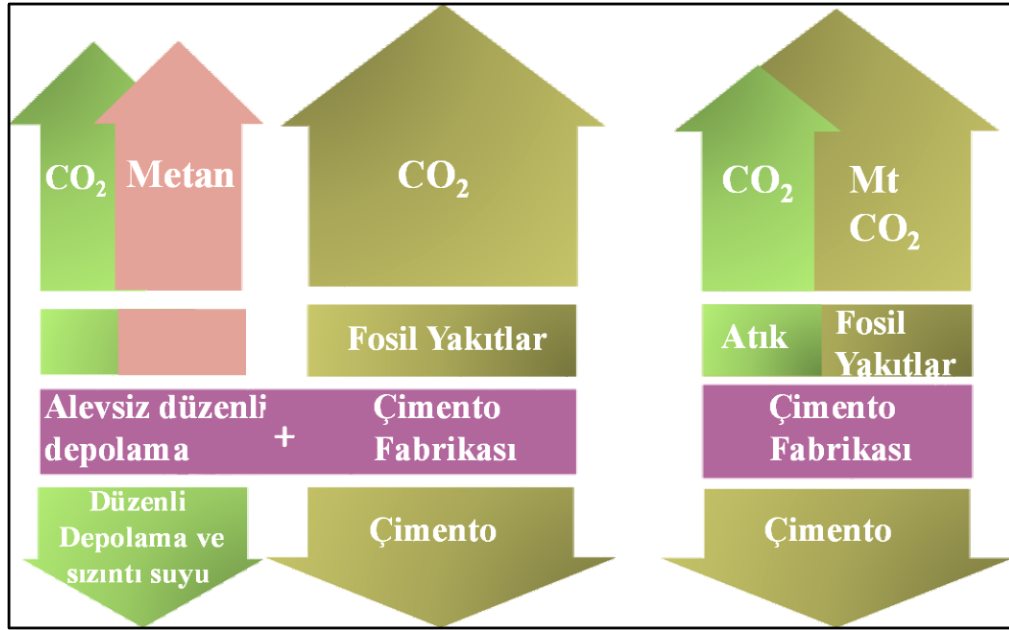
Şekil 2.11: Farklı ülkelerdeki alternatif yakıt kullanımları.

Yüksek kalorifik değeri, düşük nem içeriği, depolama ve taşıma esnasındaki kolaylığı ve daha az kirletici salımı nedeniyle, çimento üreticileri tarafından alternatif yakıt olarak tercih edilmektedir [Rahman et al., 2015], [Hasanbeigi et al., 2012]. Ayrıca gelişmiş ülkelerde, kentsel katı atıklar düzenli depolamayı azaltmak amacıyla

da yakılarak bertaraf edilmektedir. Literatürde, atıkların atık yakma tesislerinde ve çimento fırınlarında, [Vos et al., 2007], [CEMBUREAU, 2009], [Helftewes et al., 2012], [Abuşoğlu vd., 2017]. Bu çalışmaların çoğunda, atıkların çimento fırınlarında yakılmasının daha avantajlı. CO₂ emisyonlarındaki azalmayı sağlamasına ek olarak, düzenli depolama alanlarını ve bu alanlardaki metan emisyonlarını azaltması beraber yakmanın avantajları arasındadır [Akkapedi, 2008], [Hasanbeigi et al., 2012]. Düzenli depolama alanlarındaki emisyonların yaklaşık %60'ını, küresel ısınma potansiyeli CO₂'in 21 katı olan, metan 13'de atıkların çimento fırınında birlikte işlenmesinin (co-processing), atık yakma tesisleri ve düzenli depolamaya oranla üstünlüğü grafik şeklinde gösterilmektedir. Çimento sanayiinde fosil yakıtlar yerine atık kullanılması mutlak emisyonları azaltmakla birlikte (Şekil 2.12), düzenli depolama alanındaki metan emisyonlarının oluşmasını da önlemektedir (Şekil 2.13).



Şekil 2.12: Mutlak emisyonlar.



Şekil 2.13. Metan Emisyonları

**Atıkların çimento fırınında beraber yakılmasıyla oluşan mutlak emisyonlar (a) ve düzenli depolama alanında metan oluşumu açısından (b) avantajları [CEMBUREAU, 2009’dan uyarlandı].

Çimento endüstrisinde alternatif yakıt olarak atık yağlar, otomotiv, tren yolu, deniz yolu, tarım proseslerden kaynaklanmaktadır. Alternatif yakıtlar arasında, en yüksek kalorifik değerlere sahip olmalarından (33-41 MJ/kg) ve çimento fırınına verilmeden önce herhangi bir ön işlem gerektirmediklerinden dolayı, kullanımları gün geçtikçe artmaktadır [Vos et al., 2007], [Rahman et al., 2015]. Kaynaklarına bağlı olmakla birlikte; petrol bazlı ağır fuel oiler ile karşılaştırıldıklarında, atık yağlar daha fazla ağır metal, sülfür, fosfor ve toplam halojen içermektedir [Ariyaratne, 2009].

Atık su oluşan çamurun bertarafı önemli bir atık yönetimi problemi olarak değerlendirilmektedir [Chatziaras et al., 2016]. Çimento fabrikaları, arıtma çamurlarını kalorifik enerji potansiyellerinden dolayı bir alternatif yakıt kaynağı olarak kullanabilmektedir [Chatziaras et al., 2016], [Hasanbeigi et al., 2012]. Alternatif yakıt olarak kullanılan arıtma çamurlarının kalorifik değeri 16 - 17 MJ/kg’dur. Fakat arıtma çamurlarının kalorifik değerleri, atıksu karakteristiğine bağlı olarak değişim göstermektedir. Ayrıca, kuru proses ile çimento üretiminde arıtma çamurlarının, fırına verilmeden önce kurutulması gerektiğinden, bu prosesin maliyeti

önem taşımaktadır. Kurutulmuş arıtma çamuru, pnömatik veya mekanik olarak prosese verilmektedir. [Chatziaras et al., 2016], [Ariyaratne, 2009]. Prosese verilen arıtma çamurunun besleme oranının, klinker üretim kapasitesinin %5'inden fazla olmaması önerilmektedir [Hasanbeigi et al., 2012].

Endüstriler, üretim faaliyetlerine bağlı olarak yağ, plastik, lastik gibi atıklar ürettikçe, bu atıkların düzenli depolanması veya yakılması önemli bir sorun haline gelmektedir. Düzenli depolama, çok büyük arazi kullanımını gerektirmekte ve bu alanlar gerek ekolojik açıdan kötü etki yaratmaktadır. Atık yakma tesisleri, sadece atık yakma faaliyetleri ve ortaya çıkan atık ısıyı geri kullanmamaları nedeniyle çevreye zararlıdır. Buna karşılık çimento fabrikalarında atığın beraber yakılması ile ortaya çıkan ısı çimento üretimi için kullanılarak iki faaliyeti aynı anda, hem enerji hem de çevre açısından tasarruflu olarak yürütmektedir [Akkapeddi, 2008].

Kentsel katı atıkların yanması esnasında, toksinler ve ağır metaller oluşmakta ve bu maddeler kısmi olarak klinker yapısına katılmaktadır. Çimento fırınlarında kentsel katı atık kullanma durumunda en büyük endişe, atıkların heterojen kompozisyonundan dolayı, değişen sıcaklık değerleri ve nem içeriğidir. Bu nedenlerden dolayı, çimento üretiminde kentsel katı atık ikame oranı en fazla %30 olabilmektedir [Rahman et al., 2015], [Hasanbeigi et al., 2012]. Farklı alternatif yakıtların, kalorifik değerleri, nem içerikleri, ulaşılabilirlikleri, emisyon salımları, klinker kalitesine etkileri ve maksimum ikame oranları ile ilgili bilgiler, Tablo 2.15'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir [Rahman et al., 2015].

Tablo 2.15: Alternatif yakıtların karşılaştırması.

Kriter	Alternatif yakıtlar					
	ÖTL	MSW	DS	Biyo kütle	Plastik atık	Atık yağ
Kalorifik Değer (MJ/kg)	35.6	15.4	15.28	14-21	29-40	43-45
Nem içeriği	0.62	31.2	Değişken	6-12	Değişken	<3
Ulaşılabilirlik	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta
NOx emisyonu	Değişmez	Azalır	Azalır	Azalır	Değişmez	Azalır

Tablo 2.15: Devam.

CO₂ emisyonu	Azalı	Azalı	Azalı	Azalı	Azalı	Azalı
SO₂ emisyonu	Artar	Artar	Artar	Azalı	Azalı	Belirlenmedi
Ağır metal emisyonu	Azalı	Artar	Değişmez	Azalı	Artar	Azalı
Maksimum ikame oranı	%30	%30	%5	%20	Belirlenmedi	Belirlenmedi
Depolama ihtiyacı	Orta	Orta	Yüksek	Düşük	Orta	Orta
Klinker kalitesine etkisi	Değişmez	Düşük	Düşük	Belirlenmedi	Orta	Düşük
Kurulum maliyeti	Düşük	Yüksek	Yüksek	Düşük	Orta	Düşük
ÖTL: Ömrünü tamamlamış lastik MSW: Kentsel katı atık DS: Kurutulmuş arıtma çamuru						

3. MATERİYAL VE METOT

Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmeliğin EK-1’i kapsamında, faaliyetleri belirtilen bir işletmenin, sera gazı emisyonlarını izlemek için doğrulanabilir nitelikte “İzleme Planı” hazırlaması gerekmektedir.

İlgili yönetmeliğin EK-1’i kapsamında belirtilen faaliyetler çerçevesinde tesis tanımlaması gerçekleştirilir. İşletme, tesisini tanımlarken öncelikle faaliyet kapsamına dahil olan unsurları belirlemelidir. Asıl olarak Faaliyet, Yönetmeliğin EK-1’inde listelenen ve sera gazı emisyonlarına neden olan eylemleri kapsamaktadır. İşletmeler, Yönetmeliğin EK-1’i kapsamına giren faaliyetleri ve bu faaliyetlerin kapasitelerini (her faaliyete ait yıllık üretim miktarlarını) İzleme Planında tanımlamalıdır. Faaliyetler belirlendikten sonra işletme, yıllık tahminî toplam emisyonlarını belirleyerek tesis kategorisini tayin etmelidir.

Emisyon kaynağı, tesiste gerçekleşen ve emisyonlara neden olan prosesin ya da yanmanın gerçekleştiği ünitelerdir. Başka bir deyişle, emisyon kaynağı tesiste emisyonlara sebep olan üniteleri ifade eder. Emisyon kaynaklarının tümünün belirtilmesi, emisyonların hesaplanması ve İzleme Planının doldurulması açısından önemlidir.

Tesisin, Yönetmeliğin EK-1’i kapsamında belirtilen faaliyetlerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının toplamı “Yıllık Emisyon” olarak adlandırılır. [Bkz. İ&R Tebliği]. Yıllık tahminî emisyonların hesaplanmasındaki temel amaç, tesis kategorisinin belirlenmesidir [Bkz. Bl. 4.5]. İşletme yıllık tahminî emisyonlarını hesaplarken, Yönetmeliğin EK-1’i kapsamında tesisinde gerçekleşen faaliyetlerin verileri ve bu faaliyetlerle ilgili hesaplama faktörlerini [Bkz. İ&R Tebliği Madde 4 (ö)] kullanır. Tahminî emisyonların belirlenmesinde tesis, basit bir hesaplama yöntemi kullanabilir. Ancak tesisin belirlediği hesaplama yönteminin kabulü Bakanlığın yetkisi dâhilindedir. Bakanlık gerekli gördüğü durumlarda hesaplamanın açıklanmasını veya değiştirilmesini isteyebilir.

Çimento İşletmeleri özelinde durum incelenir ise, Yönetmelik EK-1 kapsamında, Çimento Fabrikaları için Klinker Üretimi ve Yakıtların Yanması sonucu oluşan emisyonlar baz alınmaktadır.

- Klinker Üretimi
- Yakıtların Yanması

Çimento fabrikalarının emisyon kaynakları, klinker üretimi, farindeki karbonat olmayan karbondan kaynaklanan emisyonlar, petrokok, taşkömürü, doğalgaz, fuel oil, kurutulmuş arıtma çamuru, ATY, atık yağ, motorin gibi yakıtlar sebebiyle oluşmaktadır.

3.1. Çalışılan Tesis

Yıllık 5 milyon ton çimento, buna yakın miktarlarda klinker üretim kapasitesine sahip çimento tesisi, kapasitesini büyük oranda kullanarak, 3 adet üretim hattı ve kuru sistem olarak adlandırılan 3 adet döner fırın ile faaliyet göstermektedir. Bilindiği üzere günümüzde, klinker üretimi için mevcut en iyi teknik çok aşamalı ön ısıtıcı ve ön kalsinasyonlu kuru proses fırınlardır. Islak proses fırınlarda gerekli enerji 6000 MJ/t.klinker iken, modern çimento fabrikalarında enerji tüketimi 3000 – 3300 MJ/t.klinker mertebesinde.

Farin olarak tabir edilen kimyasal ve fiziksel özellikler bazında istenilen standarttaki hammadde, pişirilerek ve değişken fırın rejiminde sinter reaksiyonları sonucu; klinker olarak isimlendirdiğimiz yarımamül oluşur. Fırınlarda fırın kafası ve kalsinatörlerde bulunan brülörler aracılığı ile yakıt yakılmaktadır. Fırın giriş ve çıkış ısı dağılımı aşağıdaki gibidir;

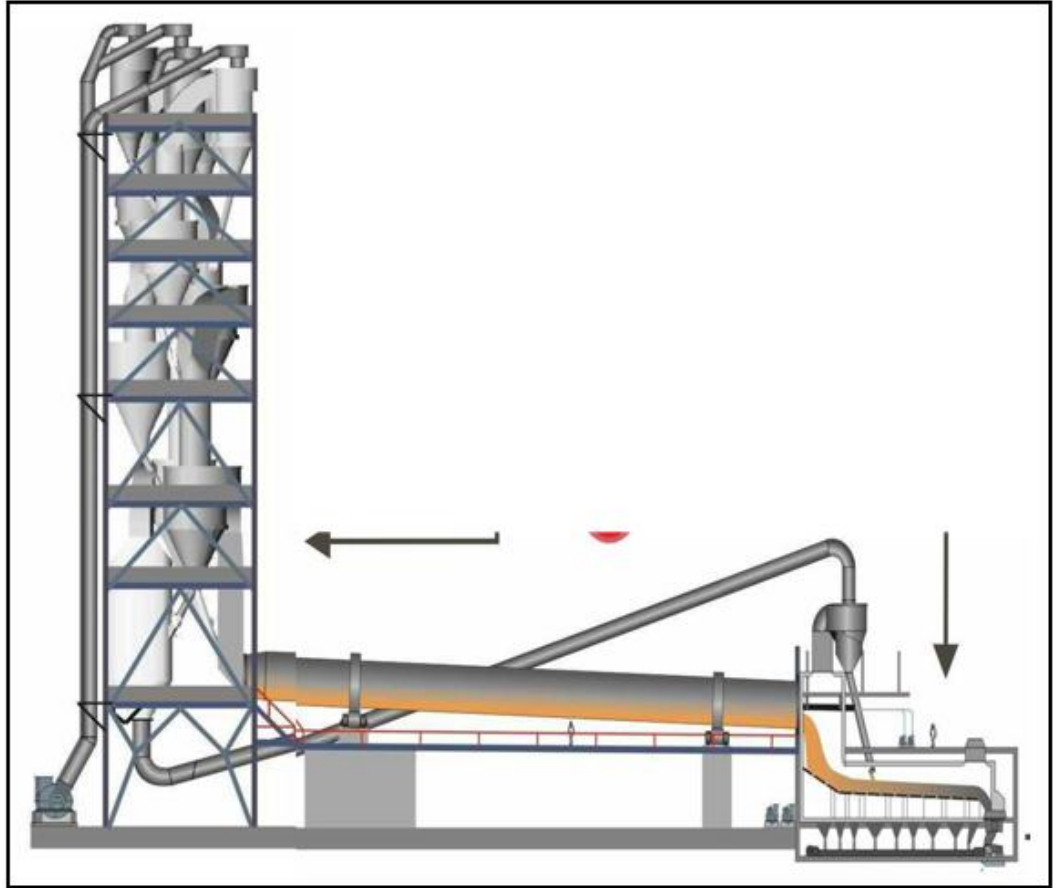
Tablo 3.1: Fırın sistemine giren ısı dağılımı.

Fırın sistemine giren ısı dağılımı	Kcal/kg klinker	%
Yakıtın yanma ısısı	686.8	97.9
Yakıt ve primer havanın ısısı	1.9	0.3
Hammaddenin ısısı	9.8	1.42
Kaçak hava	2	0.28
Taşıma ve soğutma havası	1.2	0.1
TOPLAM	701.7	100

Tablo 3.2: Fırın sisteminden çıkan ısı dağılımı.

Fırın sisteminden çıkan ısı dağılımı	Kcal/kg klinker	%
Teorik klinker pişirme ısısı	427	60.8
Soğutma yüzey ısı kayıpları	129.7	18.5
Baca gazıyla ısı kayıpları	98	14
Radyasyonla ısı kayıpları	44.8	6.4
Suyun buharlaşması	2.2	0.3
TOPLAM	701.7	100

Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de görüldüğü üzere fırına verilen ısıнын yaklaşık % 40’ı kayıp enerji konumundadır.



Şekil 3.1: Siklonlar ve döner fırın

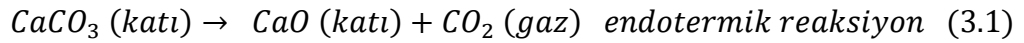
Prekalsinasyon kulelerinden sisteme beslenen farin tozu, fırın grubu ve kalsinatör grubu siklonlarının tamamını dolaşarak fırına beslenir. Siklonlarda fırından Farin tozunun, siklonlarda dolaşan sıcak gazla ısı transferi yaparak ön termal

reaksiyonların oluşması sağlanır. Bunlar; kalsinasyon, suyun uzaklaşması, organik yapıların uzaklaşması, silikat dönüşümler şeklinde sıralanabilir.

Fırın içerisinde yakıtın yanması için; yakıtın yanı sıra oksijen ve katalizöre ihtiyaç vardır. Burada katalizör olarak tabir ettiğimiz ortam sıcaklığıdır. Yakıtın tutuşması için asgari 550 °C sıcaklığa ihtiyaç vardır.

Farin tozu fırın sistemine, prekalsinasyon siklonlarının üst seviyesinden beslenir. Farin içerisinde bulunan CaCO_3 kararlı yapıda olduğundan mevcut hali ile reaksiyonlara giremez. SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 gibi majör oksitlerle reaksiyona girebilmesi için kalsinasyon işleminin tamamlanması gerekir.

Kalsinasyon;



Kimyasal bağıntısıyla ifade edilir. Bu reaksiyon 750-950 °C sıcaklık aralığında tamamlanır. Fırın kafasında ve kalsinatörde bulunan brülörlerin ısıttığı gaz siklonları yaklaşık 280 °C de terk eder. Dolayısıyla %1 nem içeriğine sahip 90 °C ortalama sıcaklığındaki farin tozu sisteme 280 °C sıcaklıkta olan ortamda beslenir ve fırına girdiği bölgede ki ortalama sıcaklık aralığı ise 1000-1100 °C dir. Ön ısıtıcı siklonların tamamını dolaşarak fırına beslenen farin tozu ön ısıtıcı kulesinde kalsinasyonun %92 si tamamlanmış olur. Bununla birlikte organik yapılardan ve nemden arındırılmış, silikat dönüşümleri tamamlanmış halde fırına beslenir.

Döner fırınlara ait genel spesifikasyonlar yukarıda belirtilmişti. Bunun yanı sıra fırınlar aksenel olarak düzlem ile %3 açıyla konumlandırılmıştır. Burada amaç malın fırın içinde öteleme hareketi yapmasıdır. Fırın içerisinde ortalama sıcaklık 1300 °C dir.



Şekil 3.2: Döner fırın.

Klinkerleşme reaksiyonları oluşumu sonrası fırın ağzından klinker yaklaşık olarak 1100-1200 °C sıcaklıkta soğutmaya düşer. Soğutma ünitesinde temel prensip atmosferden alınan soğuk hava, klinker ısınıncı olarak yakma ve taşıma havası olarak basınç farkının oluşturduğu kinetik ile hareket eder. Soğuyan klinker ise taşıma sistemleri ile silolarda yarı mamul olarak stoklanır.

Tablo 3.3: Klinkerleşme reaksiyonları.

Sıcaklık	Reaksiyonlar	
100	Serbest su buharlaşır	
573	Silikat dönüşümleri tamamlanır	
750-900	Bağlı su buharlaşır	
900 ve üzeri	$\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	
	$\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaO}.\text{SiO}_2$	
	$\text{CaO}.\text{SiO}_2 + \text{CaO} \rightarrow 2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C2S (belit)
1185-1285	$2\text{CaO} + \text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C3A (selit)
	$2\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{CaO}.\text{Fe}_2\text{O}_3$	
	$2\text{CaO}.\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF
1250-1280	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2 + \text{CaO} \rightarrow 3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C3S (alit)

Çimento üretim prosesi için gerekli olan ısı kaynağın büyük bölümünü petrokok ve taş kömürün kullanılmasıyla sağlanır. Fosil yakıtlara ikame olarak alternatif yakıt kullanımı %2 mertebesinde.

3.2. Emisyon Hesaplaması

Çimento üretim faaliyetleri çerçevesinde oluşan emisyon kaynakları, klinker üretim prosesi sırasında oluşan emisyonlar ve yakıtların yanması sebebiyle oluşan emisyonlar olarak sıralanmaktadır. Tüm üretim prosesi göz önünde bulundurulur ise, klinker üretimi sırasında oluşan emisyonlar, toplam oluşan emisyon arasında en büyük payı almaktadır. Klinker üretimi sırasında oluşan emisyonlar takribi olarak %65'e tekabül etmektedir. Üretim prosesinin gerçekleşebilmesi için gerekli petrokok, taş kömürü, doğalgaz, fueloil gibi ısı kaynakları ise yakıtların yanması sonucu oluşan emisyonlar sınıfında % 35'lik payı oluşturmaktadır.

3.2.1. Klinker Kaynaklı Emisyon Hesaplaması

Klinker kaynaklı emisyon; üretilen klinker, işletmeye özel tayin edilen emisyon faktörü ve dönüşüm faktörü dikkate alınarak hesaplanır;

Kullanılan hesaplama formülü aşağıdaki gibidir;

Öncelikli olarak faaliyete konu klinker miktarı hesaplanır

$$\begin{aligned} & \text{Üretilen Klinker} \\ &= \text{Çimento Değirmenine Beslenen Klinker} - \text{İlk Stok} \quad (3.2) \\ &+ \text{Son Stok} - \text{Satın Alınan} - \text{Satılan Klinker} \end{aligned}$$

Üretime konu klinker miktarı hesaplandıktan sonra ise yıllık emisyon miktarı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$\begin{aligned} & \text{Yıllık Tahmini Emisyon Miktarı} \quad (3.3) \\ &= \text{Faaliyet Verisi (Üretilen Klinker)} \times \text{Emisyon Faktörü} \times \text{Dön. Fak.} \end{aligned}$$

Uygulama örneğinin 2017 verilerine göre klinker kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Faaliyet Verisi (Üretilen Klinker) = 4.102.771 ton
- Emisyon Faktörü (ton- CO₂/klinker) = 0.525
- Dönüşüm Faktörü = 1

2017 verilerine göre oluşan yıllık tahmini emisyon miktarı 2.153.955 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

Uygulama örneğinin 2018 verilerine göre klinker kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Faaliyet Verisi (Üretilen Klinker) = 4.291.158 ton
- Emisyon Faktörü (ton-CO₂/klinker) = 0.5411
- Dönüşüm Faktörü = 1

2018 verilerine göre oluşan yıllık tahmini emisyon miktarı 2.321.946 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

3.2.2. Tüketilen Yakıt ve Atıklardan Kaynaklı Emisyonların Hesaplaması

3.2.2.1 Petrokok Kaynaklı Emisyonlar

Petrokok, ısı değeri yüksek olması fayda maliyet dengesi göz önünde bulundurularak taş kömürü ile birlikte en çok kullanılan yakıt kaynağıdır.

Petrokok kaynaklı emisyon; tüketilen petrokok, kullanılan petrokok analizine göre tayin edilen emisyon faktörü, kalorifik değer ve yükseltgenme faktörü dikkate alınarak hesaplanır;

Eşitlik aşağıdaki gibidir;

$$Yakıt Kaynaklı Emisyon = Tüketilen Yakıt \times Emisyon Faktörü \times Kalorifik Değer \quad (3.4)$$

Uygulama örneğinin 2017 verilerine göre petrokok kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen Petrokok Miktarı (ton) = 221.228,32
- Emisyon Faktörü (Ek-5-ton CO₂/TJ)= 97.5
- Kalorifik Değer (Ek-5-TJ/Gg) = 32.5
- Yükseltgenme Faktörü = 1

2017 verilerine göre petrokok kaynaklı yıllık tahmini emisyon miktarı 701.017 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

Uygulama örneğinin 2018 verilerine göre petrokok kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen Petrokok Miktarı (ton) = 129.749,15
- Emisyon Faktörü (Ek-5-ton CO₂/TJ) = 93.2
- Kalorifik Değer (Ek-5-TJ/t) = 0.02997
- Yükseltgenme Faktörü = 1

2018 verilerine göre petrokok kaynaklı yıllık tahmini emisyon miktarı 362.416 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

3.2.2.2 Taş Kömürü Kaynaklı Emisyonlar

Taş Kömürü, ısı değeri yüksektir ve bu nedenle fayda maliyet dengesi göz önünde bulundurularak petrokok ile birlikte en çok kullanılan yakıt kaynağıdır.

Taş kömürü kaynaklı emisyon; tüketilen taş kömürü, kullanılan taş kömürü analizine göre tayin edilen emisyon faktörü, kalorifik değer ve yükseltgenme faktörü dikkate alınarak hesaplanır;

Eşitlik aşağıdaki gibidir;

Taş Kömürü Kaynaklı Emisyon

$$= \text{Tüketilen Taş Kömürü} \times \text{Emisyon Faktörü} \times \text{Kalorifik Değer} \quad (3.5)$$

Uygulama örneğinin 2017 verilerine göre taş kömürü kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen Taş Kömürü Miktarı (ton) = 244.544,60 ton
- Emisyon Faktörü (Ek-5-ton CO₂/TJ) = 94.6
- Kalorifik Değer (Ek-5-TJ/Gg) = 25.8
- Yükseltgenme Faktörü = 1

2017 verilerine göre taş kömürü kaynaklı yıllık tahmini emisyon miktarı 596.855 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

Uygulama örneğinin 2018 verilerine göre taş kömürü kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen Taş Kömürü Miktarı (ton) = 363.666,10
- Emisyon Faktörü (Ek-5-ton CO₂/TJ) = 94.29
- Kalorifik Değer (Ek-5-TJ/t) = 0.0247
- Yükseltgenme Faktörü = 1

2018 verilerine göre taş kömürü kaynaklı yıllık tahmini emisyon miktarı 846.965 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

3.2.2.3 Doğalgaz Kaynaklı Emisyonlar

Doğalgaz kaynaklı emisyon; tüketilen doğal gaz, doğal gaz emisyon faktörü, kalorifik değer ve yükseltgenme faktörü dikkate alınarak hesaplanır;

Eşitlik aşağıdaki gibidir;

$$\text{Doğal Gaz Kaynaklı Emisyon} = \text{Tüketilen Doğal Gaz} \times \text{Emisyon Faktörü} \times \text{Kalorifik Değer} \times \text{Faktör} \quad (3.6)$$

Uygulama örneğinin 2017 verilerine göre doğalgaz kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen Doğalgaz Miktarı (Sm3) = 2.963.072
- Tüketilen Doğalgaz Miktarı (ton) = 1.985,26
- (dönüşüm faktörü 0,67 kg/m3 olarak baz alınmıştır.)
- Emisyon Faktörü (Ek-5-ton CO₂/TJ) = 56.1
- Kalorifik Değer (Ek-5-TJ/Gg) = 48
- Yükseltgenme Faktörü = 1

Doğalgaz Gelen Yıllık Tahmini Emisyon Miktarı = 5.346 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

Uygulama örneğinin 2018 verilerine göre doğalgaz kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen Doğalgaz Miktarı (Sm3) = 4.510.192,00
- Tüketilen Doğalgaz Miktarı (ton) = 3.021,83
- Emisyon Faktörü (Ek-5-ton CO₂/TJ) = 56.1
- Kalorifik Değer (Ek-5-TJ/Gg) = 48
- Yükseltgenme Faktörü = 1

Doğalgaz Gelen Yıllık Tahmini Emisyon Miktarı = 8.137 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

3.2.2.4 Fuel-Oil Kaynaklı Emisyonlar

Fuel-oil kaynaklı emisyon; tüketilen fuel-oil miktarı, emisyon faktörü, kalorifik değer ve yükseltgenme faktörü dikkate alınarak hesaplanır;

Eşitlik aşağıdaki gibidir;

$$\text{Fuel Oil Kaynaklı Emisyon} = \text{Tüketilen Miktar} \times \text{Emisyon Faktörü} \times \text{Kalorifik Değer} \times \text{Faktör} \quad (3.7)$$

Uygulama örneğinin 2017 verilerine göre fuel-oil kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen Fuel-Oil Miktarı (ton) = 1.076,33
- Emisyon Faktörü (Ek-5-ton CO₂/TJ) = 77.4
- Kalorifik Değer (Ek-5-TJ/Gg) = 40.4
- Yükseltgenme Faktörü = 1

Fuel-Oil den Gelen Yıllık Tahmini Emisyon Miktarı = 3.366 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

Uygulama örneğinin 2018 verilerine göre fuel-oil kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen Fuel-Oil Miktarı (ton) = 1.584,92
- Fuel oil ürün spesifikasyon 0,998 kg/m³ = 1 kg/m³
- Emisyon Faktörü (Ek-5-ton CO₂/TJ) = 77.4
- Kalorifik Değer (Ek-5-TJ/Gg) = 40.4
- Yükseltgenme Faktörü = 1

Fuel-Oil den Gelen Yıllık Tahmini Emisyon Miktarı = 4.956 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

3.2.2.5. Kuru Çamur Kaynaklı Emisyonlar

Kuru çamur kaynaklı emisyon; yakıt olarak kullanılan kuru çamur miktarı, emisyon faktörü, kalorifik değer ve yükseltgenme faktörü dikkate alınarak hesaplanır;

Eşitlik aşağıdaki gibidir;

$$\text{Kuru Çamur Kaynaklı Emisyon} = \text{Tüketilen Miktar} \times \text{Emisyon Faktörü} \times \text{Kalorifik Değer} \times \text{Faktör} \quad (3.8)$$

Uygulama örneğinin 2017 verilerine göre kuru çamur kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen Kuru Çamur Miktarı (ton) = 10.015,73
- Emisyon Faktörü (ton CO₂/TJ)= 110
- Kalorifik Değer (TJ/Gg) = 11.18
- Yükseltgenme Faktörü = 1

Kuru Çamurdan kaynaklanan Yıllık Tahmini Emisyon Miktarı = 12.317 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

Uygulama örneğinin 2018 verilerine göre kuru çamur kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen Kuru Çamur Miktarı (ton) 10.341,80
- Emisyon Faktörü (ton CO₂/TJ) 90,113
- Kalorifik Değer (TJ/T) 0.0133
- Yükseltgenme Faktörü 1

Kuru Çamur dan Gelen Yıllık Tahmini Emisyon Miktarı = 12.395 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

3.2.2.6. Atıktan Türetilmiş Yakıt Kaynaklı Emisyonlar

Atıktan Türetilmiş Yakıtlardan kaynaklanan emisyon; yakıt olarak kullanılan ATY miktarı, emisyon faktörü, kalorifik değer ve yükseltgenme faktörü dikkate alınarak hesaplanır;

Eşitlik aşağıdaki gibidir;

$$\text{ATY Kaynaklı Emisyon} = \text{Tüketilen Miktar ATY} \times \text{Emisyon Faktörü} \times \text{Kalorifik Değer} \times \text{Faktör} \quad (3.9)$$

Uygulama örneğinin 2017 verilerine göre atıktan türetilmiş yakıt kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen ATY Miktarı (ton) = 6.040,18
- Emisyon Faktörü (ton CO₂/TJ) = 83
- Kalorifik Değer (TJ/Gg) = 17.83
- Yükseltgenme Faktörü = 1

ATY den kaynaklanan Yıllık Tahmini Emisyon Miktarı = 8.939 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

Uygulama örneğinin 2018 verilerine göre atıktan türetilmiş yakıt kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen ATY Miktarı (ton) = 14.498,91
- Emisyon Faktörü (ton CO₂/TJ) = 90,125
- Kalorifik Değer (TJ/T) = 0.020108611
- Yükseltgenme Faktörü = 1

ATY den Gelen Yıllık Tahmini Emisyon Miktarı = 26.276 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

3.2.2.7 Atık Yağ Kaynaklı Emisyonlar

Atık Yağ kaynaklı emisyon; yakıt olarak kullanılan atık yağ miktarı, emisyon faktörü, kalorifik değer ve yükseltgenme faktörü dikkate alınarak hesaplanır;

Eşitlik aşağıdaki gibidir;

Atık Yağ Kaynaklı Emisyon

$$= \text{Tüketilen Miktar} \times \text{Emisyon Faktörü} \times \text{Kalorifik Değer} \times \text{Faktör} \quad (3.10)$$

Uygulama örneğinin 2017 verilerine göre atık yağ kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen Atık Yağ Miktarı (ton) = 37.50
- Emisyon Faktörü (Ek-5-ton CO₂/TJ) = 73.3
- Kalorifik Değer (Ek-5-TJ/Gg) = 40.2
- Yükseltgenme Faktörü = 1

Atık Yağ'dan Kaynaklanan Yıllık Tahmini Emisyon Miktarı = 110.50 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

Uygulama örneğinin 2018 verilerine göre atık yağ kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen Atık Yağ Miktarı (ton) = 42.05
- Emisyon Faktörü (Ek-5-ton CO₂/TJ) = 73.3
- Kalorifik Değer (Ek-5-TJ/Gg) = 40.2
- Yükseltgenme Faktörü = 1

Atık Yağ dan Gelen Yıllık Tahmini Emisyon Miktarı = 123.91 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

3.2.2.8. Motorin Kaynaklı Emisyonlar

Motorin kaynaklı emisyon; tüketilen motorin miktarı, emisyon faktörü, kalorifik değer ve yükseltgenme faktörü dikkate alınarak hesaplanır;

Eşitlik aşağıdaki gibidir;

Motorin Kaynaklı Emisyon

$$= \text{Tüketilen Miktar} \times \text{Emisyon Faktörü} \times \text{Kalorifik Değer} \times \text{Faktör} \quad (3.11)$$

Uygulama örneğinin 2017 verilerine göre motorin kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen Motorin Miktarı (ton) = 52,474
- Emisyon Faktörü (ton CO₂/TJ) = 74.1
- Kalorifik Değer (TJ/Gg) = 43
- Yükseltgenme Faktörü = 1

Motorin den Gelen Yıllık Tahmini Emisyon Miktarı (KA10) = 167.20
ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

Uygulama örneğinin 2018 verilerine göre motorin kaynaklı emisyon miktarı hesabı aşağıdaki gibidir;

- Tüketilen Motorin Miktarı (ton) = 2,839
- 3419,90 lt yoğunluk hesabından 830 kg/m³ = 0,830 kg/lt = 2.939
- Emisyon Faktörü (ton CO₂/TJ) = 74.1
- Kalorifik Değer (TJ/Gg) = 43
- Yükseltgenme Faktörü = 1

Motorin den Gelen Yıllık Tahmini Emisyon Miktarı = 9,04 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

3.3. Sonuçların Karşılaştırılması

Faaliyet bazlı klinker ve yakıtlar kaynaklı emisyonların değerleri, işletme verileri doğrultusunda hesaplanmıştır. Çalışılan tesisin 2017 ve 2018 verileri ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

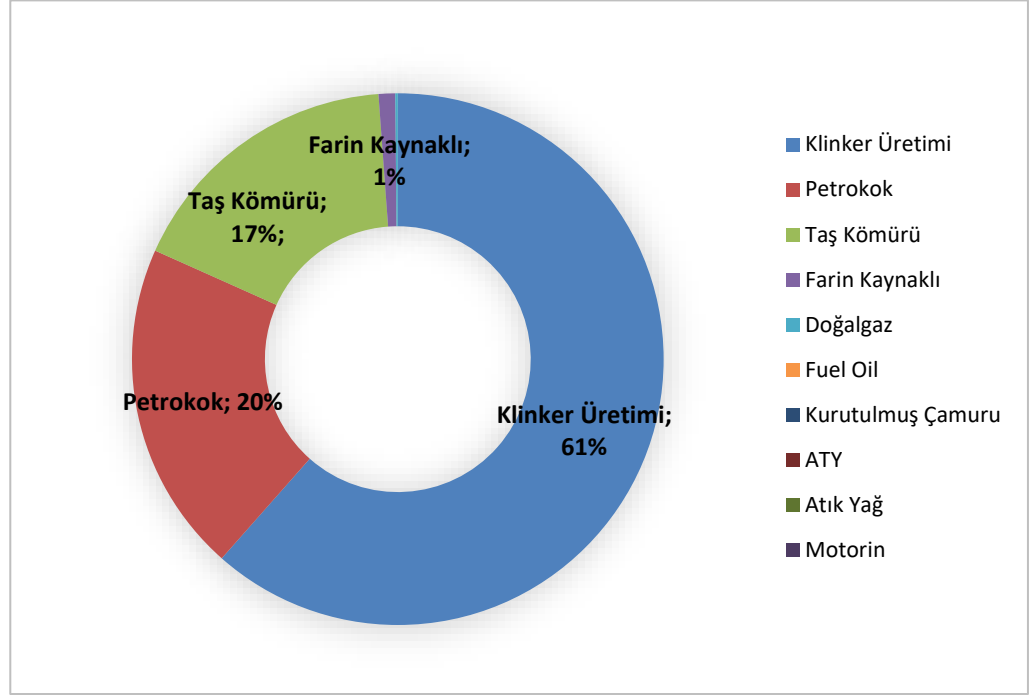
Tablo 3.4: 2017 yılı seragazı emisyon tablosu.

Emisyon Kaynağı	2017 Yılı Faaliyet Verisi (ton)	Emisyon Faktörü ton CO2/TJ	NKD TJ/Gg	CO2 Emisyon Miktarı (ton)	Yüzdesel Dağılım
Klinker Üretimi	4102771.11	0.525	1	2153955	61%
Farin Kaynaklı	6359295.22	0.007328	1	46601	1%
Petrokok	221228.32	97.5	32.5	701017	20%
Taş Kömürü	244544.6	94.6	25.8	596855	17%
Doğalgaz	1985.25824	56.1	48	5346	0%
Fuel Oil	1076.33	77.4	40.4	3366	0%
Kurutulmuş Arıtma Çamuru	10015.73	110	11.18	12317	0%
ATY	6040.18	83	17.83	8939	0%
Atık Yağ	37.5	73.3	40.2	110	0%
Motorin	52.4743	74.1	43	167	0%
2017 YILI TOPLAM CO2 MİKTARI (TON)				3528673	100%

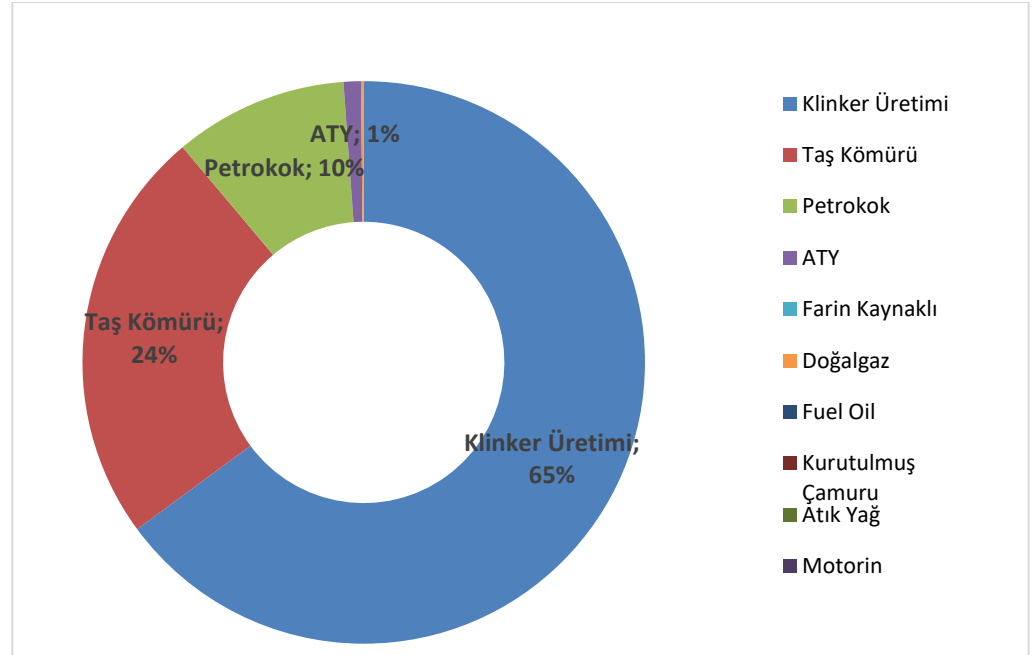
Tablo 3.5: 2018 yılı seragazı emisyon tablosu.

Emisyon Kaynağı	2018 Yılı Faaliyet Verisi (ton)	Emisyon Faktörü ton CO2/TJ	NKD TJ/Gg	CO2 Emisyon Miktarı (ton)	Yüzdesel Dağılım
Klinker Üretimi	4291158.1	0.5411	1	2321946	65%
Farin Kaynaklı	6651295.06	0.0016407	1	10913	0%
Petrokok	129749.15	93.2	29.97	362416	10%
Taş Kömürü	363666.1	94.29	24.7	846965	24%
Doğalgaz	3021.82864	56.1	48	8137	0%
Fuel Oil	1584.92	77.4	40.4	4956	0%
Kurutulmuş Arıtma Çamuru	10341.8	90.11	13.3	12395	0%
ATY	14498.91	90.13	20.1	26276	1%
Atık Yağ	42.05	73.3	40.2	124	0%
Motorin	2.83852	74.1	43	9	0%
2018 YILI TOPLAM CO2 MİKTARI (TON)				3594136	100%

İlgili faaliyet yıllarına dair emisyon kaynaklarının yüzdesel dağılımı grafikte listelenmiştir. (Şekil 3.3.) ve (Şekil 3.4.)



Şekil 3.3: Emisyon Kaynakları Dağılımı (2017 yılı).



Şekil 3.4: Emisyon Kaynakları Dağılımı (2018 yılı).

CO₂ emisyon kaynaklarının en büyük bölümü ise klinker üretimi sırasında oluşmaktadır. Çimento fabrikalarının uygulama örneklerinden yola çıkarak, toplam CO₂ emisyonunun %60-65'inin klinker üretimi sırasında oluştuğu, %35-40'ının petrokok ve taş kömürü kullanımından kaynaklandığı hesaplanmıştır. Diğer yakıtların oranları ise %1'den düşük olduğu için “önemsiz” olarak sınıflandırılmaktadır.

Atıktan Türetilmiş Yakıtların, yanması sırasında oluşan CO₂ salınımı, ilgili malzemelerin emisyon faktörüne bağlı olarak hesaplanmıştır. Ancak ilgili atıkların bertaraf edilmeden düzenli depolama alanlarında bekletilmesi ve bu süre zarfında oluşacak karbon dioksit emisyonları göz önüne alındığında, karbon dioksit salınımlarındaki azaltıcı etkisi oldukça yüksek olacaktır.

Uygulama örnekleri incelenir ise, farklı yıllar arasında sera gazı hesaplama örneklerine dair veriler aşağıdaki gibidir;

2017 yılı CO₂ hesaplama verilerine göre ton başı klinker üretimi için 860 kg CO₂ oluştuğu gözükmemektedir,

2018 yılı CO₂ hesaplama verilerine göre ton başı klinker üretimi için 838 kg CO₂ oluştuğu gözükmemektedir,

Uluslararası Enerji Ajansı 2003 raporuna göre, çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları 650-920 kg CO₂/ton arasında değişir iken, dünya ortalaması 830 kg CO₂/ton olarak belirtilmiştir.

2017 ve 2018 yılları arasında kıyaslama yapılır ise, 2 yıl arasında %4.5 daha fazla klinker üretildiği, 2018 yılında bir önceki yıla göre emisyon faktörü daha düşük Petrokok kullanıldığı, ATY oranının arttırıldığı görülmektedir.

3.4. Alternatif Senaryoların Oluşturulması

İşletmenin üretim faaliyetleri sırasında çevreye olan olumsuz etkilerini en aza indirmesini sağlamak ve çeşitli öneriler sunmak amacıyla, alternatif yakıtların çeşitli oranlarda kullanıldığı alternatif senaryolar oluşturularak, yaşam döngüsü değerlendirmesi yaklaşımıyla çevresel etkileri belirlenmiş ve en çevre dostu senaryo belirlenmeye çalışılmıştır.

Her bir senaryo için, alternatif yakıt kullanım oranları seçilmiş ve bunlara bağlı olarak oluşacak emisyon değerleri ve gerekli termal enerjiyi sağlaması için yeterli olan fosil yakıt miktarı hesaplanmıştır.

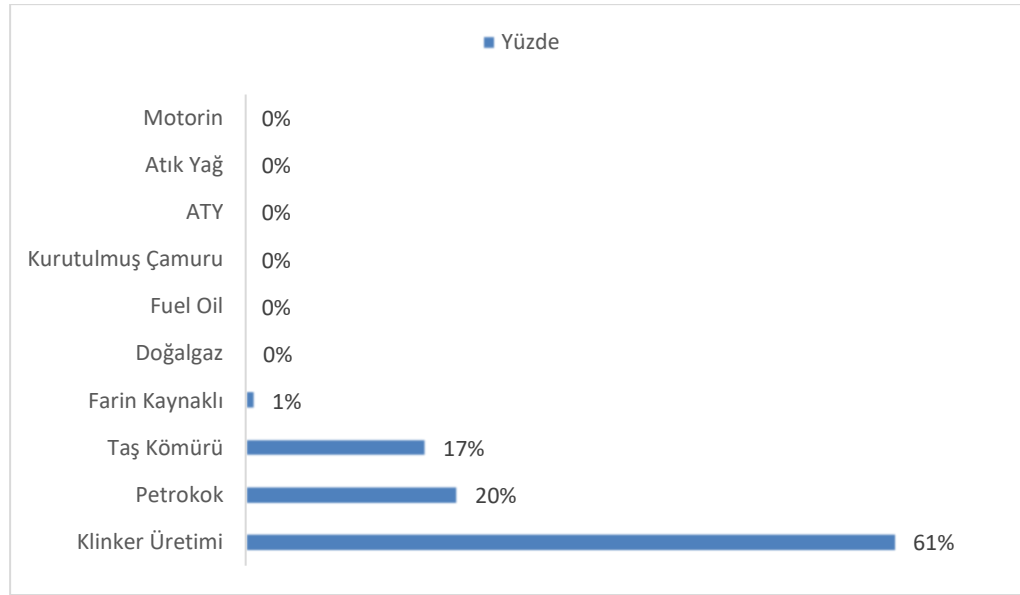
Tablo 3.6: Tez çalışması kapsamında oluşturulan alternatif senaryolar.

Senaryo	Azaltılan Yakıt Türü	Azaltılan Yakıt Miktarı ton	Alternatif Yakıt Türü	İkame Kullanılan Yakıt Miktarı Ton	Senaryoya göre CO ₂ emisyonu (kg CO ₂ /t.klinker)
Senaryo 1	Taş Kömürü	100.000	Doğalgaz	50.250	837
Senaryo 2	Taş Kömürü	100.000	ATY	145.000	853

Prensip olarak, çimento fırınlarında alternatif yakıt kullanımı % 100'e kadar çıkabilir. Ancak, kalorifik değer ve iz elementler veya klor gibi yan ürünlerin muhteviyatı bazı teknik sınırlamalar vardır. Çoğu organik materyalin kalorifik değeri nispeten düşüktür (10 - 18 GJ / t). Çimento fırınının ana yakması için en az 20 - 22 GJ / t ortalama kalori değeri gerekir. Yakıt girişinin% 60'ının gerçekleştirildiği modern çimento fırınlarının ön kireçleştiricisinde, düşük işlem sıcaklığı ayrıca düşük kalorili yakıtların kullanılmasına da izin verir. Bu nedenle, prekalsiner fırınlar düşük kalorili yakıtların en az% 60'ını yakabilir. Düşük bir kalorifik değer ve yüksek klor içeriği (bir klor by-pass sistemi gerektiren), klinker ton başına spesifik yakıt enerjisi talebini artıracaktır. Bu nedenle, bu yakıtların kullanımı daha yüksek enerji talebine yol açsa da, CO₂ emisyonlarının yine de azaltılması mümkündür.

İlgili işletmenin 2017 verileri baz alınarak, tüketilen Doğalgaz ve ATY oranlarının değiştirilmesiyle alternatif senaryolar oluşturulmuştur.

Senaryo öncesi esas alınan gerçek emisyon kaynaklarının yüzdesel dağılımı Şekil 3.5'de incelenmiştir. Toplam emisyon kaynaklarının %61'i klinker üretiminde, %20'si petrokok kullanımında, %17'si ise taş kömürü kullanımı neticesinde oluşmaktadır.



Şekil 3.5: Senaryo için baz alınan verilerin yüzdesel dağılımı.

3.4.1. Senaryo 1 Doğalgaz Miktarının Arttırılması

Emisyon faktörü yüksek olan, büyük hacimlerde kullanılan yakıt kaynağının azaltılarak yerine emisyon faktörü düşük olan başka bir kaynağın miktarının arttırılması ön görülmüştür.

Kriterlere uygun olarak taş kömürü miktarının azaltılarak Doğalgaz miktarının arttırılması değerlendirilmiştir.

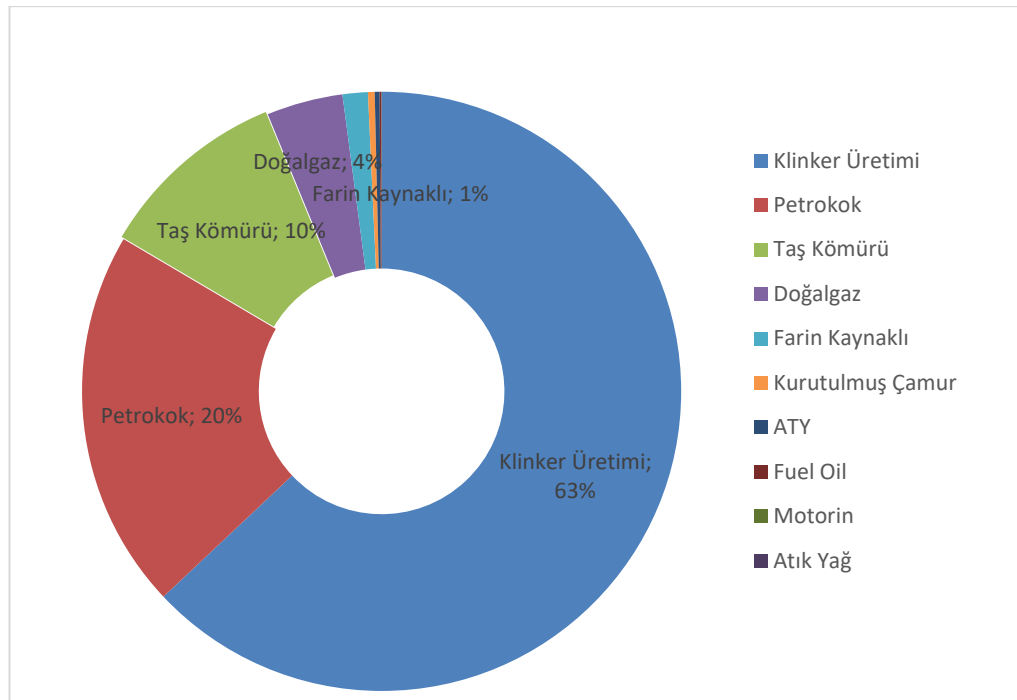
100.000 ton taş kömürü azaltılarak, eş değer ısı enerji sağlayabilecek ek 50.250 ton (75milyon m3) doğalgaz miktarının kullanımı durumunda karbon hesaplaması yapılmıştır. [Web 9, 2019].

Tablo 3.7: Senaryo 1'e göre seragazi emisyonlarının hesaplanması

Emisyon Kaynağı	2017 Yılı Faaliyet Verisi (ton)	Emisyon Faktörü ton CO2/TJ	NKD TJ/Gg	CO2 Emisyon Miktarı (ton)	Yüzdesel Dağılım
Klinker Üretimi	4102771.11	0.525	1	2153955	63%
Farin Kaynaklı	6359295.22	0.007328	1	46600.92	1%
Petrokok	221228.32	97.5	32.5	701017.2	20%
Taş Kömürü	144500	94.6	25.8	352678.3	10%

Tablo 3.7: Devam.

Doğalgaz	52250	56.1	48	140698.8	4%
Fuel Oil	1076.33	77.4	40.4	3365.641	0%
Kurutulmuş Arıtma Çamuru	10015.73	110	11.18	12317.34	0%
ATY	6040.18	83	17.83	8938.802	0%
Atık Yağ	37.5	73.3	40.2	110.4998	0%
Motorin	52.4743	74.1	43	167.1989	0%
Senaryo 1- TOPLAM CO2 MİKTARI (TON)				3419850	100%



Şekil 3.6 Emisyon Kaynakları Dağılımı Senaryo 1 – Doğalgaz.

Aynı klinker üretim miktarının sağlanabilmesi, aynı ısı enerjisinin sağlanacağı hesaplanarak yapılan çalışmaya göre, doğal gaz miktarının arttırılması, taş kömürünün azaltılmasıyla birlikte, aynı üretim prosesi için oluşacak toplam karbon emisyon miktarının azalacağı hesaplanmıştır. Yakıtların yanmasıyla oluşan karbon miktarı %38'den, %36'ya düşmüş, Birim klinker başına oluşan karbon miktarı 860 kg'dan 834 kg'ya düşmüştür.

3.4.2. Senaryo 2 Atıktan Türetilmiş Yakıt Miktarının Arttırılması

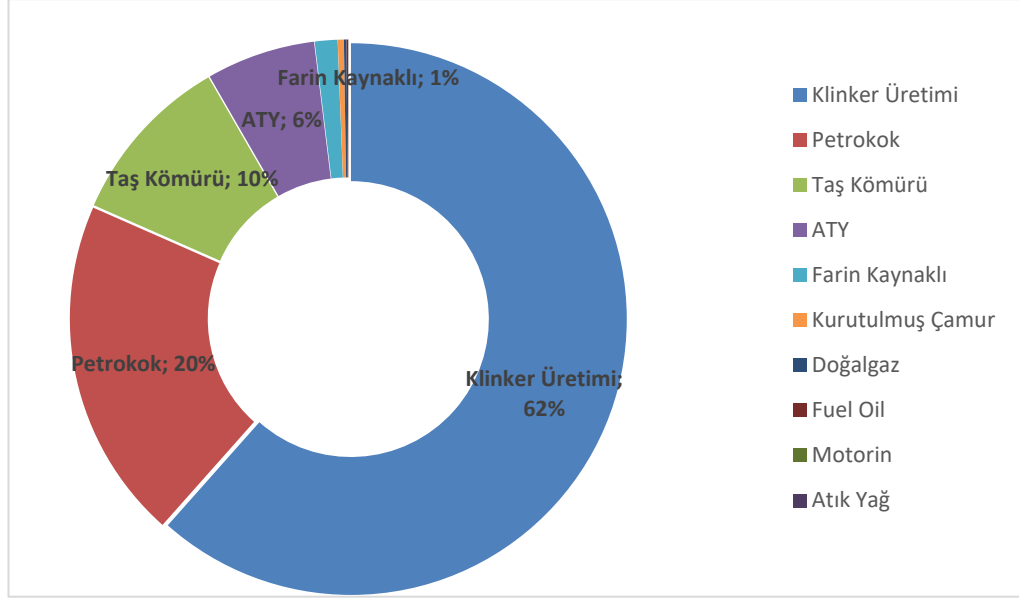
Emisyon faktörü yüksek olan, büyük hacimlerde kullanılan yakıt kaynağının azaltılarak yerine emisyon faktörü düşük ve daha çevreci başka bir kaynağın miktarının arttırılması ön görülmüştür.

Kriterlere uygun olarak taş kömürü miktarının azaltılarak ATY miktarının arttırılması değerlendirilmiştir.

100.000 ton taş kömürü azaltılarak, eş değer ısı enerji sağlayabilecek ek 145.000 ton ATY miktarının kullanımı durumunda karbon hesaplaması yapılmıştır.

Tablo 3.8: Senaryo 2'ye göre seragazi emisyonlarının hesaplanması.

Emisyon Kaynağı	2017 Yılı Faaliyet Verisi (ton)	Emisyon Faktörü ton CO2/TJ	NKD TJ/Gg	CO2 Emisyon Miktarı (ton)	Yüzdesel Dağılım
Klinker Üretimi	4102771.11	0.525	1	2153955	62%
Farin Kaynaklı	6359295.22	0.007328	1	46600.92	1%
Petrokok	221228.32	97.5	32.5	701017.2	20%
Taş Kömürü	144500	94.6	25.8	352678.3	10%
Doğalgaz	1985.25824	56.1	48	5345.903	0%
Fuel Oil	1076.33	77.4	40.4	3365.641	0%
Kurutulmuş Arıtma Çamuru	10015.73	110	11.18	12317.34	0%
ATY	151000	83	17.83	223463.4	6%
Atık Yağ	37.5	73.3	40.2	110.4998	0%
Motorin	52.4743	74.1	43	167.1989	0%
Senaryo 2- TOPLAM CO2 MİKTARI (TON)				3499021	100%



Şekil 3.7 Emisyon Kaynakları Dağılımı Senaryo 2 – ATY.

Aynı klinker üretim miktarının sağlanabilmesi, aynı ısı enerjisinin sağlanacağı hesaplanarak yapılan çalışmaya göre, ATY miktarının arttırılması, taş kömürünün azaltılmasıyla birlikte, aynı üretim prosesi için oluşacak toplam karbon emisyon miktarının azalacağı hesaplanmıştır. Yakıtların yanmasıyla oluşan karbon miktarı %38'den, %37'ye düşmüş, Birim klinker başına oluşan karbon miktarı 860 kg'dan 853 kg'ya düşmüştür. Ayrıca ATY'ların bertaraf edilmeden düzenli depolama alanlarına gönderileceği düşünülür ise, tasarruf edilen CO₂ miktarı çok daha fazla olacaktır.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Çimento endüstrisinde en çok tartışılan CO₂ azaltma önlemlerinden biri olarak alternatif yakıtların değerlendirilmesi gelmektedir. Genellikle, kömüre alternatif olarak, petrole veya doğal gaz kullanımı düşünülür, ancak giderek daha fazla biyokütleyle olan ilgili de artmıştır. Kömüre ikame olarak fuel oil kullanımı durumunda, yaklaşık % 16 mertebesinde CO₂ azaltımı sağlanabilir. Doğal gaz kullanım durumunda ise enerji içeriği ve CO₂ emisyon faktörüne bağlı olarak, % 40 civarında azaltım sağlayabilmek mümkündür. Diğer yönden Linyit kullanımı ise, taş kömüründen daha yüksek CO₂ emisyonlarına yol açmaktadır.

2014 yılı GNR verilerine göre, küresel düzeyde alternatif yakıt kullanımı, çimento üretimi için gerekli toplam yakıt enerjisinin % 16'sına tekabül eder. Yaklaşık %6'sı biyokütle ile karşılanır, kalan % 84 ise özellikle kömür ve petrokok olmak üzere fosil yakıtlarla sağlanır. Küresel açıdan, bölgelere göre ciddi farklılık gösterir. Özellikle doğal gaz ve petrol kaynaklarına sahip ülkelerde, maliyetlerin düşük olması önemli bir faktördür. Teknik olarak, çimento fırınları % 100 oranında petrol veya doğalgazla çalıştırılabilir, ancak birçok bölgede bu durum ekonomik olarak uygulanabilir değildir.

Yakıt kaynaklı CO₂ emisyonlarının, toplam emisyonların yaklaşık olarak üçte birine (306 kg / 842 kg ton klinker CO₂) denk geldiği düşünülürse, biyokütle kullanımı durumunda önemli miktarda CO₂ azaltımı sağlanabilir. Eğer yüksek miktarda biyokütle kullanılır ise, CO₂'de daha fazla azaltım elde edilebilir.

Günümüzde çimento endüstrisinde kullanılan biyokütle yakıtları, odun parçaları, talaş, arıtma çamuru ve hayvan yemi atıklarıdır. Temel olarak sıvı biyokütle ve palm yağı, mısır, ağaç ürünleri veya bazı ot türleri gibi herhangi bir organik maddenin kullanılması da mümkündür. Biyokütle ürünlerinin hammadde olarak kullanılması, sürdürülebilirlik ve tarım, ormancılık ve arazi kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonları ile ilgilidir. Bu malzemelerin, daha sonra yakıt olarak kullanılmak üzere toplanması gerekir. Ekonomik nedenlerle bugünkü koşullarda çimento endüstrisi için uygulanabilir değildir.

CO₂ mevzuatı, çimento endüstrisi için kullanılabilir biyokütle yakıtları hakkında önemli bir etkiye sahip olacaktır. Biyokütle maliyetleri artacak ve bu muhtemelen herhangi bir sektörde yakılarak kullanmak üzere mahsullerin ekilmesine sebep

olacaktır. Eğer Avrupa’da olduğu gibi, biyogenik malzemelerden enerji eldesi yasalarla desteklenirse, imento endüstrisi için bu malzemeleri makul maliyetlerle yakıt olarak tedarik etmek daha da zor olacaktır. Yakıtlarda biyokütle payının % 30 veya % 40’ı geçmemesi beklenmiyor. (biyokütle kaynaklı 90 veya 120 kg CO₂'ye karşılık gelir).

Alternatif yakıtların, CO₂ azaltım potansiyeli 2 temelde gerçekleşir. İlk olarak, çoğu atık yakıt, CO₂ nötr olarak hesaplanan belirli bir biyokütle içerir. İkincisi, çoğu fosil atık yakıtın CO₂ emisyon faktörleri kömür ve petrokoka göre daha düşüktür. Günümüzde imento endüstrisinde, biyokütle olarak kullanılan yakıtlar genellikle atık odun, pirinç kabuğu, talaş, arıtma çamuru çamuru ve hayvan yemidir. Bu yakıtların yanı sıra, pek çok organik atık madde küresel çerçevede daha daha düşük oranlarda yakıt olarak kullanılmaktadır. Biyokütle içeren atıklar, genel olarak ön işleme tabi tutulmuş endüstriyel ve evsel atıklarla (belirli organik elyaf ve tekstil parçalarını, kâğıt vb. içeren) birlikte % 20 -35 doğal kauçuk içeren atık lastiklerden oluşmaktadır. Prensip olarak, imento fırınları atık veya biyokütle yakıtlarını % 100'e kadar yakabilir. Ancak, kalorifik değeri, iz elementlerin varlığı veya klor gibi bazı teknik kısıtlamalar vardır. Çoğu organik materyalin kalorifik değeri nispeten düşüktür (10 - 18 GJ / t). Çimento fırınında yanmanın gerçekleşebilmesi için yakıt karışımı için en az 20 ila 22 GJ / t ortalama bir kalorifik değeri gerekir. Modern imento fırınlarının %60’a kadar yakıt girişinin yapılabildiği prekalsinasyon safhasında, düşük işlem sıcaklığı düşük kalorili yakıtların kullanılmasını mümkün kılar. Bu sebeple, prekalsinasyon fırınları düşük kalorili alternatif ve biyokütle yakıtlarının en az % 60’ını yakabilir. Düşük bir kalorifik değeri gibi yüksek klor içeriği (klor bypass sistemi gerektirir) de bir ton klinker için gerekli olan spesifik yakıt enerji talebini artıracaktır. Bu yakıtların kullanılması yüksek enerji talebine neden olsa da, yine de CO₂ emisyonları azalacaktır. Çimento fırınlarının işletmesinde çok yüksek oranda ikame kullanılması, operasyonu fosil yakıtlarla çalışan fabrikalara göre oldukça farklılaştırır. Deneyimlere göre, artan alternatif yakıt ikame oranları, ton başı klinker için gerekli yakıt enerjisinde talebi yükseltebilir.

Yüksek konsantrasyonlarda klor ve kükürt içeren yakıtların kullanılması, fırın sisteminde operasyonel sorunlara neden olabilir. Kükürt, klor ve alkali sirkülasyon sistemleri, fırın girişinde kaplama oluşturabilir, döner fırında problemlere yol açabilir.

Herhangi bir fırın durdurma sayısı spesifik enerji talebini artırır. İşlem prosedürünü iyileştirmek için, birikintiler elle veya otomatik olarak temizlenmelidir. Diğer bir önlem fırın atmosferindeki klor ve kükürt içeriğinin düşürülebilmesi için

fırın iççerisine bypass sistemi kurulmasıdır. .Aşağıdaki rakamlar, alternatif yakıtların kullanımında ikame oranını % 65'e kadar artışı durumunu yansıtmaktadır.. Spesifik enerji talebinde% 8.5'e varan artışa sebep olmuştur.

KAYNAKLAR

Abuşoğlu A., Özahi E., Kutlar A.İ., Al-Jaaf H., (2017) , “Life cycle assessment (LCA) of digested sewage sludge incineration for heat and power production”, Journal of Cleaner Production, 142, 1684-1692.

Akkapeddi S., (2008), “Alternative Solid Fuels for the Production of Portland Cement”, Master Thesis, Auburn University, Auburn.

Al-Jaf H., (2014), “Life Cycle Assessment And Analysis of Heat and Power Production Alternatives from Digested Sewage Sludge”, Master Thesis, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, 372054.

Ali M.B., Saidura R., Hossain M.S., (2011) , “A Review on Emission Analysis in Cement Industries”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 2252–2261.

Aranda-Usón A., Ferreira G., López-Sabirón A.M., Sastresa E.L., de Guinoa A.S., (2012) , “Characterisation and Environmental Analysis of Sewage Sludge as Secondary Fuel for Cement Manufacturing”, Chemical Engineering Transactions, 29, 457-462.

Aranda-Usón A., López-Sabirón A.M., Ferreira G., Sastresa E.L., (2013) , “Uses of Alternative Fuels and Raw Materials in the Cement Industry as Sustainable Waste Management Options, Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 23, 242–260.

Ariyaratne W.K.H., (2009) , “Alternative fuels in cement kilns – characterization and experiments”, Master Thesis, Telemark University College, Faculty of Technology, Porsgrunn.

Balat, H., (2008), “Contribution of Green Energy Sources to Electrical Power Production of Turkey: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 12, 1652– 1666.

Ball P.D., Evans S., Levers A., Ellison D., (2009), “Zero carbon manufacturing facility—towards integrating material, energy and waste process flows”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 223, 1085-1096.

BAT (Best Available Techniques), (2013), “Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide”, Joint Research centre, Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau, ISBN: 978-92-79-32944-9.

Benhelal E., Zahedi G., Hashim H., (2012), “A Novel design for green and economical cement manufacturing”, Journal of Cleaner Production, 22, 60-66.

Benhelal E., Zahedi G., Shamsaei E., Bahadori A., (2013), “Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry”, Journal of Cleaner Production, 51, 142-161.

Bekiroğlu O., (2011) , “Sürdürülebilir Kalkınmanın Yeni Kuralı: Karbon Ayak İzi”, II.Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi.

Bilgin Ö., Koç E.,(2013), “Çimento Üretim Teknolojisinde Kullanılan Ana Ekipmanlar”, MT Bilimsel Yer Altı Kaynakları Dergisi, 4, 31 – 40.

Binboğa G., (2014) , “Uluslararası Karbon Ticareti Ve Türkiye”, Journal of Yasar University 9(34) 5732-5759.

Boesch M.E., Koehler A., Hellweg S., (2009) , “Model for Cradle-To-Gate Life Cycle Assessment of Clinker Production”, Environmental Science & Technology, 43, 7578–7583.

Boesch M.E., Hellweg S., (2010), “Identifying Improvement Potentials in Cement Production with Life Cycle Assessment”, Environmental Science and Technology, 44(23), 9143-9149.

Bonamente E., Pelliccia L., Merico C.M., (2015), “The Multifunctional Environmental Energy Tower: Carbon Footprint and Land Use Analysis of an Integrated Renewable Energy Plant, Sustainability”, 7, 13564-13584.

Boughrara S., Chedri M., Louhab K., (2015), “Evaluation of Environmental Impact of cement Production in Algeria Using Life Cycle Assessment”, International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy, 45, 79-84.

Bourtsalas A.C., Zhang J, Castaldi M.J., Themelis N.J., (2018), “Use of Non-Recycled Plastics and Paper as Alternative Fuel in Cement Production”, Journal of Cleaner Production, 181, 8-16.

Brown D., Sadiq R., Hewage K., (2017), “Health-based Life Cycle Impact Assessment (LCIA) for Cement Manufacturing: a Comparative Study of China and Canada”, Clean Technologies and Environmental Policy, 19, 679–687.

Bulut İ., (2017), “Belediye Atıklarının Çimento Sektöründe Evsel Atık Olarak Kullanılması, 2017 Atık Yönetimi Sempozyumu”, Antalya, Türkiye, 26 Şubat – 02 Mart 2017.

Bushi L., Meil J., (2014) , “An Environmental Life Cycle Assessment of Portland-Limestone and Ordinary Portland Cements in Concrete”, Athena Sustainable Materials Institute.

Carlson R., Häggström S., Pålsson A.C., (2003), “LCA Training Package for Users of LCA Data and Results”, Industrial Environmental Informatics Chalmers University of Technology, Cascade Project.

Caruso H.G., (2006), “Reduction of CO₂ Emissions from Cement Plants, Master Thesis”, University of Waterloo, Waterloo, Kanada.

CEMBUREAU (1999), “Environmental Benefits of Using Alternative Fuels in Cement Production: A life cycle approach”, (The European Cement Association).

CEMBUREAU (2009), “Sustainable Cement Production: Co-processing of Alternative Fuels and Raw Materials in the European Cement Industry”, (The European Cement Association).

CEMBUREAU, (2015), “Environmental Product Declaration (EPD) according to EN 15804 and ISO 14025 Portland Cement (CEM I) produced in Europe”, The European Cement Association, 1-10, (The European Cement Association).

CEMBUREAU, (2016), “Activity report 2016”, (The European Cement Association).

Chatziaras N., Psomopoulos C.S., Themelis N.J., (2016), “Use of waste derived fuels in cement industry: a review, Management of Environmental Quality”, An International Journal, 27, 178 – 193.

Chen W., Hong J., Xu C., (2015), “Pollutants Generated by Cement Production in China, Their Impacts, and the Potential for Environmental Improvement”, Journal of Cleaner Production, 103, 61-69.

Commission of the European Communities, (2001), “Green paper on integrated product policy”, Brussels, 6-7.

Curran M.A.,(2006) , “Life Cycle Assessment: Principles and Practice, National Risk Management Research Laboratory”, US Environmental Protection Agency, EPA/600/R-06/060, 1-80.

Çankaya S., Pekey B., (2015), “Identifying Environmental Impacts Of Cement Production With Life Cycle Assessment: Literature Review”, Ecology and Safety, 9, 251 – 267.

Çapik M., Yılmaz A.O., Çavuşoğlu İ., (2012), “Present Situation and Potential Role of Renewable Energy in Turkey”, Renewable Energy, 46, 1-13.

ÇSB, (2018), Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı).

ÇSB,(2016), “Ozon Tabakasının Korunmasına Yönelik Devam Eden Projeler”, (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı).

Derinöz Gencel C., (2011), “Çimento Sektöründe Tehlikeli Atıkların Alternatif Yakıt Olarak Kullanılması ve AB Uygulamaları”, 2011 Atık Yönetimi Sempozyumu, Antalya, 17-21 Nisan 2011.

DPT, (2010) , “Binyıl Kalkınma Hedefleri Raporu”, T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilâtı Müsteşarlığı.

EEA, (2006), “EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016 Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories”, EEA Report No 21/2016, 1-18. (European Environment Agency).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2013), “2013 Yılı Türkiye Elektrik İletimi Sektör Raporu”.

EPLCA, (2007), “CARBON FOOTPRINT- what it is and how to measure it. European Platform on Life Cycle Assessment”, European Commission – Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.

Ercin E., Hoekstra A.Y., (2012), “Carbon and Water Footprints Concepts, Methodologies and Policy Responses”, United Nations World Water Assessment Programme, United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, Paris, France.

Erdem H. H., (2010), “Termik Santral Atılan Enerji Elkitabı”, Enerji Verimliliğini Arttırmak Üzere Termik Santral Atık Isılarını Faydaya Dönüştürme Yöntemlerinin Araştırılması Geliştirilmesi ve Binalarda Isıtma Uygulaması (TSAD), Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, İstanbul, Şubat 2010.

Erden C., (2014), “Düşük Karbon Ekonomisi Ve Türkiye’nin Karbon Ayak İzi”, International Conference in Economics.

Erdoğan A., (2008), “İklim Değişikliği ile Mücadele Faaliyetlerinin Türk Çimento Sanayine Etkileri”, DT Uzmanlık Tezi, Ankara.

Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Hischier R., Hellweg S., Humbert S., Köllner T., Loerincik Y., Margni M. and Nemecek T. , (2007) , “Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods, ecoinvent report No. 3”, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 1-139.

Galvez-Martos J.L., Schoenberger H., (2014), “An analysis of the use of life cycle assessment for waste co-incineration in cement kilns”, Resources, Conservation and Recycling, 86, 118–131.

Genon G., Brizio E.,(2008) , “Perspectives and Limits for Cement Kilns as a Destination for RDF”, Waste Management, 28, 2375–2385.

Georgiopoulou M., Lyberatos G., (2018), “Life Cycle Assessment of the Use of Alternative Fuels in Cement Kilns: A Case Study”, Journal of Environmental Management, 216, 224 – 234.

Grzesik K., Malinowski M., (2016), Life Cycle Assessment of Refuse-Derived Fuel Production from Mixed Municipal Waste, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 3150-3157.

Gunathilaka L.F.D.Z., Gunawardana K.D., (2015), “Carbon Footprint Calculation from Cradle to Grave: A Case Study of Rubber Manufacturing Process in Sri Lanka”, International Journal of Business and Social Science, 6, 10.

Hakyemez G., (2016), “Evaluating Environmental Impacts of a Solvent Recovery Unit in a Chemical Factory by Using Life Cycle Assessment”, Yüksek Lisans Tezi, METU, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara 442014.

Han E., Kaya A.A., (2013), “Kalkınma Ekonomisi, Teori Ve Politika”, Ankara: Nobel Yayınları.

Hasanbeigi A., Lu H., Williams C., Price L.,(2012), “International Best Practices for Pre- Processing and Co-Processing Municipal Solid Waste and Sewage Sludge in the Cement Industry”, Berkeley National Laboratory, LBNL-5581E, 1-115.

Helftewes M., Flamme S., Nelles M.,(2012), “Greenhouse Gas Emissions of Different Waste Treatment Options for Sector-Specific Commercial and Industrial Waste in Germany”, Waste Management & Research, 30, 421–431.

Holcim, (2006), Guidelines on Co-Processing Waste Materials in Cement Production.

How O.C., (2007) , “Life Cycle Assessment of Cement in Malaysia, Research Project, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying”.

Huntzinger D.N., Eatmon T.D., (2009), “A Life-Cycle Assessment of Portland Cement Manufacturing: Comparing the Traditional Process with Alternative Technologies”, Journal of Cleaner Production, 17, 668–675.

IEA, (2017), “CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights”, International Energy Agency, 1-152.

IFC, (2007), “Environmental, Health, and Safety Guidelines for Cement and Lime Manufacturing”, World Bank Group, 1-16.

Imbabi M.S., Carrigan C., McKenna S., (2012), “Trends and Developments in Green Cement and Concrete Technology”, International Journal of Sustainable Built Environment, 1, 194–216.

International Organization of Standardization (ISO),(2006), Environmental management - life cycle assessment - principles and framework, ISO 14040, Geneva.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2005), “IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage”, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2014), “Climate Change 2014: Synthesis Report”, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

ISO 14040, (2006), Environmental management – life cycle assessment – principles and framework, International Organization for Standardization, Geneva, (2006a).

ISO 14044, (2006), Environmental management life cycle assessment requirements and guidelines, International Organization for Standardization, Geneva.

Jensen A. J., Elkington K., Christiansen L., Hoffmann B. T., Moller A., Schmidt F. D., (1997), “Life cycle assessment - a guide to approaches, experiences and information sources”, Report to the European Environment Agency, Environmental Issues Series, 6, Soborg, 13-16.

Kaplan G., (2018), “Çimento Teknolojisinde Sürfaktanların Kullanımı ile Sürdürülebilir Çimento Üretimi”, Doktora Tezi , Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 494749.

Kara M., Günay E., Tabak Y., Yıldız Ş., (2009), “Perspectives for pilot scale study of RDF in Istanbul, Turkey”, Waste Management, 29, 2976–2982.

Kaypak Ş., (2013) , “Ekolojik Ayak İzinden Çevre Barışına Bakmak”, Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi, 6,154-159.

Kumaş K., Akyüz A., Zaman M., Güngör A., (2019) , “Sürdürülebilir Bir Çevre İçin Karbon Ayak izi Tespiti: MAKÜ Bucak Sağlık Yüksekokulu Örneği”, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, (108-117).

Kalkınma Bakanlığı, (2013), Onuncu Kalkınma Planı (2013-2018).

Kick C., (2011), “How is 100% Renewable Energy Possible for Turkey by 2020?”, Global Energy Network Institute (GENI), July.

Kuleli Ö., (2010), “Çimento Mühendisliği El Kitabı”, TÇMB/AR-GE, Ankara.

Lamas W.Q., Palau J.C.F., Camargo J.R., (2013), “Waste Materials Co-Processing in Cement Industry: Ecological Efficiency of Waste Reuse”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 19, 200–207.

Latif H.H.,(2015) , “Sustainability Index Development for Manufacturing Industry”, Department of Industrial and Management Systems Engineering, Morgantown, West Virginia.

Li C., Cui S., Nie Z., Gong X., Wang Z., Itsub, N.,(2015), “The LCA of portland cement production in China”, The International Journal of Life Cycle Assessment, 20, 117–127.

Li Y., Liu Y., Gong X., Nie Z., Cui S., Wang Z., Chen W., (2016), “Environmental Impact Analysis of Blast Furnace Slag Applied to Ordinary Portland Cement Production”, Journal of Cleaner Production, 120, 221-230.

Lynas M., (2009). “Karbon ayak iziniz.” Neşet Kutluğ (1Çev.). İstanbul: Açık Radyo Kitapları, Nüfusun Ülkeler İçin Önemi ve Nüfus Artışı.

Menke D., Davis G. A., Vignon B. W., (1996) , “Evaluation of life cycle assessment tools”, University of Tennessee, Knoxville-USA, 3-16.

Mikulcic H., Klemes J.J., Vujanovi M., Urbaniec K., Duic N., (2016), “Reducing Greenhouse Gasses Emissions by Fostering the Deployment of Alternative Raw Materials and Energy Sources in the Cleaner Cement Manufacturing Process”, *Journal of Cleaner Production*, 136, 119-132.

Mishra S., Siddiqui N.A., (2014), “A Review On Environmental and Health Impacts of Cement Manufacturing Emissions”, *International Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences*, 2, 26-31.

Moretti L., Caro S., (2017), “Critical analysis of the Life Cycle Assessment of the Italian Cement Industry”, *Journal of Cleaner Production*, 152, 198–210.

Mutlu V., (2018), “Kauçuk Endüstrisinde Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Neale J., (2009), “Küresel Isınmayı Durduralım, Dünyayı Değiştirelim!”, Çev. Doğan Tarkan, İstanbul: Yordam Kitap.

Nuh Çimento, Faaliyet raporu (2017), Yönetim Kurulu Faaliyet Raporu, Kocaeli.

Özdöl G., (2004), “Çimentonun Fiziksel Özelliklerinin Üretilen Standart Harcın Mukavemetine Etkilerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 152389.

Özçelik G., (2017), “Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Terzioğlu Kampüsü’nün Enerji ve Karbon Ayak İzi Açısından Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 76.

Özer Z. , (2002), “Ekolojik Ayak İzleri”, *Bilim ve Teknik Dergisi*, S. 419, Ekim, ss. 82- 84.

Özsoy, C., (2013), “Yeşil Ekonomi ve Yeşil Yakalı Çalışanlar: Türkiye Potansiyel Yeşil İşlere Hazır mı?”, *Kariyer Gündemi*, Sayı: 3, 21.

Öztürk E., (2016), “Çimento Sektöründe Alternatif Hammadde Ve Alternatif Yakıt Kullanımının Çevresel Yararlarının Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.

Panahandeh A., Asadollahfardi G., Mirmohammadi M., (2017), “Life Cycle Assessment of Clinker Production Using Refuse-Derived Fuel: A Case Study Using Refuse-Derived Fuel From Tehran Municipal Solid Waste”, *Environmental Quality Management*, 27, 57-66.

Paulsen J , Borg M., (2003), “The International Journal of LCA”, 142-150.

Paulsen J., (2001), “Life cycle assessment for building products - the significance of the usage phase”, Doktora Tezi, Kungliga Tekniska Hogskolan, Stockholm-Sweden.

Pennington D.W., Potting J., Finnveden G., Lindeijer E., Joliet O., Rydberg T., Rebitzer G., (2004), “Life Cycle Assessment Part 2: Current Impact Assessment Practice”, *Environment International*, 30, 721– 739.

Rahman A., Rasul M.G., Khan M.M.K., Sharma S., (2015), “Recent Development on the Uses of Alternative Fuels in Cement Manufacturing Process”, *Fuel*, 145, 84–99.

Rana R., Ingrao C., Lombardi M., Tricase C., (2016), “Greenhouse Gas Emissions Of An Agro-Biogas Energy System: Estimation Under The Renewable Energy Directive”, *Science of The Total Environment*, 550,1182-1195.

REC, (2015), “A’dan Z’ye İklim Değişikliği Başucu Rehberi”, Bölgesel Çevre Merkezi.

Rende K., (2013), “Türkiye Çimento Sektöründen Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonları”, Yüksek Lisans Tezi , Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü.

Reza B., Soltani A., Ruparathna R., Sadiq R., Hewage K.,(2013), “Environmental and Economic Aspects of Production and Utilization of RDF as Alternative Fuel in Cement Plants: A Case Study of MetroVancouver Waste Management”, *Resources, Conservation and Recycling*, 81, 105– 114.

Ruan S., Unluer C.,(2016), “Comparative Life Cycle Assessment of Reactive MgO and Portland Cement Production”, *Journal of Cleaner Production*, 137, 258-273.

Schneider M., Romer M. Tschudin M., Bolio H., (2011), “Sustainable Cement Production - Present and Future”, *Cement and Concrete Research*, 41, 642–650.

Skone T. J., (2000), “Environmental Progress”, 19, 92-100.

Stafford F.N., Dias A.C., Arroja L., Labrincha J.A., Hotza D.,(2016), “Life cycle assessment of the production of Portland cement: a Southern Europe case study”, *Journal of Cleaner Production*, 126, 159-165.

Sözen S., (2010), “Sürdürülebilir Çevre Yaklaşımında Karbon Yönetimi”, *Durum Dergisi, Enerji Özel Sayısı*, 66.

Şirin S.M., Ege A., (2012), “Overcoming Problems in Turkey’s Renewable Energy Policy: How Can EU Contribute?”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 4917–4926.

Tatar O., (2010), “Uluslararası Karbon Ticareti ve İzmir’in ‘Karbon Ayak İzi’nin Belirlenmesi”.

The European Cement Association, (2009), “Sustainable Cement Production: Coprocessing of Alternative Fuels and Raw Materials in the Cement Industry”.

Trinius W., (1999), “Environmental assessment in building and construction - goal and scope definition as key to methodology choices”, Doktora Tezi, Kungliga Tekniska Hogskolan, Stockholm-İsveç.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2018), Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2016), “Ozon Tabakasının Korunmasına Yönelik Devam Eden Projeler”.

T.C. Dışişleri Bakanlığı, (2018), Paris Anlaşması.

TEİAŞ , (2013), “Türkiye Elektrik Enerjisi 5 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2013 – 2017)”, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü.

The World Bank, (2017), World Development Indicators.

TS EN 197-1, (2012), “Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Tuna Taygun G., (2005), “Yapi Ürünlerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesine Yönelik Bir Model Önerisi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 0023261.

TÜİK(Türkiye İstatistik Kurumu), (2016), “Seragazı Emisyon İstatistikleri”, (Erişim tarihi: 29/08/2018).

UNEP (United Nations Environment Programme), (2011) , “Technical Guidelines on the Environmentally Sound Co-Processing of Hazardous Wastes in Cement Kilns”, United Nations, UNEP/CHW.10/1, 1-56.

Vos S., Görtzen J., Mulder E., Ligthart T., Hesseling W., (2007), “LCA of Thermal Treatment of Waste Streams in Cement Clinker Kilns in Belgium”, TNO Science and Industry, I&T-A R 2007/036, 1-100.

Wiedmann T., Minx J., (2007), “ A Definition of Carbon Footprint. ISAUK Research and Consulting”, Durham, UK.

WWF, (2012a), “Türkiye’nin Ekolojik Ayak İzi Raporu, WWF Rapor TR 2012,

WWF, (2012b), Living Planet Report 2012, “Biodiversity, biocapacity and better choices”.

Valderrama C., Granados R., Cortina J.L., Gasol C.M., Guillem M., Josa A., (2012) , “Implementation of Best Available Techniques in Cement Manufacturing: a Life-Cycle Assessment Study”, Journal of Cleaner Production, 25, 60-67.

Valderrama C., Granados R, Cortina J.L., Gasol C.M., Guillem M., Josa A., (2013), “Comparative LCA of Sewage Sludge Valorisation as Both Fuel and Raw Material Substitute in Clinker Production”, Journal of Cleaner Production, 51, 205-213.

WBCSD,(2009),IEA, Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions up to 2050. World Business Council for Sustainable Development International Energy Agency.

WBCSD, (2014), “Guidelines for Co-Processing Fuels and Raw Materials in Cement Manufacturing”, World Business Council for Sustainable Development International Energy Agency.

Wiedman T. , Minx J. , (2008) , “A definition of 'carbon footprint'”, Hauppauge NY: Nova Science Publishers.

Yeğınobalı A., (2003), Çimento “Yeni bir çağın malzemesi”, 2. Baskı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.

Yiğit Ç., (2013) , “Life Cycle Assessment in Ferrous Foundry Industry”, Yüksek Lisans Tezi , Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 338394.

Yıldız, N., (2012) , “Çimento Üretimi”, Ertem Basım, Ankara.

Zhang L., Mabey W.E., (2016), “Comparative Study on the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of the Utilization of Potential Low Carbon Fuels for the Cement Industry”, Journal of Cleaner Production, 122, 102-112.

Web 1 , (2013) , <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=54> , (Erişim Tarihi: 28/08/2013).

Web 2, (2019) , <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&cntID=204> , (Erişim Tarihi: 29/01/2019).

Web 3, (2019), https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement_Roadmap_Foldout_WEB.pdf, (Erişim Tarihi: 20/04/2019).

Web 4, (2019) , http://di.unfccc.int/time_series , (Erişim Tarihi: 15/05/2019).

Web 5, (2019) , <https://cembureau.eu/cement-101/the-manufacturing-process/>, (Erişim Tarihi: 19/02/2019).

Web 6, (2018), <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&cntID=29> , (Erişim Tarihi: 26/08/2018).

Web 7, (2019), <https://www.biliminsesi.com/kuresel-isinma/> , (Erişim Tarihi: 08/09/2019).

Web 8 , (2019), <http://www.karbonayakizi.com> , (Erişim Tarihi: 10/10/2019).

Web 9, (2019), <http://www.enve.com.tr/tep-hesaplama/> (Erişim Tarihi: 02/04/2019).

Web 10, (2019), <http://webdosya.csb.gov.tr/db/ippc/icerikler/n-ha--rapor-20180425132823.pdf>, (Erişim Tarihi: 13/09/2019).

Web 11, (2017), <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=24588>, (Erişim Tarihi: 02/05/2019).

Web 12, (2012), <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=10910>, (Erişim Tarihi: 15/06/2019).

ÖZGEÇMİŞ

Murat Taner Şahin 1985 yılında Üsküp’de doğdu. 2005 yılında başladığı İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünü 2009 yılında başarıyla tamamlayarak aynı yıl yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2007 yılından bu yana bifiil olarak özel sektörde çalışmakta, iş hayatına Assan Alüminyum firmasında Otomotiv Satış Yöneticisi olarak devam etmektedir.