

**ÇİMENTO ÜRETİMİNDEN KAYNAKLANAN SERA GAZI
EMİSYONLARININ HESAPLANMASI**

**ACCOUNTING FOR GREENHOUSE GASES EMISSION
FROM CEMENT PRODUCTION**

AYŞE EBRU ORHAN

PROF. DR. GÜLEN GÜLLÜ

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

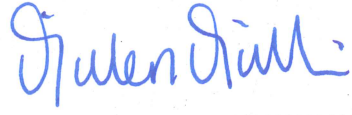
2018

AYŞE EBRU ORHAN' ın hazırladığı “Çimento Üretiminden Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonlarının Hesaplanması” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI' nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

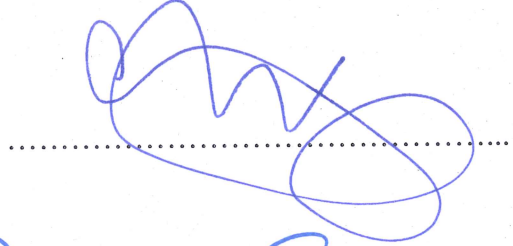
Prof. Dr. A. Cemal SAYDAM
Başkan



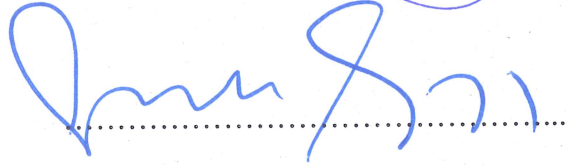
Prof. Dr. Gülen GÜLLÜ
Danışman



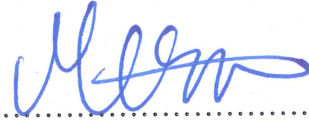
Prof. Dr. Gaye TEKSÖZ
Üye



Doç. Dr. Selim L. SANİN
Üye



Doç. Dr. Merih AYDINALP KÖKSAL
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin / raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “ **Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- o Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. ⁽¹⁾
- o Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren Ay ertelenmiştir. ⁽²⁾
- o Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. ⁽³⁾

12/09/2018

(İmza)

Öğrencinin Adı SOYADI

AYŞE EBRU ORHAN

“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”

- (1) Madde 6. 1. Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir
- (2) Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. Şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü ve fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
- (3) Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir*. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.
Madde 7. 2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

* Tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu tarafından karar verilir.

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez olarak sunmadığımı

beyan ederim.

31/08/2018



AYŞE EBRU ORHAN

ÖZET

ÇİMENTO ÜRETİMİNDEN KAYNAKLANAN SERA GAZI EMİSYONLARININ HESAPLANMASI

Ayşe Ebru ORHAN

Yüksek Lisans, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Gülen GÜLLÜ

Ağustos 2018, 137 Sayfa

Çimento sektörü Türkiye emisyonlarının % 7,2'sini oluşturmaktadır. Endüstriyel işlemler de en yüksek paya sahiptir. Çimento üretim süreçlerinde klinker üretim aşaması CO₂ oluşumuna sebep olmaktadır. Karbonat içerikli hammaddelerin yüksek ısı ile reaksiyona girmesi sonucu CO₂ açığa çıkmaktadır. Bu nedenle tez kapsamında entegre bir pilot tesis seçilerek, hem yakıt kaynaklı hem de proses kaynaklı sera gazı emisyonlar hesaplanmıştır.

Tezin ilk aşamasında IPCC yöntemleri (Tier 1, Tier 2 ve Tier 3) ve CSI hesaplama aracı kullanılmış ve sera gazı emisyonları 2015, 2016 ve 2017 yılları için 4 farklı yöntem ile elde edilmiştir. Yöntem farklılıklarına göre üç yılda emisyonların 828.017,87 ton CO₂ – 1.270.674,26 ton CO₂ arasında olduğu bulunmuştur. IPCC yöntemleri içerisinde en güvenilir olanın yapılan belirsizlik hesapları sonucu Tier 3 olduğu bulunmuştur. (Tier 3 belirsizliği %3-7 iken, Tier 1 ve 2'nin %20 civarındadır). Bunun yanı sıra CSI ile Tier 3 yöntemi sonuçlarının birbirine benzerlik göstermesi de Tier 3'ün güvenilirlik oranını arttırmaktadır. Çünkü CSI hesaplama modülü tesise özel veri girişleri yapıldığında, emisyon hesabını otomatik olarak veren bir modüldür.

Tezin ikinci aşamasında, tesisin alternatif yakıt olarak atıkları kullanması değerlendirilmiştir. Hesaplama yapılan üç yıl içerisinde ATY kullanımı sonucu atmosfere yapılan 70.980, 45 ton CO₂ salınımının engellendiği bulunmuştur. CO₂ tasarrufuna ek

olarak, 2609 TJ'lik fosil yakıt kazancı elde ederek, doğal kaynakları verimli kullanımına katkı sağlamıştır.

Tezin son aşamasında tesisin atık kullanım oranları Türkiye geneli çimento sektörüne uyarlanmış ve çeşitli senaryolar üretilmiştir. Senaryolarda amaç sektörün geneli pilot tesis kadar ATY kullanımı ile ne kadar çevresel fayda sağlanabileceğini göstermektir. Yapılan uyarlamalar sonucu üç yılda 10,2 Mt CO₂ emisyonlarının engellenebileceği elde edilmiştir. Aynı zamanda atıkların değerlendirilmesiyle 5.903,31 Gg atığın depolama alanlarına gönderiminin ve 175.201,39 TJ'lük fosil yakıt tüketiminin önüne geçilebileceği görülmüştür.

Günümüzde inşaat sektöründe gözlemlenen sürekli büyüme devam etmektedir. Altyapı ve yol yapım çalışmaları, kentsel dönüşüm uygulamaları, üçüncü havaalanı inşaatı, Çanakkale Boğaz Köprüsü inşaatı gibi projeler ile çimento talebinde artış olacağı düşünülmektedir. Sektörde yaşanacak olan kapasite artışı göz önüne alındığında, doğal kaynak verimliliği ve hava kirliliği açısından ATY kullanımının fayda sağlayacağı anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: çimento üretimi kaynaklı emisyonlar, alternatif yakıt kullanımı, sera gazı emisyonları, iklim değişikliği, IPCC hesaplama yöntemleri, IPCC kılavuzu, atıklardan kaynaklanan emisyonların hesaplanması.

ABSTRACT

ACCOUNTING FOR GREENHOUSE GASES EMISSION FROM CEMENT PRODUCTION

Ayşe Ebru ORHAN

Master of Science, Department of Environmental Engineer

Supervisor: Prof. Dr. Gülen GÜLLÜ

August 2018, 137 pages

The cement industry constitutes 7,2% of Turkey's emission. Industrial transactions also have the highest share. During the cement production process the clinker production stage causes CO₂ formation. Carbonate-containing raw materials are reacted with high temperature, resulting in CO₂ emissions. For this reason, an integrated pilot plant was chosen as a part of the thesis and both greenhouse gas and process greenhouse gas emissions were calculated.

IPCC methods (Tier 1, Tier 2 and Tier 3) and CSI calculation tool were used at the first stage of the study and greenhouse gas emissions were obtained by 4 different methods for 2015, 2016 and 2017. According to the method differences, emissions in three years were found to be 828.017,87 tons CO₂ – 1.270.674,26 tons CO₂. It is found that the indeterminate accounts made of the most reliable IPCC methods are the resultant Tier 3. (Tier 3 uncertainty is between 3-7%, about 20% of Tier 1-2). In addition, the similarity between CSI and Tier 3 method results in an increase in the reliability of Tier 3. Because the CSI calculation module is a module that automatically calculates the emission calculation when special data entries are made.

In the second stage of the thesis, the facility was assessed in using waste as an alternative fuel. Within three years of calculation, it was found that 70.980, 45 tons of CO₂ emissions were prevented from being used as a result of ATY use. In addition to saving CO₂, it achieved a fossil fuel gain of 2609 TJ, contributing to the efficient use of natural resources.

In the last stage of the thesis, the plant's waste utilization rate was adapted to Turkey's overall cement industry and various scenarios were produced. The scenario shows how much environmental benefit can be achieved by using the ATY as well as the general pilot plant. At the end of the adaptation, 10,2 Mt CO₂ emissions could be prevented in the three years. At the same time, it has been observed that the storage of 5.903,31 Gg of waste can be avoided and the consumption of fossil fuel of 175.201,39 TJ can be prevented.

Today, the continuous growth observed in the construction sector continues. With infrastructure and road construction, urban transformation applications, third airport construction and Çanakkale Bosphorus Bridge construction projects, cement requirements are expected to increase. Considering the increase in capacity to be experienced in the sector, it was understood that the use of ATY would be beneficial in terms of natural resource productivity and air pollution.

Keywords: emission from cement production, alternative fuels use, greenhouse gas emissions, climate change, IPCC calculation methods, IPCC guidance, calculation of waste emission.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımnda bilgi birikimi ve tecrübelerini benimle paylaşarak yol göstermesinin yanı sıra manevi olarak da her zaman destek olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Gülen GÜLLÜ'ye sonsuz teşekkür ederim. Görüş ve önerilerini paylaşan sevgili jüri üyeleri Prof. Dr. A.Cemal SAYDAM'a, Prof. Dr. Gaye TEKSÖZ'e, Doç. Dr. Selim L. SANİN'e ve Doç. Dr. Merih AYDINALP KÖKSAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımnda yardım ve desteklerini esirgemeyen Mahmut TÜRKER'e, sabrı ve fikirlerini esirgemeyen dostum S. Yeşer ASLANOĞLU'na ve işyerinde bana destek olarak tez yazmama zaman ayırmamı sağlayan Aşkın KARTAL'a ayrıca teşekkür etmek isterim.

Beni bu zamana kadar yetiştiren, maddi ve manevi her daim yanımda olan canım annem Meral ORHAN ve babam Nejat ORHAN'a, her zaman idol belirlediğim biricik abim Eren ORHAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER	ix
ŞEKİLLER	xii
KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	1
1.2. Çalışmanın Kapsamı	1
1.3. Çalışma Planı	2
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1. İklim Değişikliği ve Sera Gazı Emisyonları	3
2.2. IPCC, IPCC Guidelines ve CSI	10
2.3. Sera Gazı Hesaplama Yöntemleri	12
2.4. Türkiye’de ki Mevcut Sera Gazı Emisyon Durumu	13
2.4.1. Toplam Sera Gazı Emisyon Durumu	13
2.4.2. Sektörel Bazlı Emisyon Durumu	21
2.5. Çimento Sanayi	28
2.5.1. Dünya ve Türkiye’de ki Önemi	29
2.5.2. Çimento Üretimi	36
2.5.3. Çimento Üretim Teknikleri	44
2.5.4. Çimento Türleri	50
2.5.5. Türkiye’de Çimento Üretiminden Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonları	52
2.5.6. Çimento Üretiminde Mevcut En İyi Teknikler (MET)	55
3. MATERYAL VE METOT	65

3.1. Pilot Tesis Bilgileri	68
3.1.1. Yakıt ve Hammadde Kaynakları	68
3.1.2. Üretim (Proses) Teknikleri	69
3.1.3. Çimento ve Klinker Üretim Miktarı	70
3.2. IPCC Kılavuzu ile Emisyon Hesaplama Yöntemi	71
3.2.1. Yakıt Emisyonlarının Hesaplanması	72
3.2.2. Proses Emisyonlarının Hesabı	77
3.3. CSI Hesaplama Yöntemi	83
3.4. Atık Emisyonu Hesabı	83
3.5. Belirsizlik Hesabı	88
3.6. Birlikte İşleme ile Emisyon Azaltımı	89
3.7. Türkiye Geneli Senaryoları	92
3.7.1. Senaryo 1	93
3.7.2. Senaryo 2	93
3.7.3. Senaryo 3	94
4. SERA GAZI EMİSYONLARININ HESAPLANMASI VE SONUÇLARI	95
4.1. IPCC Kılavuzu ile Emisyonların Hesaplanması	95
4.1.1. Yakıt Emisyonlarının Hesaplanması ve Sonuçları	95
4.1.2. Proses Emisyonlarının Hesaplanması ve Sonuçları	108
4.1.3. Toplam Emisyon Sonuçları (Yakıt+Proses)	114
4.1.4. Atık Emisyonlarının Hesaplanması ve Sonuçları	116
4.2. CSI Hesaplama Aracı İle Emisyonların Hesaplanması ve Sonuçları	118
4.3. Birlikte İşleme İle Emisyon Azaltımı Sonuçları	119
4.4. Türkiye Geneli Senaryolarının Sonuçları	121
4.4.1. Senaryo 1	122
4.4.2. Senaryo 2	125

4.4.3. Senaryo 3	127
5. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER	129
KAYNAKÇA	131
ÖZGEÇMİŞ.....	137



ÇİZELGELER

Çizelge 2.1: Sera gazlarının CO ₂ 'e göre küresel ısınma potansiyel (GWP) değerleri [6].....	5
Çizelge 2.2: Sera gazı emisyonları (AKAKDO hariç) 1990 - 2016	13
Çizelge 2.3: Toplam emisyonun sera gazı türlerine göre dağılımları (Mt CO ₂ eşd.).....	17
Çizelge 2.4: Sektörlere göre sera gazı emisyon durumu 1990 – 2015 (Mt CO ₂ eşd.).....	19
Çizelge 2.5: 1990 - 2016 yılı enerji sektörü emisyonlarının kaynakları ve miktarları	22
Çizelge 2.6: Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı sektörü sera gazı emisyonları (kt CO ₂)	23
Çizelge 2.7: Tarımsal faaliyetlerden oluşan sera gazı emisyon kaynakları ve miktarları ...	25
Çizelge 2.8: AKAKDO kapsamındaki alanların emisyonlara katkısı	26
Çizelge 2.9: Atık emisyon kaynakları ve emisyona katkıları 1990 - 2016 (kt CO ₂ eşd.)....	27
Çizelge 2.10: Dünya genelinde bölgelere göre çimento üretimi (Mt) [25].	30
Çizelge 2.11: Bölgelere göre 2016 yılı çimento tesislerinin kapasite ve kapasite kullanım oranları	33
Çizelge 2.12: 2017 yılı çimento ve klinker ihracatı (ton).....	34
Çizelge 2.13: Ön ısıtıcı ve fırında gerçekleşen reaksiyonlar [37].	41
Çizelge 2.14: Dünya’da ve Türkiye’de kullanılan çimento fırın türleri ve kullanım oranları	43
Çizelge 2.15: Farklı fırın tiplerine göre yakıt tüketimi.....	43
Çizelge 2.16: Çimento türleri	51
Çizelge 2.17: 1990 yılından 2016 yılına kadar birim ton başına düşen CO ₂ değerleri	53
Çizelge 2.18: Çimento tesisindeki sistemin girdi ve çıktıları	55
Çizelge 2.19: Yıllara göre alternatif yakıt tüketimleri (ton).....	63
Çizelge 2.20: Yıllara göre alternatif hammadde tüketimleri (ton)	63
Çizelge 3.1: Tesiste yıllara göre kullanılan kalker miktarı ve içeriği.....	69
Çizelge 3.2: Tesiste yıllara göre üretilen klinker ve çimento miktarları (ton)	71
Çizelge 3.3: Tesiste kullanılan yakıt türleri ve miktarları	72
Çizelge 3.4: Yakıtlar için IPCC den alınan ve kabul edilen değerler.....	75
Çizelge 3.5: Yıllara göre yakıtlar için kabul edilen EF değerleri (kg/TJ)	76
Çizelge 3.6: Tesisin 2015, 2016 ve 2017 yıllarına ait tesis EF (ton/TJ) ve NKD (GJ/ton). ..	77
Çizelge 3.7: Yıllara göre kullanılan ATY miktarı (ton)	84
Çizelge 3.8: ATY için hesaplanan DOC fraksiyonu	85
Çizelge 3.9: Yıllara göre biriken DDOCm miktarları (Gg).....	86

Çizelge 3.10: Çimento üretiminde yakıtlar için varsayılan belirsizlik değerleri	88
Çizelge 3.11: Çimento üretiminde varsayılan belirsizlik değerleri	89
Çizelge 3.12: ATY tüketimi fosil yakıtlara dağıtıldığında, oluşacak olan emisyon hesabında kullanılan yakıt tüketimi (TJ) ve EF (ton/TJ)	91
Çizelge 3.13: ATY' ın yanmasından kaynaklanan emisyonların hesaplanmasında kullanılan EF (ton/TJ), NKD (GJ/ton) ve yakıt tüketim değerleri	91
Çizelge 3.14: Türkiye geneli çimento üretimindeki yakıt türüne göre fosil yakıt tüketimleri (TJ) ve NKD (TJ/Gg)	92
Çizelge 3.15: Yıllara ve yakıt türlerine göre emisyon faktörü değerleri (kg/TJ)	93
Çizelge 4.1: 2015 yılı için Tier 1 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)	96
Çizelge 4.2: 2016 yılı için Tier 1 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)	97
Çizelge 4.3: 2017 yılı için Tier 1 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)	98
Çizelge 4.4: 2015 yılı için Tier 2 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)	101
Çizelge 4.5: 2016 yılı için Tier 2 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)	102
Çizelge 4.6: 2017 yılı için Tier 2 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)	103
Çizelge 4.7: 2015 yılı için Tier 3 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)	104
Çizelge 4.8: 2016 yılı için Tier 3 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)	105
Çizelge 4.9: 2017 yılı için Tier 3 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)	105
Çizelge 4.10: Yıllara göre Tier 1 yöntemiyle hesaplanmış prosese dayalı emisyon değerleri	109
Çizelge 4.11: Yıllara göre Tier 2 yöntemiyle hesaplanmış prosese dayalı emisyon değerleri	109
Çizelge 4.12: Yıllara göre Tier 3 yöntemiyle hesaplanmış prosese dayalı emisyon değerleri	111

Çizelge 4.13: Tier 3 yöntemi ile hesaplanan proses emisyonu belirsizliği	111
Çizelge 4.14: Tesisin baz alınan yıllardaki toplam emisyonları (ton).....	114
Çizelge 4.15: Birim ton çimento ve klinker üretimi başına düşen CO ₂ emisyonu.....	114
Çizelge 4.16: Atıklardan kaynaklanacak olan CO ₂ eşd. (ton)	117
Çizelge 4.17: CSI yöntemi ile yapılan hesaplama sonuçları (ton)	118
Çizelge 4.18: Tesiste ATY kullanılmadığı ve yerine fosil yakıtlar ile devam edildiği durumda oluşacak emisyon (ton)	119
Çizelge 4.19: Üç yılda azaltılan fosil yakıt miktarları (ton)	120
Çizelge 4.20: ATY kullanımından kaynaklanan CO ₂ emisyonu	121
Çizelge 4.21: Azaltılabilecek yakıt tüketiminin yıllara ve yakıt türlerine göre dağılımı (TJ)	123
Çizelge 4.22: Azaltılabilecek olan fosil yakıtların yıllara ve yakıt türlerine bağlı emisyonları.....	124
Çizelge 4.23: ATY olarak değerlendirilecek atık miktarı (Gg).....	125
Çizelge 4.24: Katı atık bertaraf alanlarına gönderilen atıkların yıllara göre emisyon durumları (ton)	126
Çizelge 4.25: ATY kullanımı olması durumunda oluşacak olan emisyon hesabı.....	127

ŞEKİLLER

Şekil 2.1: Sera Etkisi [3].....	3
Şekil 2.2: 1960-2018 yılları arası CO ₂ trendi	6
Şekil 2.3: Küresel sera gazı emisyonları [10].....	7
Şekil 2.4: Türkiye'nin Niyet Ettiği Ulusal Katkısı (INDC) [13].....	10
Şekil 2.5: Tüm sera gazlarının 1990 – 2016 emisyon trendleri [20]	14
Şekil 2.6: 1990 – 2016 yıllarında gaz türlerinin toplam emisyonu oranları (AKAKDO hariç) [21].....	15
Şekil 2.7: 1990 – 2016 yıllarında gaz türlerinin toplam emisyonu oranları (AKAKDO dahil) [21].....	15
Şekil 2.8: 1990 – 2015 yılları arasındaki toplam sera gazı emisyon trendleri AKADO hariç ve dahil [21]	18
Şekil 2.9: 2016 yılı sektörel emisyonların 1990 yılına göre artış oranları (%) [21].....	20
Şekil 2.10: Toplam sera gazı emisyonlarının sektörel payları, 2016.....	21
Şekil 2.11: 1990 – 2016 yılları arasındaki sektörel kırılmadaki emisyon trendleri (kt CO ₂ eşd.).....	24
Şekil 2.12: AKAKDO' a bağlı emisyon giderim trendleri 1990 - 2016 (kt CO ₂ eşd.).....	27
Şekil 2.13: Atık emisyonlarının 1990 - 2016 yılı arasındaki değişimi (Mt CO ₂ eşd.).....	28
Şekil 2.14: 2017 yılında en çok çimento ihracatı yapan ülkeler [24].	31
Şekil 2.15: 2017 yılında en çok çimento ithalatı yapan ülkeler [24].	31
Şekil 2.16: Türkiye' deki çimento tesisleri [30].	32
Şekil 2.17: GSYH ile çimento tüketimi ilişkisi	34
Şekil 2.18: Ülkelere göre çimento ihracatı ve taşıma şekli	35
Şekil 2.19: Basitleştirilmiş genel çimento üretiminin proses akış şeması [28].	37
Şekil 2.20: Klinkerleşme prosesinde oluşan ısı bölgeleri.....	42
Şekil 2.21: Yaş üretim prosesi ile klinker üretimi [38].	46
Şekil 2.22: Yarı yaş üretim prosesi ile klinker üretimi [38].	46
Şekil 2.23: Yarı kuru (lepol) üretim prosesi ile klinker üretimi [38].	47
Şekil 2.24: Kuru üretim prosesi ile çimento üretim akış şeması [36].	49
Şekil 2.25: 1990-2016 yılları arası 1 ton klinker üretimi başına düşen CO ₂ emisyonları ...	54
Şekil 2.26: Kuru proses kullanıldığında 1 kg çimento üretimi için kütle denkliği [36].	56
Şekil 3.1: Tez kapsamı için oluşturulmuş akış şeması	66
Şekil 3.2: Türkiye senaryoları için oluşturulmuş akış şeması	67

Şekil 3.3: Çimento üretimi akış şeması	68
Şekil 3.4: Ön ısıtıcı ve döner fırınlarda kritik çalışma sıcaklıkları.....	69
Şekil 3.5: Yakıt emisyonlarının hesaplanmasında kullanılacak olan yöntem seçimi için karar ağacı [47].	73
Şekil 3.6: Proses emisyonlarının hesaplanmasında kullanılacak olan yöntem seçimi için karar ağacı [52].	79
Şekil 3.7: Birlikte işleme akışı [59]	90
Şekil 4.1: Yakıt türlerinin Tier 1 yönteminde yıllara göre emisyon durumları.....	99
Şekil 4.2: Yakıt türlerinin Tier 2 yönteminde yıllara göre emisyon durumları.....	100
Şekil 4.3: Yakıt türlerinin Tier 3 yönteminde yıllara göre emisyon durumları.....	106
Şekil 4.4: Yıllara ve yöntemlere göre yakıt emisyonların belirsizlik durumları	107
Şekil 4.5: Proses Kaynaklı Emisyonların Yıllara ve Hesaplama Yöntemlerine Emisyonları ve Belirsizlikleri (ton)	113
Şekil 4.6: Yıllara ve yöntemlere göre birim ton başına klinker başına düşen emisyon durumları.....	115
Şekil 4.7: Yıllara ve yöntemlere göre birim ton başına çimento başına düşen emisyon durumları.....	116

KISALTMALAR

ATY	Atıktan Türetilmiş Yakıt
AKAKDO	Arazi Kullanımı, Arazi Kullanımı Değişikliği ve Ormancılık
BMİDÇS	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC)
COP	Taraflar Konferansı
CRF	Ortak Raporlama Formatı
CSI	Çimento Sürdürülebilirlik Girişimi
CKD	Çimento Fırın Tozu
DOC	Parçalanabilir Organik Karbon
EF	Emisyon Faktörü
FOD	Birinci Dereceden Bozunma
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli
INDC	Niyet Edilmiş Ulusal Katkı
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
MET	Mevcut En İyi Teknikler (BAT)
NIR	Ulusal Envanter Raporu
NKD	Net Kalorifik Değer
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
ÖTL	Ömrünü Tamamlamış Lastikler
SWDS	Katı Atık Bertaraf Bölgesi
UNEP	Birleşmiş Milletler Çevre Programı
YT	Yakıt Tüketimi
WBCSD	Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi
WMO	Dünya Meteoroloji Örgütü

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı

Türkiye’de ki sera gazı emisyonlarına genel bakış yaparak, sera gazı emisyon kaynaklarından Endüstriyel İşlemler kategorisinde yer almakta olan “Çimento Sektörü” kaynaklı emisyonlar incelenmiştir. Çimento ve klinker üretim yapmakta olan entegre bir fabrika pilot tesis olarak seçilerek, tesis bazında emisyon hesabı yapılması amaçlanmıştır. Böylece Türkiye’de en fazla emisyon salınımını yapan sektörlerden biri olması sebebiyle “ana kategori” de yer alan çimento sektörü için emisyon hesaplanmasında çeşitli yöntemler kullanılmış ve yöntemler arasındaki farklılıkların değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bunun yanı sıra, seçilen pilot tesis çimento sektöründe atık beratarafı konusunda öncü tesislerden biridir. Atıkları alternatif yakıt olarak kullanmakta ve bu sayede fosil yakıt tüketimini azaltarak, hem tesisten kaynaklanan sera gazı emisyonların azaltılmasını sağlamakta hem de atıkların depolama alanlarında oluşturacakları emisyonları engellemektedir. Tez kapsamında tesisin ATY kullanımı ile yapmış olduğu kazanımların açıklanması hedeflenmiştir.

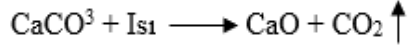
Tesisin öncülük ettiği ATY kullanımı, Türkiye genelinde uygulanması sonucu emisyonlarda nasıl bir azalma yapılabileceği, atıklardan kaynaklanacak emisyonların ne kadarının önüne geçilebileceği ve fosil yakıt tüketimlerinde ne gibi azaltımların sağlanabileceği oluşturulacak olan senaryolar ile açıklanması amaçlanmıştır.

1.2. Çalışmanın Kapsamı

Çimento sektörü enerji yoğun bir sanayi alanıdır. Türkiye sera gazı emisyonlarının temeli enerji sektörü kaynaklıdır. 2016 yılında Türkiye’nin toplam sera gazı emisyonları 496,10 Mton CO₂ eşd. (AKAKDO hariç) olarak gerçekleşirken, emisyonların % 72,8’ini enerji kaynaklıdır. 2016 yılında endüstriyel işlemler kaynaklı sera gazı emisyon 62,24 Mton CO₂ olup, toplam emisyonların %12,6’sını oluşturmaktadır. Endüstriyel işlemlerden kaynaklanan emisyonların %67,2 gibi büyük bir payını çimento üretimi oluşturmaktadır.

Çimento üretiminde klinker pişirme prosesi, enerji tüketimi ve havaya yapılan emisyonlar bakımından temel çevre problemlerinin temelini oluşturmaktadır. Havaya salınım yapılan en önemli kirleticiler; toz, NO_x ve SO₂’lerdir. Bunların yanı sıra; CO, PCDD/F, TOC, metaller, HCl ve HF’dür. Kirleticiler maddelerin türü kullanılan hammaddeye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. 1 ton klinker üretmek için yaklaşık 1,52 ton hammadde kullanılmaktadır. Hammadde ile klinker arasındaki fark kalsinasyon işlemi esnasında havaya

salınan CO₂ emisyonlarıdır. Çimento üretiminde hammadde olarak kullanılan kalker ısı ile birleşmesi sonucu CO₂ meydana gelmektedir.



CO₂ bilindiği üzere “Sera Gazı” olarak adlandırılan bir gazdır ve bu gazlar İklim değişikliği açısından önemlidir. CO₂ Emisyonları ile ilgili olarak da IPCC 2006 yılında “Ulusal Sera Gazı Envanter” kılavuzu yayınlamış ve ülkelerin bu kılavuzda yer alan metotları kullanarak yıllık emisyonlarını hesaplamalarını ve raporlamalarını istemiştir. Kılavuz kullanıcılara, hesaplama da kullanılacak olan verilere göre üç farklı yöntem sunmaktadır. Verilerin ulaşılabilirliği açısından basitten karmaşığa doğru yöntemler Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 olarak sıralanmaktadır. Tier 1, verilere ulaşılabilen durumlar için IPCC’ de belirlenmiş varsayılan değerlerin kullanımını içeren yöntem iken, Tier 2 ulusal varsayılan değerlerin kullanımı ile yapılmaktadır. Tier 3 metodu kapsamlı veri birikimine dayanmaktadır. Ülkelerde ana kategori olarak belirlenen sektörler için IPCC Tier 2 ve Tier 3 yöntemi kullanılmasını önermiştir. Çimento üretimi, CO₂ emisyonları bakımından Türkiye için “ana kategori” olarak belirlenmiştir. Bundan dolayı yapılacak olan Sera Gazı Emisyon hesapları en az Tier 2 veya Tier 3 ile yapılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, seçilmiş olan pilot tesisin emisyon hesapları IPCC kılavuzunda belirtilen Tier 1, 2 ve 3 yöntemleri ve CSI’nin (Cement Sustainability Initiative) Excel SpreadSheet kullanılarak yapılmıştır ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Seçilen pilot tesiste atıkları alternatif yakıt olarak değerlendirerek, fosil yakıtlar da verimlilik yaratmaktadır. Alternatif yakıt kullanımının tesise sağladığı yararlar incelenmiş ve Türkiye geneline uyarlanmıştır. Atık kullanımının emisyonların azaltımı ve fosil yakıtlar üzerindeki katkısı değerlendirilmiştir.

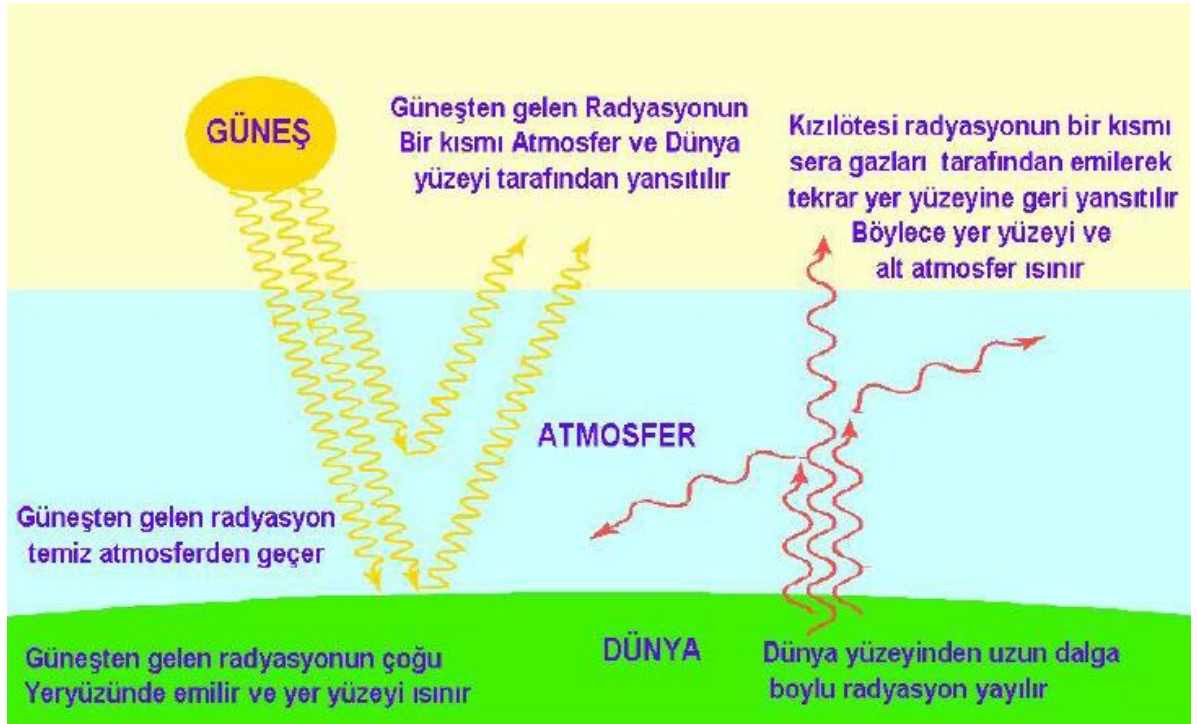
1.3. Çalışma Planı

Tez çalışmasında, seçilmiş olan pilot tesisin 2015, 2016 ve 2017 yıllarındaki emisyonları hem IPCC kılavuzunda geçen yöntemler ile hem de CSI’in hesaplama aracı kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama yöntemleri arasındaki benzerlik ve farklılıklar değerlendirilmiştir. Hesaplamanın yanı sıra, tesisin alternatif yakıt olarak atık kullanımı ile gerçekleştirmiş olduğu birlikte işleme değerlendirilmiş ve Türkiye geneline senaryolar oluşturularak çimento sektöründe atık kullanımı elde edilebilecek karbon emison azaltımı ortaya konmaya çalışılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. İklim Değişikliği ve Sera Gazı Emisyonları

İklim değişikliği “karşılaştırılabilir zaman dilimlerinde gözlenen doğal iklim değişikliğine ek olarak, direk veya indirek olarak küresel atmosfer bileşimini bozan insan faaliyetleri sonucu iklimde olan değişiklik” olarak tanımlanmaktadır [1]. Özellikle sanayi devriminden sonra fosil yakıt kullanımının artması, arazi kullanımlarında yaşanan değişiklikler, ormansızlaşma ve sanayi süreçleri nedeniyle sera gazlarının atmosferde birikmesi, atmosferin kimyasal özelliklerini etkilemiştir. Uzun süreli bu etki ise küresel ölçekte ısınmaya ve iklim değişikliğine sebep olmaktadır [2].



Şekil 2.1: Sera Etkisi [3]

Güneş'ten Dünya'ya gelen ışınlar (mor ve kızılötesi) yeryüzüne çarptıktan sonra bir kısmı yeryüzünde emilirken bir kısmı atmosfere geri yansıtılır. Yeryüzü tarafından absorblanan ışınlar Dünya'nın ısınmasını sağlar. Ancak kızılötesi ışınlar, atmosferde biriken sera gazı adı verilen gazlar tarafından tutularak, tekrardan yeryüzüne geri yansıtılır. Bu da yeryüzünde sıcaklıkların artmasına ve dolayısıyla küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Şekil 2.1'de sera etkisi görsel olarak sunulmuştur.

İnsan faaliyetleriyle sera etkisine sebep olan sera gazlar Kyoto Prokotelü' ne göre şu şekilde sıralanmaktadır [4];

- Karbondioksit (CO₂)
- Metan (CH₄)
- Nitröz Oksit (N₂O)
- Hidroklorokarbonlar (HFCler)
- Perflorlukarbonlar (PFCler)
- Kükürt Hekzaflorür (SF₆)

Sera gazları CO₂ eşdeğeri olarak ifade edilmektedir. Küresel ısınmaya olan katkıları gazların türüne göre değışiklik göstermektedir. Bu da “Global Warming Potential (GWP)” olarak adlandırılan küresel ısınma potansiyelleridir. Sera gazları, izole bir battaniye gibi davranarak enerjiyi absorblaması ve uzaya geçiş hızlarını yavaşlatması ile Dünya'yı ısıtmaktır. Farklı sera gazlarının Dünya'nın ısınmasında farklı etkileri olmaktadır. Bu gazların birbirinden farklı olduğu iki temel husus vardır; enerjiyi absorblama kabiliyetleri (radyoaktif etkisi) ve atmosferde ne kadar kalabildikleridir. Küresel ısınma potansiyeli, farklı gazların küresel ısınmaya etkilerinin karşılaştırılabilmesi için geliştirilmiştir. Spesifik olarak 1 tonluk bir gazın emisyonlarının 1 tonluk CO₂ emisyonlarına göre belirli bir zaman aralığında ne kadar enerji absorblayacağını gösterir. Bir gazın küresel ısınma potansiyeli (GWP) ne kadar büyük ise, Dünya'yı o zaman zarfında CO₂'ye göre daha fazla ısıtır. Küresel ısınma potansiyelinde genellikle kullanılan süre 100 yıldır. CO₂ referans olarak kullanılan gazdır, bu nedenle 1 GWP değerine sahiptir [5].

Gazları küresel ısınma potansiyelleri (GWP) Çizelge 2.1'de verilmiştir [6]. Bu değerler sera gazlarının toplam değerini CO₂ eşdeğeri olarak ifade edilebilmesi için kullanılan dönüştürme katsayılarıdır.

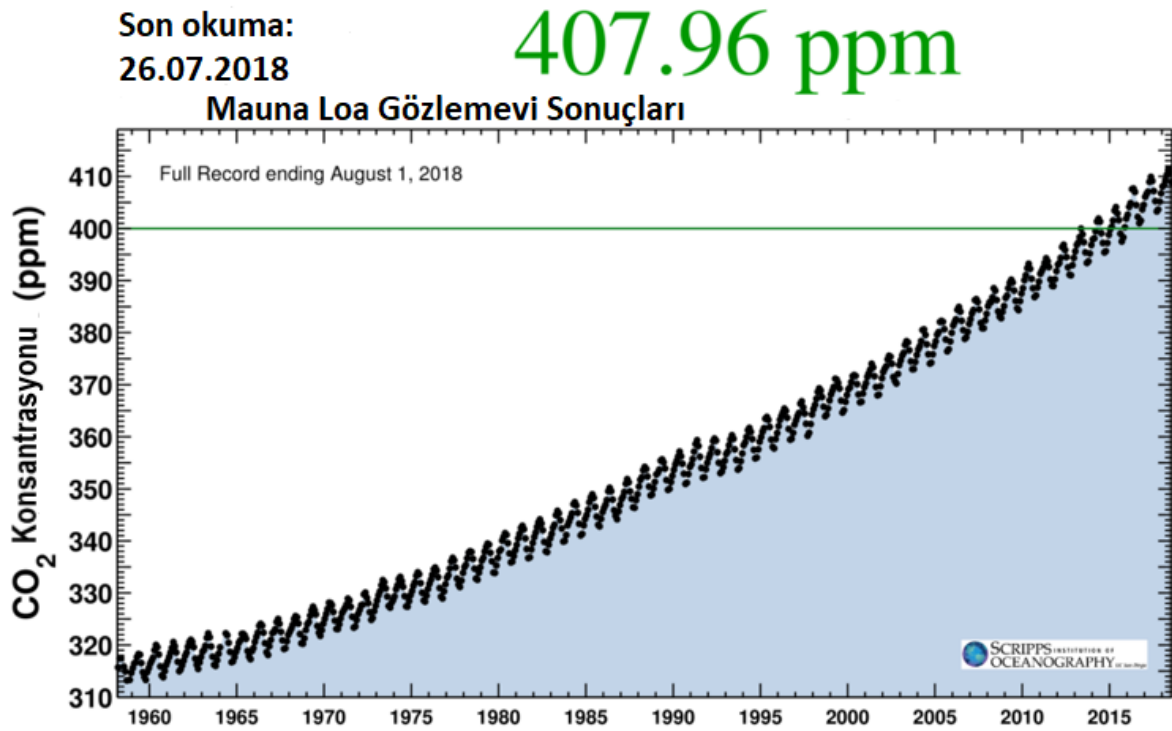
Çizelge 2.1: Sera gazlarının CO₂'e göre küresel ısınma potansiyel (GWP) değerleri [6]

Kimyasal Adı	Kimyasal Formülü	100 yıllık zamanda GWP Değeri
Karbon dioksit	CO ₂	1
Metan	CH ₄	28
Nitröz Oksit	N ₂ O	265
Hidroklorokarbonlar	HFClar	
HFC-23	CHF ₃	12,400
HFC-32	CH ₂ F ₂	677
HFC-125	CHF ₂ CF ₃	3.170
HFC-134	CHF ₂ CHF ₂	1.120
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	1.300
HFC-143	CH ₂ FCHF ₂	328
HFC-143a	CH ₃ CF ₃	4.800
HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	138
HFC-227ea	CF ₃ CHFCF ₃	3.350
HFC-236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃	8.060
HFC-43-10mee	CF ₃ CHFCHFCF ₂ CF ₃	1.650
Perflorlukarbonlar	PFClar	
PFC-14	CF ₄	6.630
PFC-116	C ₂ F ₆	11,100
PFC-218	C ₃ F ₈	8.900
PFC-318	c-C ₄ F ₈	9.540
PFC-31-10	C ₄ F ₁₀	9.200
PFC-51-14	C ₆ F ₁₄	7.910
Kükürt Hekzaflorür	SF ₆	23,500

Tüm Dünya genelinde sera etkisinin artması; sıcaklıkların artmasına, ekolojik sistemlerin bozulmasına ve iklim sistemin değişmesine sebep olmaktadır. İklim değişikliğine sebep olan küresel ısınma ile; buzullarda erime, deniz seviyelerinde yükselme, şiddetli hava olaylarının meydana gelmesiyle insan sağlığı ve yaşamını, sosyoekonomik faktörleri ve ekolojik sistemleri doğrudan veya dolaylı etkilemesi beklenmektedir. Sera gazı emisyonlarının artmasına sebep olan temel faktörler arasında; ekonomik büyüme, nüfus artışı, tarım arazilerinin azalması, ormansızlaşma, taşıt araçlarının artması, atıkların artması, insanların

tüketim alışkanlıklarındaki değişiklikler, yenilenmeyen enerji kullanımı yer almaktadır. Bu faktörlerden en önemlisi yoğun enerji kullanımıdır [7].

IPCC'nin değerlendirmelerine göre küresel sıcaklık artışının 2C°'nin altında tutulması gerekmektedir. Bunun içinde sera gazı emisyon konsantrasyonunun 450 ppm seviyesini geçmemesi gerekmektedir. Uzmanlar 2 C° artmasının geri dönüşü olmayan etkileri olacağını öngörmektedir. 1 Ağustos 2018 tarihinde güncellenen son CO₂ seviyesi ölçümlerinde görüldüğü üzere, 26 Temmuz 2018 tarihine kadar olan verilerde CO₂ seviyesi 407,96 ppm e ulaşmıştır. 1960'dan günümüze kadar olan CO₂ trendi Şekil 2.2'de paylaşılmıştır [8].



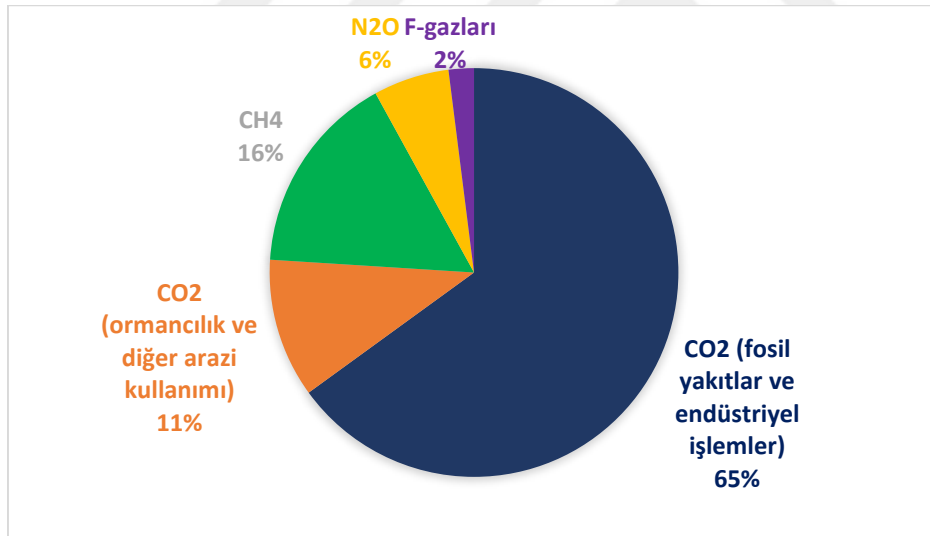
Şekil 2.2: 1960-2018 yılları arası CO₂ trendi

2015 yılında yapılan Paris İklim Antlaşması'nda küresel sıcaklık artışının 1,5 C° de dengede kalması kararlaştırılmıştır. Sıcaklık artışı sanayi öncesi zamanlardan 2 C° fazla artarsa, deniz seviyesindeki artışın 2100 yılında yarım metre olacağı tahmin edilmektedir. Ancak sıcaklık artışı 1,5 C° de dengede kaldığında ise deniz seviyesindeki artışın yaklaşık 10 cm olacağı öngörülmektedir. Kuraklık etkisinin en fazla hissedilen yer olan Akdeniz bölgesinde; 1,5 derecelik artışın tatlısu erişilebilirliğinin 20.yüzyıla oranla %9 oranında azalması beklenmekte iken, artışın 2 derece olması durumunda bu azalmanın %17 olması beklenmektedir. Sıcaklık artışlarının etkilediği en çarpıcı durum ise, mercan resifleri ve resiflerin desteklediği canlı ekosistemleri olup, 1 derecelik artış ile şimdiden stres altındadır. 2 derecelik artış ile bu yüzyılın sonuna kadar tüm bu ekosistemin yok olma ihtimali

öngörülürken, 1,5 derecelik artış ile yok olma durumu %70 ile sınırlı kalacağı beklenmektedir [9].

Küresel ölçekte insan faaliyetleri sonucu yayılan sera gazlarının kaynakları aşağıda verilmiştir [10]. Sera gazlarının kaynaklarının yüzdelik dilimleri ise Şekil 2.3’de verilmiştir.

- **CO₂:** Fosil yakıtların kullanımı CO₂ emisyonlarının birincil kaynağıdır. Bunun yanı sıra ormansızlaştırma ve diğer arazi kullanımı (tarım için arazi temizleme, toprağın bozulması) da CO₂ kaynaklarındandır.
- **CH₄:** Tarımsal faaliyetler, atık yönetimi, enerji kullanımı ve biyokütle yakılması CH₄ kaynaklarındandır.
- **N₂O:** Gübre kullanımı gibi tarımsal faaliyetler birincil kaynağıdır. Buna ek olarak fosil yakıtların yanması da N₂O oluşumuna sebep olmaktadır.
- **F-gazları:** Endüstriyel işlemler, soğutma sektörü HFC, PFC ve SF₆ içeren F gazlarının emisyonlarına katkıda bulunurlar.



Şekil 2.3: Küresel sera gazı emisyonları [10]

1970’lı yıllardan itibaren, uluslararası kuruluşlar ve Birleşmiş Milletler (BM)’in önderliğinde iklimde meydana gelen insan kaynaklı etkilerin azaltılabilmesi için çeşitli faaliyetler ve çalışmalar yapılmıştır. İklim değişikliği ilk kez uluslararası boyutta BM Çevre Konferansı’nda 1972 yılında ele alınmış ve küresel işbirliği ile ortak hareket edilebilmesi için Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) kurulmuştur.

1979 yılında yapılan I. Dünya İklim Konferansı ile uluslararası müzakerelere teknik altyapı hazırlıkları başlamıştır. Konferansta çevresel problemin kaynağı enerji üretimi ve tüketimi

olarak kabul edilmiş ve etkilerinin belirlenmesi konusunda çalışmalar yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Rio de Janerio’de 1992’de yapılan Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı ile, iklim değişikliği ile ilgili bilimsel verilerin şeffaflığı ve enerjinin yoğun şekilde tüketiminin neden olduğu çevresel ve ekonomik sorunlar ele alınmıştır. BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) ise, bu konferansta kabul edilmiştir. BMİDÇS ile; atmosferdeki sera gazı birikimini artıran kaynakların (fosil yakıtlar, tarım, enerji, ulaşım, atık yönetimi, orman, arazi kullanımı vb.) belirlenmesi ve temel emisyon kaynaklarının azaltılmasına yönelik yasal düzenlemeler getirilmiştir [7]. 21 Mart 1994 yılında 50 ülkenin imzası ile yürürlüğe giren sözleşmede, ulusal ve bölgesel farklılıklar hesaba katılmış ve ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluk ilkesi benimsenmiştir. Sözleşmenin tüm taraflarına insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının azaltımı konusunda çeşitli yükümlülükler getirilmiş ve taraflar farklı yükümlülükler göre 3 gruba (Ek I, Ek II ve Ek dışı ülkeler) ayrılmıştır. Ek I’de yer alan ülkelerin (pazar ekonomisine geçmiş doğu Avrupa ülkeleri, eski Sovyet ülkeleri ve OECD üyesi ülkeler) temel sorumluluğu, küresel ısınmanın önlenmesi için sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik politikaları uygulayarak 2000 yılına kadar emisyonlarını 1990 seviyesine indirmektir. Ek II ülkeleri (OCED üyesi ülkeler) ise, Ek I de belirtilenlere ek olarak, ekler dışında kalan gelişmekte olan ülkelere sera gazı azaltımı konusunda finansal ve teknik destek sağlamakla yükümlü kılınmıştır. Yükümlülük verilmeyen ek dışı ülkeler, sera gazı emisyonlarını azaltmaya, araştırma ve teknoloji iş birliği yapmaya ve sera gazı yutaklarını korumaya teşvik edilmiştir [11]. 24 Mayıs 2004’de özel şartlarının tanınmasının ardından Türkiye BMİDÇS’ne taraf olmuş ve Ek I listesinde yer almıştır.

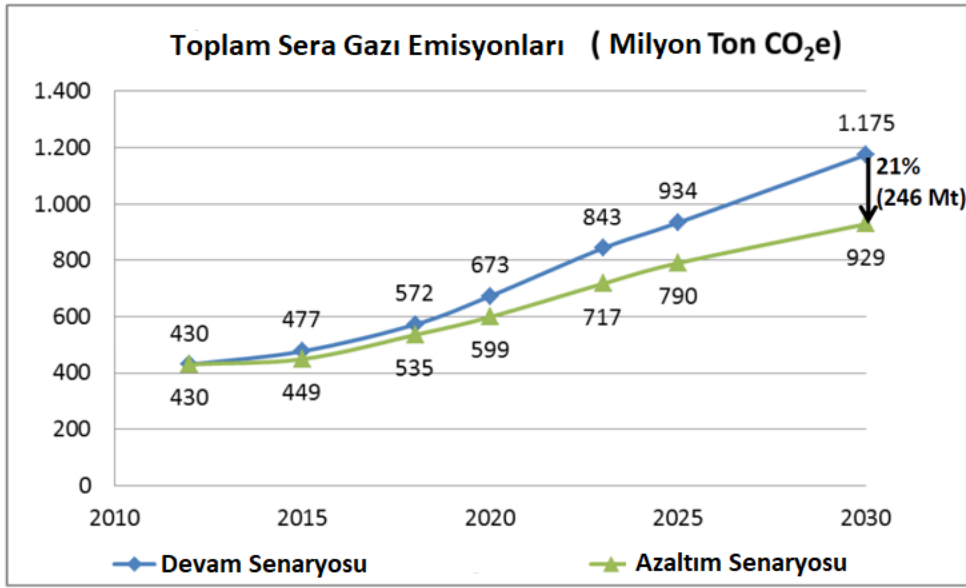
BMİDÇS kapsamındaki yükümlülükleri gözden geçirmek amacıyla, tüm tarafların katıldığı her yıl düzenlenen Taraflar Konferansı (COP) toplantıları gerçekleştirilmektedir. Sözleşmenin sera gazı emisyonlarının azaltılması ya da sınırlandırılmasına yönelik hukuki açıdan bağlayıcılığı olan Kyoto Protokolü, Japonya’da gerçekleştirilen 3. COP toplantısında imzaya açılmıştır. 2005 yılında yürürlüğe giren protokol; Ek I ülkelerinin 2008-2012 döneminde emisyonlarını 1990 seviyesinin %5 altına indirmelerini öngörmüştür. 2009 yılında Kyoto Protokolü’ne taraf olan Türkiye, herhangi bir yükümlülük altına girmemiştir [11].

Kyoto Protokolü’nde yer alan önemli bir noktada; Ek I ülkelerinin sera gazı emisyonlarını azaltmak için yürütecekleri ulusal politikalara ek olarak, *Esneklik Mekanizmaları* kullanarak da emisyonlarını azaltımı sağlayabilecek olmalarıdır. Protokolde yer alan Ortak Yürütme Mekanizması (Joint Implementation) gereği; emisyon hedefi belirlenmiş bir ülke, yine

emisy n hedefi belirlenmiş diğer bir ülkede yatırım yaparsa emisyon azaltma kredisine (emission reduction unit) sahip olur ve bu krediler toplam hedeften düşürülür. Diğer bir mekanizma olan Temiz Kalkınma Mekanizmasına (Clean Development Mechanism) göre, emisyon hedefi belirlenmiş bir ülke, emisyon hedefi belirlenmemiş az gelişmiş bir ülke ile işbirliği yaparak, o ülkede sera gazı emsiyonlarını azaltmaya yönelik projeler yaparsa sertifikalandırılmış emisyon azaltım kredisi (certified emission reductions) kazanır ve toplam hedeften düşülür. Protokolde yer alan son mekanizma ise, Emisyon Ticaretinde ise, emisyon hedefi belirlenmiş olan ülkeler arasında yapılabilmektedir. Emisyon azaltım yükümlülüğüne göre daha çok azaltım sağlayan ülke, ilave azaltımlarını başka ülkeye satma hakkına sahiptir [12].

Güney Afrika'da gerçekleştirilen 17.COP toplantısında Protokolün ikinci yükümlülük döneminin 2013 yılında başlamasına karar verilmiştir. 2012 yılında Doha'da gerçekleştirilen 18. COP toplantısında ise ikinci yükümlülük döneminin 2020'de bitmesine karar verilmiştir. Paris'te düzenlenen 21.COP toplantısında küresel sıcaklık artışının, 1,5 - 2C  ile sınırlandırmayı hedefleyen Paris Anlaşması kabul edilmiştir. Anlaşmanın yürürlüğü giriş tarihi 4 Kasım 2016'dır. Anlaşmaya taraf olan  lkeler Ek olarak ayrılmamış, gelişmiş ülke ve gelişmekte olan ülke tanımlamaları kullanılmıştır. Sera gazı emisyonlarının azaltılmasında gelişmiş ülkelerin öncülük etmesi ve gelişmekte olan ülkelere finansal ve teknolojik destek sağlaması kararlaştırılmıştır.  lkeler yükümlülükler belirlenmeden önce, iklim değişikliğiyle mücadele için ortaya koyacakları politikalarını belirten Niyet Edilmiş Ulusal Katkılarını (INDC) sunmak için davet edilmiş ve Paris Anlaşması sunulan bu INDC'ler üzerine kurulmuştur [11].

Türkiye, 30 Eylül 2015 tarihinde INDC sunmuş ve 2012 yılını referans olarak 2030 yılına kadar %21 azaltım yapmayı taahhüt etmiştir. Türkiye'nin Niyet Ettiği Ulusal Katkısı şekil 2.4'de verilmiştir [13].



Şekil 2.4: Türkiye'nin Niyet Ettiği Ulusal Katkısı (INDC) [13]

Sera gazı emisyonlarına, ülkemizde en çok katkıyı enerji üretimi ve tüketimi sağlamaktadır. Enerjinin verimli kullanılması, fosil yakıtların yerine alternatif yakıtların bulunması, yenilenebilir enerji kullanımı, ormanların korunması, atık yönetimi gibi önlemler ile emisyonları azaltmamız mümkün olabilecektir.

2.2. IPCC, IPCC Guidelines ve CSI

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) yani Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli; Birleşmiş Milletlerin örgütü olan “Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO)” ve “Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP)” tarafından 1988 yılında kurulmuştur. Kuruluş amacı; İklim değişikliğinin; etkileri ve gelecekteki riskleri, bu etkileri azaltma ve uyum seçenekleri gibi bilimsel çalışmaları belirli aralıklarla değerlendirmeler yaparak, politika yapıcılara sunmaktır. Yapılan değerlendirmeler iklim değişikliğinin riskleri ortaya çıkarır, bu etkilere çözüm önerilerini ele alır ve farklı senaryolara dayanan gelecekteki iklim değişikliği projeksiyonlarını sunar. Ancak bu değerlendirmeler politika belirleyici değildir ve ne yapılması gerektiğini söylemez, bilgilendirme amaçlıdır [14].

IPCC ye katılım “Dünya Meteoroloji Örgütü” ve Birleşmiş Milletlerin tüm üyelerine açıktır ve mevcut durumda 195 üyesi bulunmaktadır. Üye ülkelerin temsilcilerinden oluşan panel, önemli kararları almak için genel kurul toplantısı yapmaktadır. IPCC raporları çok sayıda gönüllü önde gelen bilim adamları tarafından yazılmaktadır. Raporlar açık ve şeffaf üretildikleri, kapsamlı ve objektif olduklarından emin olması için çok sayıda hazırlık ve inceleme süreçlerine tabii tutulmaktadır [14]. IPCC raporları her 5 yıllık dönemler için,

binlerce bilim insanı ve hükümet temsilcileri, uluslararası ve hükümetlerarası kuruluş temsilcilerinin katkılarıyla hazırlanarak yayınlanmaktadır. IPCC bu güne kadar toplam 5 rapor yayınlamıştır. 1. değerlendirme raporu 1990 yılında, ikincisi 1996 yılında, üçüncüsü 2001 yılında, dördüncüsü 2007 yılında ve beşincisi 2014 yılında yayınlanmıştır [15]. 6.değerlendirme raporu için değerlendirme döngüsünü paylaşmış olup, 2021 yılında tamamlaması beklenmektedir [16].

Raporlar üç çalışma grubu tarafından oluşturulmaktadır. Hazırlanan her raporun daha geniş bir okuyucu kitlesine hitap eden Sentez Raporu hazırlanır. Bu sentez raporu, BMİDÇS'ne taraf olan ülkelerin yükümlülükleri ve sorunlarını dikkate alarak, üç çalışma grubunun raporlarının birleştirilmesini ve politikacıların kullanımına yönelik bir bütünü içerir [15].

1. Çalışma grubu: İklim sistemi, iklim değişikliğinin fiziksel bilim temeli ve nedenlerini içeren raporu,
2. Çalışma grubu: İklim değişikliğinin bilimsel, teknik, çevresel, ekonomik ve sosyal yönlerini, iklim değişikliği duyarlılığını, iklim değişikliğinin; ekolojik sistemler, sosyoekonomik sektörler, ve insan sağlığı üzerindeki olumlu ve olumsuz etkilerini, bölgesel ve sektörler arası konuları içeren raporu,
3. Çalışma grubu: İklim değişikliğiyle savaşın (doğrudan veya dolaylı insan kaynaklı) sera gazı emisyonlarının azaltılmasının, iklim değişikliği etkilerini en aza indirmenin, bilimsel, teknik, çevresel, ekonomik ve sosyal yönlerini ve çok disiplinli bir bilimsel ekip aracılığıyla kesişen konulara ilişkin yöntemsel yaklaşımları önemsemek, bilimsel ve teknik açıdan incelemek ve değerlendirmeyi içeren raporu oluşturmaktadır.

BMİDÇS Sekreteryası, sözleşmeye taraf olan Ek-1 üye ülkeler için IPCC'nin 2006 rehberini kullanmasına karar vermiştir. IPCC kılavuzunun tez kapsamında kullanılmasının sebebi ortak kılavuz niteliğini taşımasındandır. Kılavuz 5 ciltten oluşmaktadır. 1.cilt: genel kılavuz ve raporlama, 2.cilt: enerji, 3.cilt: endüstriyel prosesler ve ürün kullanımı, 4.cilt: tarım, ormancılık ve diğer arazi kullanımı, 5.cilt: atıkları kapsayan emisyon hesaplamaları hakkında bilgileri içermektedir. Tez kapsamında 2., 3. ve 5.ciltler kullanılmıştır.

Çimento Sürdürülebilirlik Girişimi, CSI (Cement Sustainability Initiative)

Çimento Sürdürülebilirlik Girişimi; Sürdürülebilir gelişme arayışının güçlü bir iş durumu olduğuna inanan 100'den fazla ülkede faaliyet gösteren 24 büyük çimento üreticisi tarafından oluşturulmuş küresel bir çalışmadır. Toplamda bu şirketler Dünya çimento

üretiminin yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır ve çok uluslu şirketlerden yerel şirketlere kadar geniş bir yelpazeye sahiptir. Girişimin amacı; çimento endüstrisi için sürdürülebilir gelişmenin ne olduğunu araştırmak, çimento şirketlerinin alabilecekleri aksiyonları tanımlamak ve adımları kolaylaştırmak ve sürdürülebilir gelişime yönelik ilerlemeyi hızlandırmaktır. CSI bugüne kadar tek bir sanayi sektörünün üstlendiği en büyük küresel sürdürülebilirlik programlarından biridir [17].

CSI'ye üye ülkeler 3 kategoridedir [18].

- Ana üyeler: Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi'ne (WBCSD) üyelerdir. CSI'yi yöneten ve tüzüğünü hazırlayanlardır. Yeni üyeleri de davet ederler.
- Katılımcı üyeler: WBCSD'ye üye olan veya olmayan çimento şirketleridir. CSI tüzüğünü kabul ederler, tesisler için tanımlanmış iyi uygulamaları yerine getirirler. CSI'yi tanıma süreleri 2 yıldır, daha sonra ana üye olabilirler.
- Aday üyeler: Şirketlerin, bazı temel taahhütleri öğrenmeleri için geniş fırsatların sunulduğu ve daha düşük bir ücret ödeyeceği katılım seviyesidir.

CSI' in 2011 yılında yayınlamış olduğu “CO₂ and energy accounting and reporting standard for cement industry” standart ile emisyonların hesaplanması için uyumlaştırılmış bir yöntem sağlayarak, CO₂ emisyonlarını şeffaf bir biçimde raporlanmasını amaçlamaktadır. Çimento üretim prosesiyle ilgili bütün direk ve indirek CO₂ emisyon kaynaklarına değinerek, hesaplama yöntemi sunmaktadır [19].

2.3. Sera Gazı Hesaplama Yöntemleri

Sera gazı hesaplama için sektörler için farklı farklı yöntemler geliştirilmiştir. Ancak uluslararası geçerli olan ve yıllık olarak BMİDÇS'ne taraf olan ülkeler için ortak olması açısından “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories” kullanılmaktadır. Taraf ülkeler her yılın Nisan ayı içerisinde Ulusal Sera Gazı Emisyonlarını, kılavuzda verilen yöntemleri kullanarak sunmaktadır. Tez çalışması kapsamında da IPCC kılavuzları kullanılacaktır. Bunun yanı sıra çimento sektörü için CSI tarafından oluşturulmuş olan, CSI Excelsheet kullanılacaktır.

2.4. Türkiye’de ki Mevcut Sera Gazı Emisyon Durumu

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) 1992 de iklim değişikliği konularını koordine etmek için yayınlanan uluslararası bir antlaşmadır. Nihai hedefi; atmosferik sera gazı konsantrasyonlarını, iklim sistemine tehlikeli boyuttaki müdahaleleri engelleyecek seviyede sabit tutmaktır. Türkiye, BMİDÇS’ni ve Kyoto Protokolü’nü sırasıyla 2004 ve 2009 yıllarında onaylamıştır. BMİDÇS, amacına ulaşmak ve hükümlerini uygulamak için çeşitli yol gösterici ve taahhütler koymaktadır. Özellikle sözleşmenin 4. ve 12. Maddeleri gereği tüm taraflar; insan kaynaklı ve Montreal Sözleşmesi ile kontrol altına alınamayan tüm sera gazı emisyonlarını kapsayan Ulusal Envanterlerini geliştirmek, periyodik olarak güncellemek, yayınlamak ve taraflar konferansında (COP: Conference of Parties) hazır bulundurmak ile yükümlüdürler. Türkiye’de, sözleşmenin EK-1’inde yer alan tarafların BMİDÇS’ nin raporlama kurallarına uyarak, her yıl 15 Nisan’a kadar Ulusal Envanterini hazırlayıp sunmaktadır. Yıllık hazırlanan envanterler Ulusal Envanter Raporu (NIR) ve Ortak Raporlama Formatı (CRF) tablolarından oluşmaktadır [20]. Hesaplamalar için de IPCC 2006 kılavuzlarından yararlanılmaktadır.

Türkiye’nin sera gazı emisyonu durumu hakkında bilgiler, BMİDÇS için hazırlanmış olan Ulusal Envanter raporundan alınmıştır. Nisan 2018 yılında yayınlanmış olan rapor 1990 - 2016 yılları arasını kapsadığı için, en son bilgiler 2016’e aittir.

2.4.1. Toplam Sera Gazı Emisyon Durumu

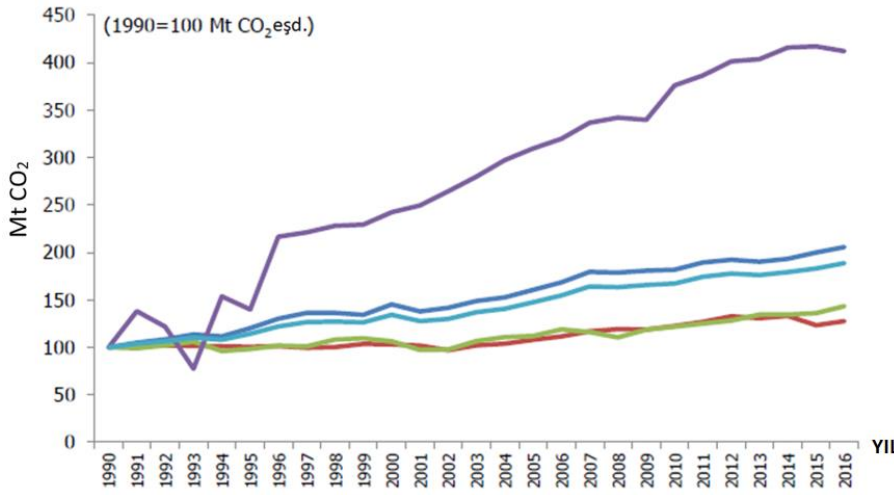
Türkiye’nin 2016 yılı toplam sera gazı emisyonu karbondioksit eşdeğeri (CO₂-eşd.) cinsinden AKAKDO hariç 496,10 milyon ton (Mt) olarak hesaplanmıştır. Mevcut durumdaki emisyon miktarı 2015 ve 1990 ile kıyaslandığında sırasıyla 26,1 Mt (% 5,6) ve 286,6 Mt (% 135,4) artmıştır. 1990 ile 2016 arasındaki yıllara göre artış oranları ve miktarları özet olarak Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Türkiye’nin sera gazı emisyonlarına AKAKDO dahil edilerek hesaplandığında, 2016 yılı toplamı 428 Mt (CO₂-eşd). AKAKDO dahil edilen toplam sera gazı emisyonları 2015 yılı ile kıyaslandığında % 5,3 oranında artış göstermiştir.

Çizelge 2.2: Sera gazı emisyonları (AKAKDO hariç) 1990 - 2016

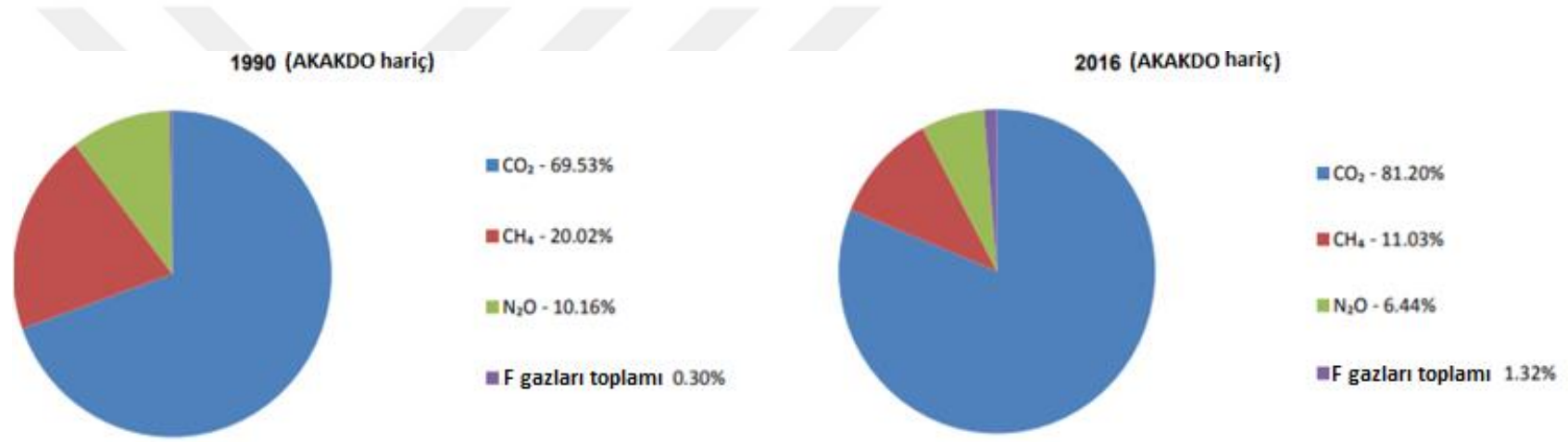
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016
Toplam (Mt CO₂ eşd.)	210,7	242,2	293,5	332,7	402,6	469,9	496,1
1990 yılı karşılaştırma (%)	-	14,9	39,3	57,9	91,0	123,0	135,4

Sera gazı emisyonlarının 1990 yılı 2016 yıllarının yüzdelik dilimlerine bakıldığında en büyük payı CO₂ emisyonları oluşturmaktadır. 1990 yılında toplam emisyonların % 69,5'sini oluştururken, 2016 yılında %81,2'sini CO₂ oluşturmuştur. 2016 yılında en yüksek emisyonlarda ikinci sırada %11,0 ile CH₄ gelirken, geri kalan kısmında N₂O'nun katkısı %6,4 ve F-gazlarının payı ise %1,3'tür. Tüm sera gazlarının 1990 – 2016 emisyon trendleri Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, tüm sera gazları artış eğilimindedir. En yüksek artış F gazlarında meydana gelirken, CH₄ emisyonlarında azalma olduğu ve CO₂ emisyonlarının toplam emisyonu paralel bir artış yapmakta olduğu gözlemlenmektedir.

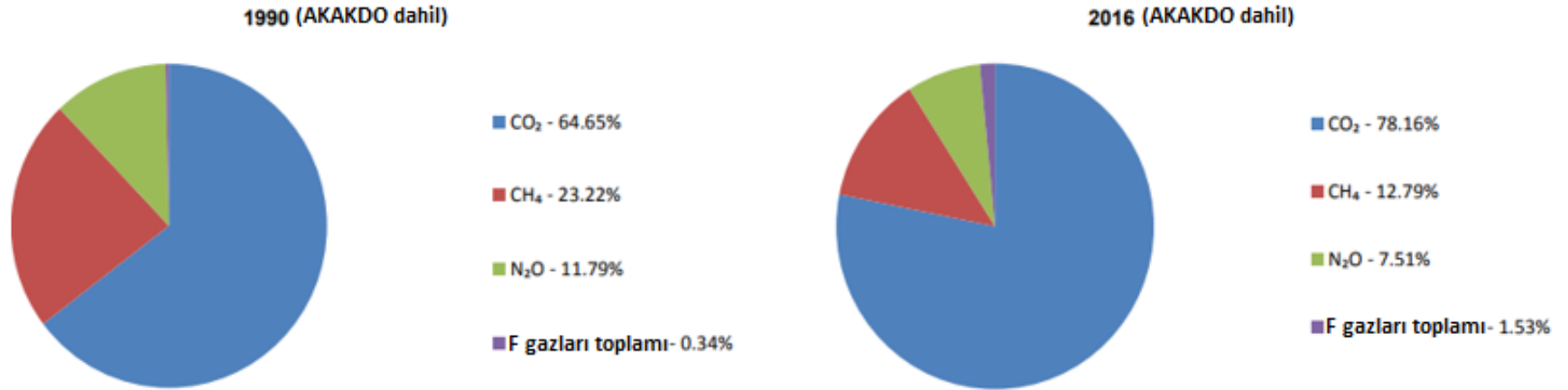


Şekil 2.5: Tüm sera gazlarının 1990 – 2016 emisyon trendleri [20]

Sera gazlarının emisyonları baz alınan 1990 yılına göre, hepsinde artış olduğu gözlemlenmektedir. 2016 yılında toplam emisyondaki en büyük pay %81,2 CO₂'e aittir. CH₄ %11 ile ikinci sırada yer almaktadır. N₂O ve F gazlarının payları ise sırasıyla %6,4 ve %1,3'tür. Sera gazı türlerinin, toplam emisyondaki payları 2016 ve baz alınan 1990 yılı için karşılaştırılmalı olarak Şekil 2.6'da AKAKDO hariç, Şekil 2.7'de AKAKDO dahil olarak gösterilmiştir [21]



Şekil 2.6: 1990 – 2016 yıllarında gaz türlerinin toplam emisyonu oranları (AKAKDO hariç) [21]



Şekil 2.7: 1990 – 2016 yıllarında gaz türlerinin toplam emisyonu oranları (AKAKDO dahil) [21]

1990 ve 2016 yıllarında sera gazları içerisinde en büyük paya CO₂'nin sahip olduğu, bunun yanı sıra en yüksek artışın ise F gazlarında gerçekleşmiş olduğu hem Şekil 2.6'da hem de Şekil 2.7'de açık bir şekilde görülmektedir. CH₄ ve N₂O emisyonlarına bakıldığında ise, 2016 yılında 1990 yılına göre yüzdelik olarak azalma gözlemlenmektedir.

2016 yılında CO₂ emisyonları 402,8 Mt ile, sera gazlarında en büyük paya sahiptir. 2015 yılına göre %5,8 oranında artış gösterirken, 1990 yılına göre artış oranı %174,9 olmuştur. CO₂' in en önemli kaynağı %86,1 ile enerji sektörüdür. Bunun sebebi ise, endüstri sektöründeki büyüme ve Türkiye popülasyonundaki artıştır. Enerji sektörünü, %13,6 ile endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı sektörü takip etmektedir. Tarım ve atık sektörünün CO₂ üzerinde önemli bir katkısı bulunmamaktadır.

CO₂'ten sonra ikinci en önemli sera gazları CH₄'dır. CH₄ emisyonları baz alınan 1990 yılına göre %29,7 artış göstermiştir. 2015 yılına kıyaslandığında ise %4,4 artmış olduğu gözlemlenmektedir. 2016 yılındaki CH₄ emisyon miktarı ise 54,72 Mt' dur. CH₄' ün en önemli kaynağı %55 ile tarım sektöründe meydana gelen enterik fermantasyonlardır. Enterik fermantasyon, hayvanların sindirimi sırasında ortaya çıkan metandır. Geri kalan %25,8'i katı atıkların bertarafı, %18,7'si ise enerji sektörü ve endüstriyel proseslerdir. Enerji sektöründeki emisyonları da kaçak emisyonlar oluşturmaktadır.

N₂O emisyonları 2016 yılında 32 Mt olarak kaydedilmiştir. N₂O' da en büyük pay % 77,6 ile tarımsal faaliyetlerdir. Bunu sırasıyla enerji (%12,1), atık (%6,5) ve sanayi sektörü (%3,8) takip etmektedir. N₂O emisyonları bir önceki raporlama yılı olan 2015 ve baz alınan yıl 1990 yılına göre sırayla % 7,4 ve % 49,4 artış göstermiştir.

2016 yılında 6,56 Mt CO₂ eşd. florlu gazlar (HFC, PFC, SF₆) atmosfere salınmıştır. 1990 yılına kıyasla % 950,4 artmıştır. Bu gazlar sadece sanayi sektöründen kaynaklanmaktadır. F-gazları emisyonlarının içerisinde en büyük pay HFC emisyonlarıdır. Bunun en temel sebebi ise, Türkiye'nin soğutucu ve klima sektörüne olan ihtiyacındandır.

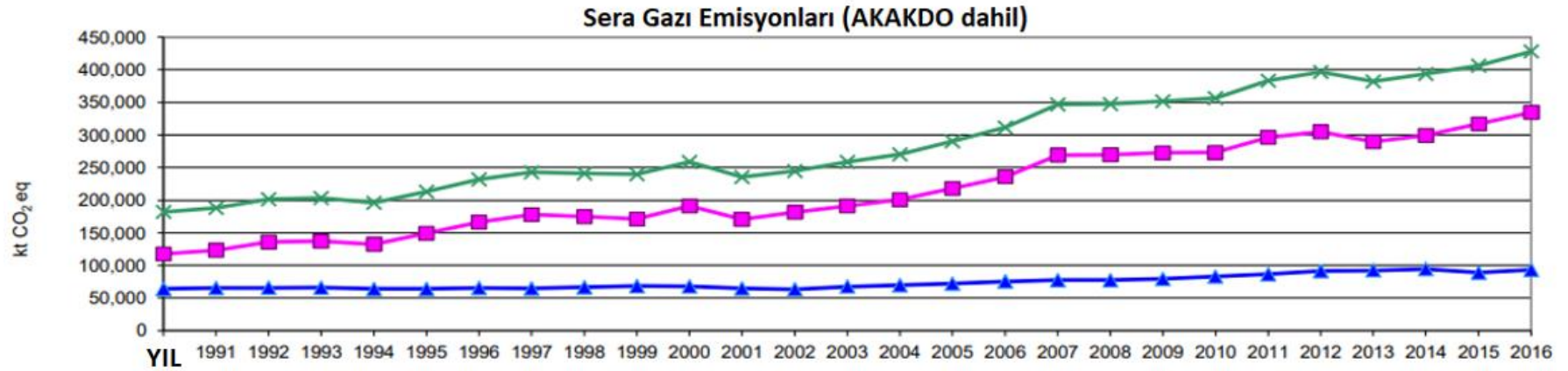
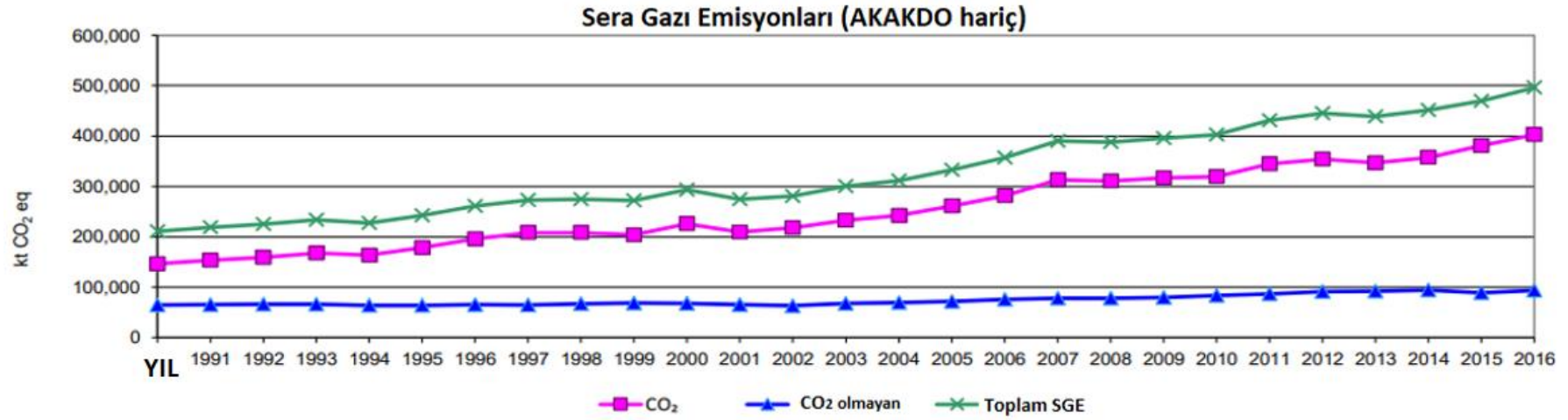
Çizelge 2.3'te gazlarının türüne göre, 1990 - 2016 yıllarındaki emisyon miktarları Mt CO₂ eşdeğeri cinsinden verilmiştir.

Çizelge 2.3: Toplam emisyonun sera gazı türlerine göre dağılımları (Mt CO₂ eşd.)

SGE (Mt CO ₂ eşd.)	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016
CO ₂ (AKAKDO dahil)	117,5	149,3	191,2	218,1	273,4	317,0	334,5
CO ₂ (AKAKDO hariç)	146,5	178,3	226,0	260,9	319,5	380,9	402,8
CH ₄ (AKAKDO dahil)	42,2	42,4	43,5	45,5	52,5	52,4	54,7
CH ₄ (AKAKDO hariç)	42,2	42,4	43,5	45,5	52,5	52,4	54,7
N ₂ O (AKAKDO dahil)	21,4	20,9	22,7	23,8	26,0	30,0	32,2
N ₂ O (AKAKDO hariç)	21,4	20,9	22,6	23,7	25,9	29,8	32,0
HFCler	NO	NO	0,12	1,15	3,05	4,81	4,72
PFClers	0,63	0,61	0,60	0,56	0,46	0,12	0,02
SF ₆	NO	NO	0,67	0,88	1,17	1,98	1,82
Toplam (AKAKDO dahil)	181,8	213,3	258,8	290,0	356,6	406,3	428,0
Toplam (AKAKDO hariç)	210,7	242,2	293,5	332,7	402,6	469,9	496,1

Türkiye'nin sera gazı emisyonları 1990-2016 yılları arasında, negatif büyüme hızının gözlemlendiği 1994, 1999, 2001, 2008 ve 2013 yılları dışında sürekli olarak artış göstermektedir. Sera gazlarının 1990 yılından 2016 yılına kadar olan trendleri Şekil 2.8'de AKAKDO hariç ve dahil olmak üzere iki ayrı grafik ile gösterilmiştir.

Toplam Sera Gazı Emisyonları (AKAKDO dahil ve hariç)



Şekil 2.8: 1990 – 2015 yılları arasındaki toplam sera gazı emisyon trendleri AKADO hariç ve dahil [21]

Toplam sera gazı emisyonları sektörel bazda incelendiğinde, en yüksek payı %72,8'i ile enerji sektörü oluşturmaktadır. Enerji sektöründeki paydanda anlaşılabacağı üzere, emisyonların başlıca kaynağı enerji üretimi ve tüketimidir. Enerji sektörünü, %12,6 ile endüstriyel işlemler takip ederken, %11,4'ü tarım ve %3,3'ü atık sektöründen kaynaklanmaktadır. 1990 yılından 2016 yılına kadar tüm sektörlerden kaynaklanan emisyonların durumu Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4: Sektörlere göre sera gazı emisyon durumu 1990 – 2015 (Mt CO₂ eşd.)

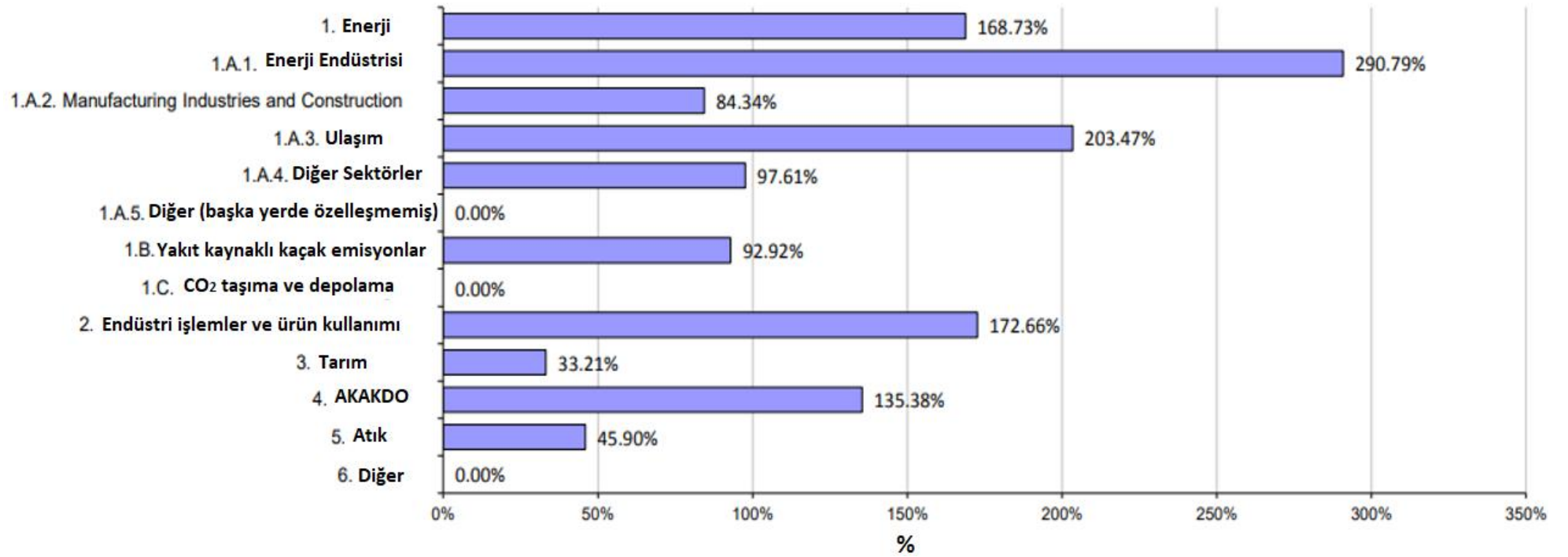
Emisyon Durumu (Mt CO ₂ eşd.)							
Yıllar	Enerji	Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı	Tarım	AKAKDO	Atık	Toplam (AKAKDO hariç)	Toplam (AKAKDO dahi)
1990	134,4	22,9	42,4	-28,9	11,1	210,7	181,1
1995	162,7	26,1	41,0	-28,9	12,4	242,2	213,3
2000	212,3	26,6	40,0	-34,7	14,5	293,5	258,8
2005	240,3	34,6	40,8	-42,7	16,9	332,7	290,0
2010	292,3	49,2	42,8	-46,0	18,2	402,6	356,6
2015	339,7	59,6	53,7	-63,7	17,0	469,9	406,3
2016	361,0	62,4	56,5	-68,1	16,2	496,1	428,0

Çizelge 2.4'te görüldüğü üzere tüm sektörlerde 1990 yılına göre artış gözlemlenmektedir. Artış oranı en yüksek olan sektör %172,7 ile endüstriyel işlemler sektörüdür. Enerji sektörü ise %169 artış ile ikinci sırada yer almaktadır. Bunların dışında; AKAKDO %135,4, atık sektörü %45,9 ve tarımsal faaliyetler %33,2'lik artış göstermiştir. Sektörel bazdaki artış yüzdeleri Şekil 2.9'da verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi tüm sektörlerdeki artışın temel sebebi popülasyonun artması, ekonomik büyüme ve enerji ihtiyacındaki artıştır. Bu nedenle, enerji sektöründeki artışın büyük bir kısmı enerji üretiminden ve ulaşımdan kaynaklanmaktadır.

Emisyon durumunu sektörler göre aşağıda Enerji, Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı (sanayi sektörü), tarımsal faaliyetler ve atık başlıkları olarak teker teker incelenmiştir.



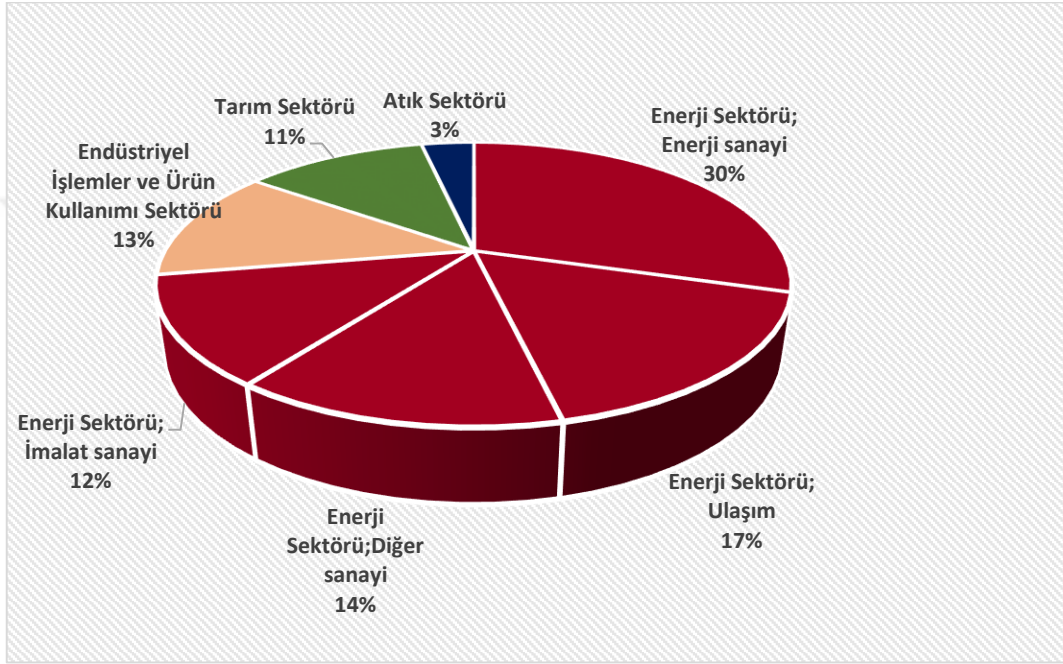
1990'dan 2016'ya sera gazı emisyonlarındaki değişimler



Şekil 2.9: 2016 yılı sektörel emisyonların 1990 yılına göre artış oranları (%) [21]

2.4.2. Sektörel Bazlı Emisyon Durumu

2016 yılı emisyonları sektörel bazlı incelendiğinde tüm sektörlerin, baz alınan 1990 yılına göre arttığı gözlemlenmektedir. Bu artışın ana sebebi; nüfusun artması, ekonomik gelişme ve enerji talebindeki yükseliştir. Enerji sektörü emisyonlar içerisinde en yüksek paya sahiptir. Enerji sektöründe olan yükselişin temelini elektrik ve ısı üretimi oluşturmaktadır. 2016 yılına ait toplam sera gazı emisyonlarının sektör olarak payları (AKAKDO hariç) Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Toplam sera gazı emisyonlarının sektörel payları, 2016

2.4.2.1. Enerji Sektörü

Pekçok ülkede gözlendiği gibi Türkiye’de de enerji sistemleri, toplam sera gazı emisyonlarında en büyük payını oluşturmaktadır. 2016 yılı verilerine göre 361 Mt CO₂ eşd. ile toplam emisyonların %72,8’ ini kapsamaktadır. Enerji sektörü emisyonlarının büyük bir kısmı yakıtların yanmasından kaynaklı olup, bunun %40,1’i enerji sanayi, %22,7’si ulaşım, %16,9’u sanayi sektörü, %18,4’ü diğer sektörler (konut ve hizmetler alt sektörlerinde yakıtların yanması) ve %16,5’i üretim sanayi faaliyetleri sonucu ortaya çıkmaktadır. Enerji sektöründeki toplam emisyonların %91,1’ini CO₂ oluşturmaktadır. Geri kalan %2,8’i CH₄, %1,1 ise N₂O’dur.

Enerji sektöründen kaynaklanan toplam emisyon kaynakları ve miktarları Çizelge 2.5 kt CO₂ eşd. cinsinden verilmiştir. Çizelge 2.5’te açık bir şekilde görüldüğü üzere, yakıtların yanması

enerji sektörü emisyonlarının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Diğer yandan yakıtların yanmasındaki kaçak emisyonlarda 2016 yılında artış göstermiştir.

Çizelge 2.5: 1990 - 2016 yılı enerji sektörü emisyonlarının kaynakları ve miktarları

	kt CO2 eşd.						
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016
Toplam	134.328	162.696	212.330	240.329	292.324	339.722	360.978
Yakıt yanması	130.028	158.817	206.381	234.774	284.205	334.475	352.683
Enerji sanayi	37.004	50.567	78.014	90.613	114.023	136.335	144.610
İmalat sanayi ve İnşaat	32.381	36.431	53.669	59.019	54.435	57.309	59.691
Ulaşım	26.969	34.113	36.465	42.041	45.392	75.798	81.841
Diğer sektörler	33.673	37.706	38.233	43.101	70.355	65.033	66.540
Yakıt yanmasından kaçak emisyonlar	4.300	3.879	5.949	5.555	8.119	5.347	8.296
Katı yakıtlar	3.388	2.841	4.640	3.743	6.043	2.484	5.596
Sıvı yakıt ve doğalgaz	912	1.038	1.309	1.811	2.075	2.763	2.700
CO2 taşınması ve depolanması	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

İmalat sanayi ve inşaat sektöründe kullanılan enerjinin %54,2'sini metal olmayan minerallerin üretimi içermektedir. Tez kapsamında olan çimento sanayi de bu başlık altında yer almaktadır. Yoğun enerji kullanımını sebebi ile de ana kategori içerisinde yer almaktadır.

Ulaşım; sivil havacılık, kara yolu, demiryolu, deniz yolu ve boru hattı taşımacılığını kapsamaktadır.

2.4.2.2. Endüstriyel İşlemler ve Ürün Kullanımı

Üretim sürecinin sonucu olarak salınan endüstriyel işlemler ve ürün kullanımdan oluşan sera gazı emisyonlarıdır. Bu kategori sadece prosesten kaynaklanan emisyonlarından kapsamaktadır. Prosesin gerçekleşmesi için gerekli olan enerji için yakıt kullanımını içermez.

CO₂ emisyonuna katkıda bulunan ana kategori olarak tanımlanan endüstriyel işlemler; çimento, kireç, demir çelik üretiminin yanı sıra farklı endüstriyel faaliyetlerde karbonatların başka proseslerde kullanımınıdır. Alüminyum üretiminden kaynaklanan PFC emisyonları ve

ürün kullanımından kaynaklanan HFC emisyonları da ozon tabakasını incelten maddeler olarak ana kategori olarak değerlendirilmektedir.

Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı 2016 yılı toplam emisyonların %12,6'sı (62.422 kt CO₂ eşd.) oluşturmaktadır. Toplam emisyonların %87,5'ini (54.617 kt) CO₂ oluşturmaktadır. Diğer emisyonlar ve oranları ise; F-gazları (HFC, PFC ve SF₆) %10,5'ini (6,568 kt) ve N₂O (1.219 kt) %2 ve CH₄ %0,03 (17 kt CO₂ eşd.)'dir. CH₄ emisyon kaynakları içerisinde demir alaşımı üretimi ve demir çelik üretimi gelmektedir. F gazlarının kaynakları ise; SF₆ elektromekanik cihazların yalıtımı ve yangın söndürme gazı olarak kullanılırken, diğer F gazları soğutma ve klima cihazlarında kullanılmaktadır. Endüstriyel işlemlerden kaynaklanan emisyon miktarlarının sanayi türüne göre 1990 - 2016 yılları arasındaki değişimi Çizelge 2.6'da verilmiştir.

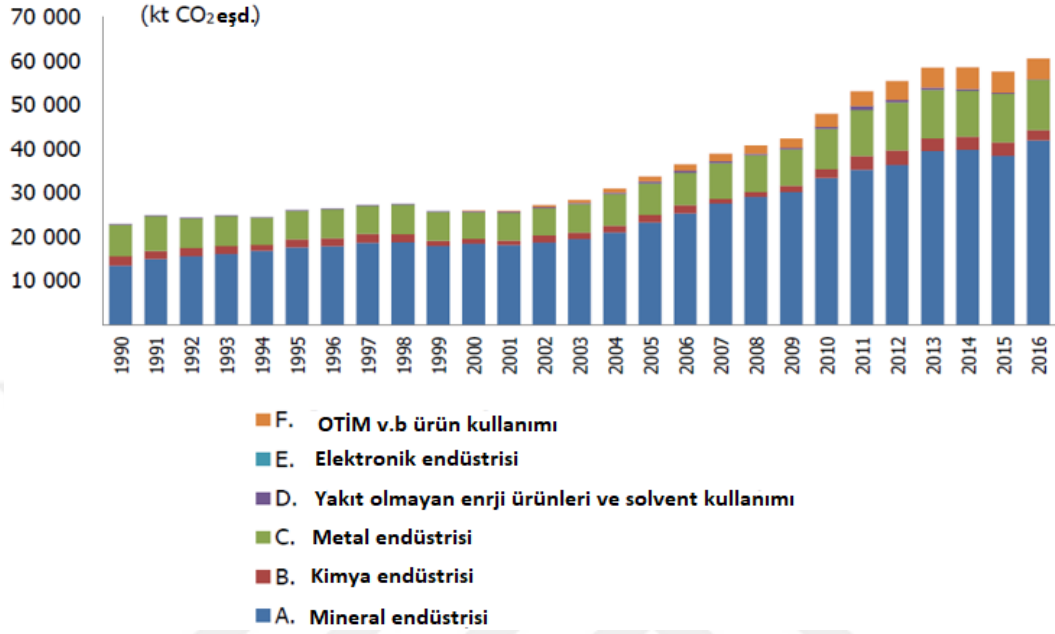
Çizelge 2.6: Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı sektörü sera gazı emisyonları (kt CO₂)

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016
	kt CO ₂ eşd.						
Toplam	22.894	26.129	26.644	34.634	49.215	59.574	62.422
A. Mineral Sanayi	13.452	17.586	18.456	23.276	33.389	38.431	41.924
B. Kimya Sanayi	2.124	1.896	1.133	1.707	1.987	3.065	2.355
C. Metal Sanayi	7.134	6.444	5.995	7.175	9.185	11.022	11.453
D. Enerji dışı yakıt ve Solvent Kullanımı	183	203	277	446	432	266	146
E. Elektronik Endüstrisi	-	-	-	-	0,14	0,14	0,14
F. OTİM yerine geçen madde kullanımı	-	-	116	1.147	3.054	4.805	4.720
G. Diğer üretim ve tüketim	-	-	667	884	1.168	1.985	1.824

Çizelge 2.6'da görüldüğü gibi mineral sanayi, sektör emisyonlarının %67,2'si oluşturarak en yüksek paya sahiptir. Metal sanayi toplam sektör emisyonlarının %18,3'ünü, OTİMLerin kullanımı %7,6 ve kimya sanayi %3,8 oranında katkı sağlamaktadır. Ayrıca enerji dışı yakıt ve solvent kullanımı 2010 yılından itibaren azalış göstermiştir.

2016 yılında endüstriyel işlemler ve ürün kullanımından kaynaklanan en önemli sera gazı emisyonları, çimento üretimi ve demir çelik üretiminden kaynaklanmaktadır. Çimento üretimi ve demir çelik üretimi ulusal sera gazı emisyonları toplamının sırasıyla %7,2'sini ve %2,2'sini oluşturmaktadır. Sektör emisyonları içerisinde en yüksek emisyonu sahip olan

çimento üretimi ve demir çelik üretiminin 2016 yılı değerleri sırasıyla 35,7 Mt CO₂ eşd. ve 11,1 Mt CO₂ eşd.'dir. 1990 yılından 2016 yılına kadar olan emisyon trendleri ve sektör kırılımları Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11: 1990 – 2016 yılları arasındaki sektörel kırılımdaki emisyon trendleri (kt CO₂ eşd.)

Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonları 2016'de; 1990 yılına göre %172,7 oranında artış göstermiştir. Uzun vadede gözlenen bu artışın mineral sanayi içerisinde yer alan çimento üretimi ve metal sanayide gerçekleşen demir çelik sektöründen kaynaklanan emisyonların artmasından kaynaklanmaktadır. Bu sektörlerdeki artış ise, endüstriyel büyüme ve inşaat malzemelerindeki talep artışı ile açıklanabilir.

2.4.2.3. Tarım

Sera gazı emisyonlarına katkı da bulunan tarımsal faaliyetler; enterik fermantasyon, gübre yönetimi, çeltik yetiştirme, tarımsal amaçlı kullanılan topraklar, tarımsal kaynaklı atıkların açıkta yakılması ve üre uygulamaları olarak sayılabilir. 2016 yılında tarım sektörü 56,5 Mt CO₂ eşd. miktarı ile toplam sera gazı emisyonlarının %11,4'ünü oluşturmaktadır. 1990 - 2016 yılları arasında tarımsal faaliyetlerden meydana gelen emisyon kaynakları ve miktarları Çizelge 2.7'de verilmiştir. 1990 - 2016 yılları arasındaki artışlara bakıldığında, diğer sektörlerde ciddi artış gözlenirken, tarımsal faaliyetlerin emisyonlarında %33,2 oranında bir artış gözlemlenmiştir.

Çizelge 2.7: Tarımsal faaliyetlerden oluşan sera gazı emisyon kaynakları ve miktarları

	kt CO2 eşd.						
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016
Toplam	42.402	40.987	40.033	40.772	42.826	53.650	56.486
Enterik fermentasyon	22.314	21.705	19.124	19.663	20.912	26.888	26.923
Gübre yönetimi	4.111	4.427	4.240	4.133	4.840	6.175	6.312
Çeltik üretimi	100	113	128	183	202	240	243
Tarım toprakları	15.085	14.000	15.598	15.894	16.020	19.375	21.561
Tarım atıklarının açıkta yakılması	332	318	325	285	207	161	151
Üre uygulaması	460	426	617	613	645	811	1.295

Çizelge 2.7’de görüldüğü %46,8 ile hayvanların enterik fermentasyon ve %38,2 ile tarım topraklarının kullanımı bu kategorideki emisyonların en önemli kaynaklarıdır. Gübre yönetimi %10,7 ile 3. sıradadır. Üre uygulamaları, tarımsal atıkların açıkta yakılması ve çeltik üretiminin emisyonlara katkısı %2,3, %0,3 ve %0,4’ dür.

2016 yılında tarımsal faaliyetlerin oluşturduğu sera gazı emisyonlarının önemli bir kısmını %53,8 ile CH₄ oluşturmaktadır. 1990 yılındaki %59 oranı ile karşılaştırıldığında CH₄ emisyonlarında ufak bir azalma olduğu anlaşılmaktadır. N₂O emisyonları ise 1990 yılında toplam tarımsal emisyonların %39,9’ unu oluştururken, 2016 yılında bu oranda hafif bir artış ile payı % 43,9’a yükselmiştir. N₂O’daki artışın nedeni gübre yönetimi ve tarımsal amaçlı toprak kullanımı ile açıklanmaktadır. CO₂ ise bu sektörde, sadece üre uygulamalarından kaynaklanan ve en küçük paya sahip emisyondur. 2016 yılındaki CO₂ payı %2,3’tür, 1990 yılındaki %1,1 pay ile kıyaslandığında küçük bir artış gözlenmiştir.

2.4.2.4. Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık (AKAKDO)

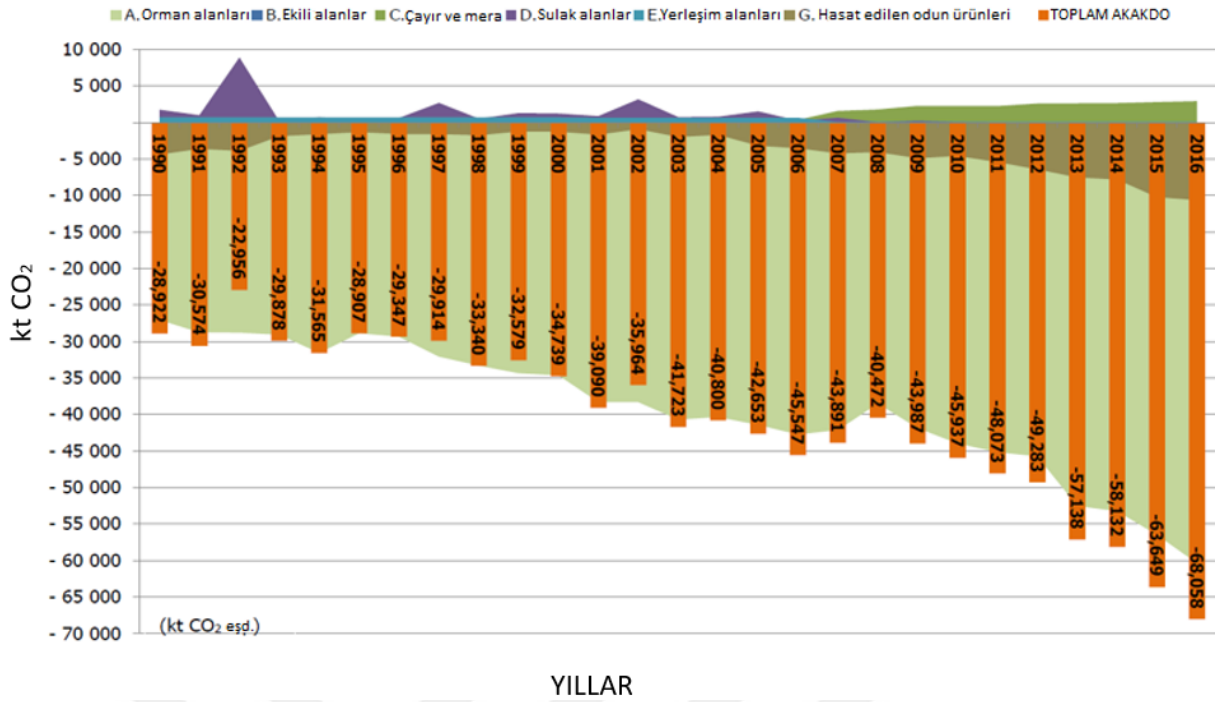
2016 yılına ait sera gazı emisyonlarına verilerine göre AKAKDO sektörü, toplam sera gazı emisyonlarında yaklaşık %14 oranında bir yutak oluşturmaktadır. 2016 yılında artış oranlarına bakıldığında; 2015 yılına göre %5,6 oranında gerçekleşirken, 1990 yılına kıyasla %134,5 olmuştur. Bu sektörde yönetilen alanlar; orman alanları, ekili alan, çayır ve mera alanları, yerleşim alanları, hasat edilen odun ürünleri ve sulak alanlardır. Bu alanlar ve sera gazı emisyonlarına olan katkıları Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Çizelge 2.8: AKAKDO kapsamındaki alanların emisyonlara katkısı

	kt CO ₂ eşd.						
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016
Toplam	-28.923	-28.907	-34.740	-42.653	-45.957	-63.669	-68.078
Orman alanları	-27.041	-28.872	-34.649	-41.437	-43.946	-56.489	-60.370
Ekili alanlar	-37	-6	-502	-510	194	213	-44
Çayır ve mera alanları	99	253	-248	331	2.275	2.789	2.913
Sulak alanlar	1.742	341	1.233	1.499	61	-	-
Yerleşim alanları	683	683	683	629	45	45	45
Hasat edilen odun ürünleri	-4.368	-1.306	-1.257	-3.164	-4.585	-10.227	-10.622

AKAKDO, Türkiye'nin yutak alanları göstermektedir. Bu alanlar zaman içerisinde artış göstermektedir. Bu giderim miktarının artmasındaki en önemli etmenleri; sürdürülebilir orman yönetimi, ağaçlandırma, bozulmuş olan orman alanlarının rehabilitasyonu, orman alanlarının yeniden ağaçlandırılması, orman yangınlarının etkili yönetimi ve koruma faaliyetleridir. Ormanlar karbon birikiminin olduğu tek sektördür. 2016 yılında AKAKDO'ya bağlı olarak tutulan net sera gazı emisyon miktarı 68.078 kt CO₂ eşd. ile toplam emisyonların %14,34'ünü oluşturmaktadır. Ormansızlaştırma, biyokütle ve kuraklığa bağlı yangınlar, yerleşim alanlarının artması yutak olanlarının azalmasındaki, dolayısıyla giderim miktarının azalmasındaki en önemli etkenlerdir.

1990 - 2016 yılları arasında arazi kullanımlarına bağlı emisyon giderim trendleri kt CO₂ eşd. cinsinden Şekil 2.12'te verilmiştir. Şekil 2.12'de görüldüğü üzere ekili alanlar 1990 - 2016 periyodunda azalış eğilimindedir. Buna karşı orman alanlarında sürekli bir artış gözlemlenmektedir.



Şekil 2.12: AKAKDO' a bağlı emisyon giderim trendleri 1990 - 2016 (kt CO₂ eşd.)

2.4.2.5. Atık

Atık sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonları; atıkların arıtılması ve bertaraf edilmesi, atıkların açık yakılması, atıksuların arıtılması ve deşarj edilmesidir. Atıkların yakılması emisyon envanterinde yer almaktadır, ancak enerji sektörünün altında yer almaktadır.

Atık sektörü 2016 yılı toplam emisyonlarının (AKAKDO hariç) %3,3'ünü oluşturmaktadır. 2016 yılında 16,1 Mt olarak gerçekleşen emisyon miktarı 2015 yılı ile karşılaştırıldığında %4,7 azalmıştır. Bu başlıkta incelenen sera gazı emisyon kaynakları ve emisyon katkısı 1990 - 2016 yılları için Çizelge 2.9'da verilmiştir.

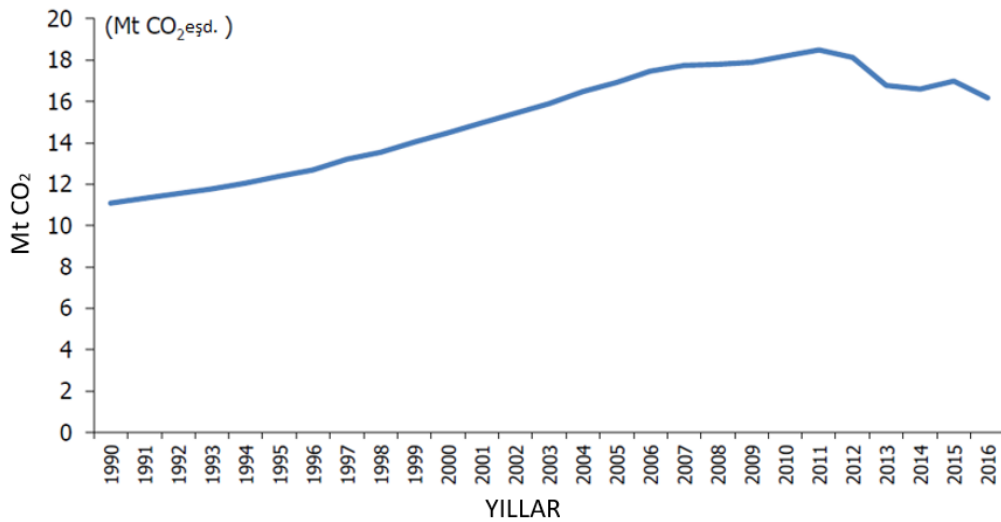
Çizelge 2.9: Atık emisyon kaynakları ve emisyon katkısı 1990 - 2016 (kt CO₂ eşd.)

	kt CO ₂ eşd.						
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016
Toplam	11.091	12.382	14.487	16.919	18.198	16.984	16.181
Katı atık depolama	6.730	7.652	9.712	12.086	13.359	12.557	11.681
Katı atık biyolojik arıtımı	19	16	23	28	23	16	15
Atık yakma ve atıkların açıkta yakılması	105	103	88	43	32	2	3
Atıksu arıtımı ve desarjı	4.236	4.611	4.663	4.762	4.785	4.409	4.481

Atık sektör emisyonlarının; %72,2'si katı atıkların depolanması, %27,7'si atık suların arıtılması ve deşarjı, %0,1'i katı atıkların biyolojik arıtımı ve %0,02'si de atıkların açıkta yakılmasından kaynaklanmaktadır.

Katı atıkların depolanmasından CH₄, katı atıkların biyolojik arıtımından CH₄ ve N₂O, atıkların açıkta yakılmasından CO₂, CH₄ ve N₂O, atık suların arıtılması ve deşarj edilmesinden ise CH₄ ve N₂O gazları yayılmaktadır. Sektörden kaynaklanan gazlar göz önüne alındığında en önemlisi %87,2 ile CH₄ emisyonlarıdır. CH₄ emisyonları 1990'dan 2016'ya %47,1 oranında artış göstermiştir. N₂O emisyonları 2016 yılında sektör emisyonlarının %12,8'ini oluştururken, 1990 yılından günümüze %41 artmıştır. CO₂ ise; 1990 yılında %12,8 iken, 2016 yılında %0,007'ye düşmüştür.

Atık emisyonları 1990 yılına göre 2016 yılında %45,9 oranında artmıştır. Şekil 2.13'de atık sektörü emisyonlarının zamana bağlı değişimi (Mt CO₂ eşd.) gösterilmiştir.



Şekil 2.13: Atık emisyonlarının 1990 - 2016 yılı arasındaki değişimi (Mt CO₂ eşd.)

Atık emisyonlarında 1990 yılından 2016 yılına kademeli bir artış gözlenmektedir. Katı atık bertarafının sabit bir şekilde yükselmesi, bu artışın önemli etmenlerindendir.

2.5. Çimento Sanayi

Çimento doğal kalker taşları ile kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi sonucu oluşan hidrolik bir bağlayıcı malzemedir. Hidrolik bağlayıcı maddeler, su ile reaksiyonu sonucu sert bir kütle oluşturduktan sonra su içerisinde dağılmayan, sertliğini ve mukavemetini koruyan ya da artıran bağlayıcı maddelerdir. İnsanlık tarihi boyunca kullanılan en önemli yapı malzemelerinden biri olan çimentonun pek çok çeşidi bulunmaktadır [22].

Dünya'daki ilk çimento fabrikası, 1848'de İngiltere'de kurulmuş ve 1860 yılında ilk Alman Çimento Standardı yapılmıştır [23]. Türkiye'de ise 1911 yılında 20.000 ton/yıl kapasiteli fırın ile Darıca'da üretime başlamış olan fabrika 1923 yılında tevsi edilerek kapasitesi 40.000 ton/yıl olarak artırılmıştır. 1950'li yıllara kadar Ankara, Zeytinburnu (İstanbul), Kartal (İstanbul) ve Sivas'ta toplam kapasite 370.000 ton/yıl'a varan 4 yeni fabrika kurulmuştur. Üretim artışı, 1950'den sonra Türkiye Çimento Sanayisi T.A.Ş.'nin (ÇİSAN) kurulmasıyla sağlanmıştır. Fakat 1970'lere kadar talep karşılamada yetersiz olduğu için çimento ithalatına devam edilmiştir [24].

Mevcut durumda çimento sektörü, hammaddenin tamamını kendi kaynaklarından kullanarak, ülke ihtiyacını karşılayabilecek üretim kapasitesine sahiptir. İthalat payı az olan Türk çimento sektörü Dünya' da 90 ülkeye satış yapmaktadır. İhracattaki en önemli payı ABD, İsrail ve Suriye oluşturmaktadır. Türkiye, ihracattaki önemli rolü ile dünyanın beşinci en büyük ihracatçısı olmuştur [24].

2.5.1. Dünya ve Türkiye'de ki Önemi

Gelişmekte olan ülkelerde ki talep artışının etkisiyle küresel çimento üretimi 2017 yılında 4,65 milyar ton olmuştur. 2016 yılında toplam üretim 4,6 milyar ton iken 2017 yılında %1,1 civarında bir artış gözlenmiştir [25]. 2017 yılında dünya genelinde çimento tüketimi ise 4,1 Mt olarak gerçekleşmiştir. Toplam 72 tesisi ile faaliyet gösteren Türk çimento sektörü 70 milyon ton üzerindeki üretim hacmi ile Çin, Hindistan, ABD ve Brezilya'dan sonra küresel üretim sıralamasında dördüncü sırada yer alırken, Avrupa'nın en büyük üreticisi konumundadır [24].

Çimento, inşaat sektörünün temel girdilerinden biri olmasından dolayı, hem dünyada hem Türkiye' de büyük önem arz etmektedir. Çimento sektörünün ana tüketim alanları konut ve altyapı yatırımlarıdır [26]. Ülkemizde yapılan alt yapı projeleri, havaalanı ve boğaz köprüsü inşaatları, hızlı nüfus artışından dolayı konut ihtiyacının artması gibi sebeplerden dolayı çimentoya olan talepte de artış olmaktadır. Çimento üretiminin Türkiye ve Dünyadaki durumu ayrı ayrı incelenmiştir.

Dünyadaki Durumu

Dünya çimento üretimi 2017 yılında %1,1 oranında artış göstermiş ve 4,65 milyon tona ulaşmıştır. 2016 yılında %3,3 olan artış oranına göre bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. Dünya'nın en büyük çimento üreticisi olan Çin 2017 yılında da toplam çimento üretiminin %52'si (2.400 Mt) tek başına gerçekleştirirken, 2016 yılına göre üretim miktarı en yüksek

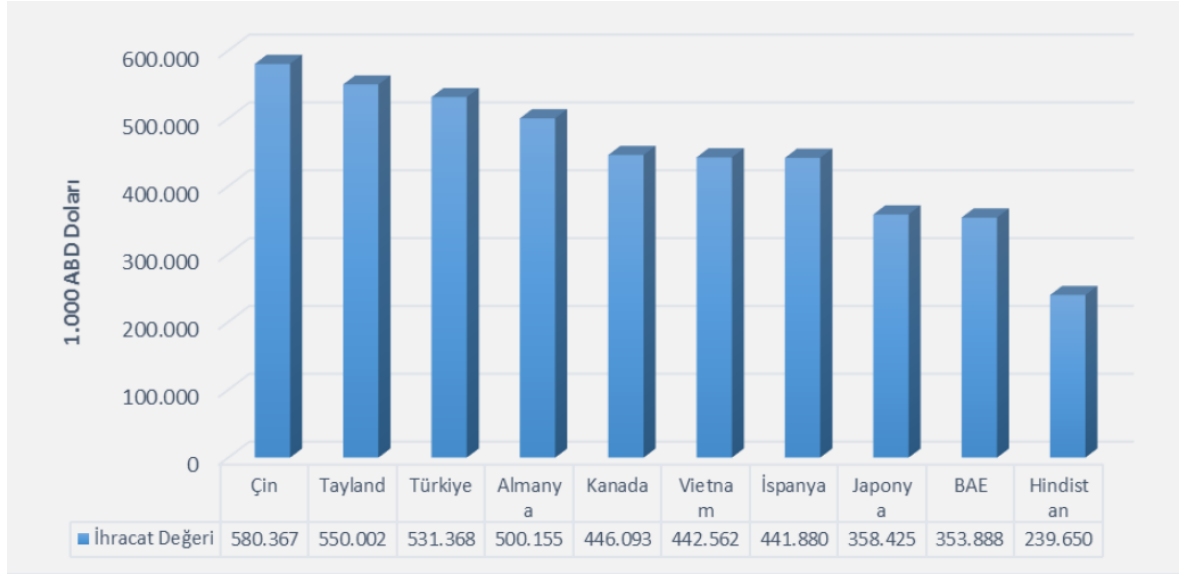
olan ülke olarak kalmaya devam etmiştir. Çin'i 290 Mt çimento üretimi ile Hindistan takip etmektedir. 2017 yılı dünya çimento üretiminde 3. sırayı ABD, Türkiye 4. Sırada yer almaktadır [25]. Dünya genelinde bölgelere göre çimento üretimi Çizelge 2.10'da verilmiştir. Çizelge 2.10'da görüldüğü üzere 2010 yılından günümüze kadar çimento üretiminde Çin hep birinci sırada yer alırken, Hindistan da ikinci sıradaki konumunu korumuştur. Çin ve Hindistan 2010 yılından 2016 yılına çimento üretimlerinde sırasıyla %28 ve %32'lik artış gerçekleştirirken, İtalya ve Fransa' da sırasıyla %44 ve %12'lik azalış meydana gelmiştir. Türkiye ise, 2014 yılındaki düşüş dışında sürekli artış eğiliminde üretim gerçekleştirmiş ve üretim miktarını 2010 yılından 2016 yılına %20 arttırmıştır.

Çimento tüketimi dünya genelinde 2017 yılında son üç yıla benzerlik göstermiş ve yaklaşık 4,1 Mt olarak gerçekleşmiştir [24]. Çimento üretiminde başı çeken Çin, tüketimde de en ön sırada yer almaktadır. Çin'de ki büyümenin yavaşlaması sonucu çimento satışları gerilemiş ve bu da 2017 yılında çimento tüketiminin aynı kalmasındaki en önemli etken olmuştur. Çimento tüketiminin yoğun olduğu yerler ise; gelişmekte olan ve nüfus artışının hızlı olduğu ülkelerdir. Sahra altı Afrika ülkeleri ve Kuzey Amerika çimento tüketimi artan ülkelerdendir [27].

Çizelge 2.10: Dünya genelinde bölgelere göre çimento üretimi (Mt) [25].

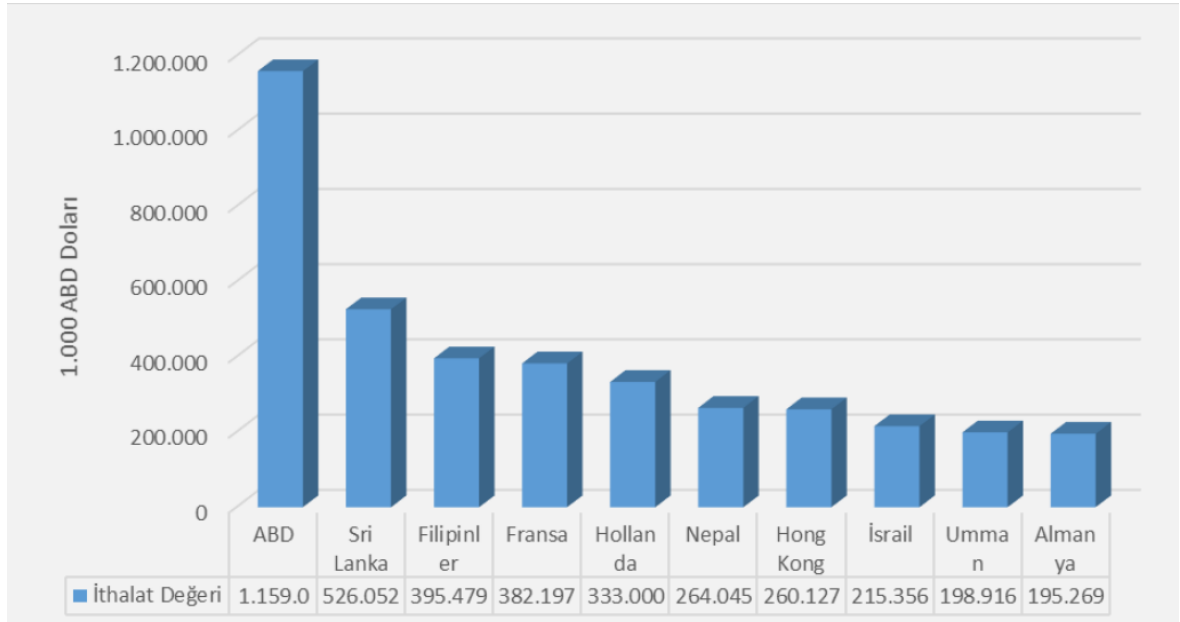
ÜLKELER	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Çin	1.881,9	2.063,2	2.137,0	2.420,0	2.480,0	2.350,0	2.410,0
Hindistan	220,0	240,0	270,0	280,0	260,0	270,0	290,0
AB Ülkeleri	192,1	191,6	172,6	166,6	166,8	167,2	169,1
ABD	65,2	68,6	74,9	77,4	83,2	83,4	85,9
Türkiye	62,7	63,4	63,9	72,7	71,2	71,4	75,4
Endonezya	39,5	45,2	32,0	56,0	65,0	65,0	63,0
Suudi Arabistan	42,5	48,0	50,0	57,0	55,0	55,0	61,0
Brezilya	59,1	63,0	68,8	70,0	72,0	72,0	60,0
Rusya	50,4	56,1	53,0	72,0	68,4	69,0	56,0
Japonya	56,6	56,4	51,3	57,4	53,8	55,0	56,0
Güney Kore	47,4	48,2	48,0	47,3	63,2	63,0	55,0
Meksika	34,5	35,4	35,4	34,6	35,0	39,8	40,8
Almanya	29,9	33,5	32,4	31,5	32,1	31,1	32,7
İtalya	34,4	33,1	26,2	23,1	21,4	20,8	19,3
Fransa	18,0	19,4	18,0	17,5	16,4	15,6	15,9

2017 yılı çimento ihracat payı en yüksek olan ülkeler arasında Çin, Tayland ve Türkiye yer almaktadır. İhracat yapan ülkeler Şekil 2.14'te gösterilmiştir [24]. Şekilde açık bir şekilde görüldüğü üzere Türkiye ihracat payı en fazla olan üçüncü ülke konumundadır.



Şekil 2.14: 2017 yılında en çok çimento ihracatı yapan ülkeler [24]

2017 yılı verilerine göre çimento ithalatı yapan ülkelere bakacak olursak, Şekil 2.15'e bakıldığında, en çok çimento ithal eden ülke ABD olmuştur. ABD'yi Srilanka ve Filipinler takip etmektedir.



Şekil 2.15: 2017 yılında en çok çimento ithalatı yapan ülkeler [24]

Türkiye’de Durum:

Çimento sektörü, katma değer yaratması ve istihdam sağlaması açısından en eski sanayi dallarından biri olması sebebiyle, sanayimizin en önemli yapıtaşlarından biridir [28].

Günümüzde hammaddeyi tamamen kendi yerli kaynaklarından kullanan sektör, ülkemizin taleplerini karşılamaktadır. Kentsel dönüşüm ve altyapı projelerinin yoğunlaşması hem inşaat hem de çimento sektörünün büyümesinde önemli rol oynamaktadır [29].

2017 yılı itibarı ile ülkemizde 54 entegre tesis, 18 öğütme tesisi olmak üzere toplamda 72 adet çimento üretim tesisi bulunmaktadır. Türkiye’deki çimento tesisleri Şekil 2.16’de gösterilmiştir [30].



Şekil 2.16: Türkiye’deki çimento tesisleri [30]

Klinker, kireç taşı ve alçının öğütülmesi ile elde edilen çimento üretiminin ara maddesidir. Entegre tesislerde klinkerin mineral katkıları ile öğütülerek çimento üretildiği yerlerdir. Ülkemizde sadece öğütme tesisleri de bulunmaktadır. Bu sayede klinker, ilgili yerde bulunan öğütme tesisinde çimentoya dönüştürülmektedir. Çimento sektörüne esneklik kazandıran bu yöntem ile düşük maliyetlerle çimento üretim kapasitesinin artmasına olanak sağlamaktadır [31].

Çimento ve klinker üretim kapasiteleri açısından değerlendirildiğinde ülkemiz 2017 yılında çimento üretim kapasitesi yaklaşık 135,6 Mt, klinker üretim kapasitesini ise 83,6 Mt'a çıkarmıştır [32]. Çimento sadece karayolu ile taşınabildiği ve nakliye maliyetlerinin yüksek olması sebebi ile hammadde ve yerleşim bölgelerine yakın noktalarda yoğunlaşmaktadır [31]. Ülkemizdeki çimento tesislerinin klinker ve çimento üretim kapasiteleri ve kapasite kullanım oranları bölgesel olarak Çizelge 2.11'de verilmiştir. Tabloda yer alan kapasiteler tüm tesisler için geçerli iken, kapasite kullanım oranları TMÇB üyesi olan tesisler için geçerlidir [32]

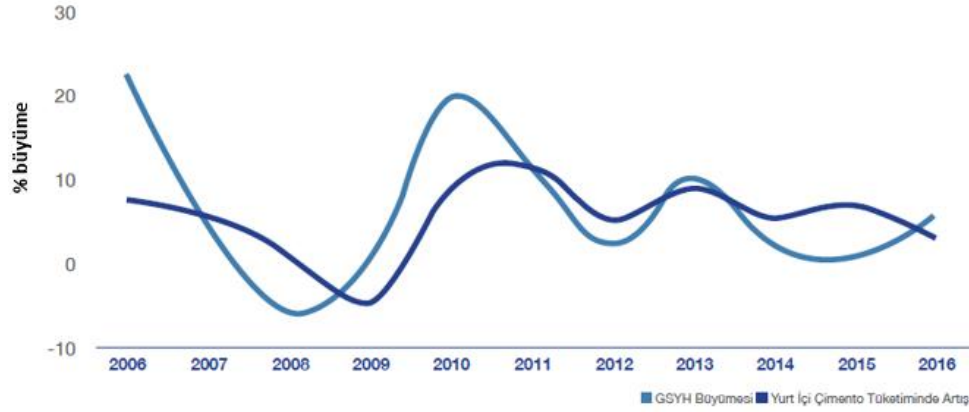
Çizelge 2.11: Bölgelere göre 2016 yılı çimento tesislerinin kapasite ve kapasite kullanım oranları

2017	Kapasite Miktarları (Mt)		Kapasite Kullanım Oranları (%)	
BÖLGELER	Klinker	Çimento	Klinker	Çimento
Marmara	20,0	29,1	100,34	75,87
Ege	5,8	10,0	81,74	60,66
Akdeniz	22,2	35,2	86,79	54,34
Karadeniz	8,8	17,1	96,63	61,88
İç Anadolu	13.923,4	21,2	92,31	65,71
Doğu Anadolu	6,6	11,7	74,63	55,35
G. Doğu Anadolu	6,3	11,2	82,78	54,31
TOPLAM	83,6	135,6	90,10	62,16

Çimento üretimi konusunda Türkiye Avrupa'da lider konumda iken, Dünya'da Çin, Hindistan, ABD ve Brezilya'dan sonra dördüncü sırada yer almaktadır. 2017 yılı verilerine göre Türkiye yaklaşık 82,8 milyon ton çimento üretimi yapmıştır. 2016 yılına kıyasla %7,7 artış gözlemlenmiştir. 2017 yılı çimento tüketimi 2016 yılına göre %9,8 artarak 74,9 Mt olmuştur [25]. Türkiye çimento talebinde ilk sırada özel konut inşaatları yer almaktadır. Bunun yanı sıra kentsel dönüşüm projeleri, alt yapı inşa faaliyetleri son yıllarda talebin artmasına sebep olmuştur. İleri ki dönemler için planlanmakta olan Çanakkale Köprüsü, Üçüncü Havalimanı ve nükleer santraller gibi büyük projelerin de çimento sektörünü canlı tutacağı düşünülmektedir [24].

Çimento üretimi GSYH ile doğrudan ilişkilidir. Şekil 2.17'de de görüldüğü gibi, ekonominin arttığı dönemlerde çimento tüketiminde de artış gözlenirken azaldığı dönemlerde ise tüketimin azaldığı gözlemlenmiştir [33]. GSYH ilişkili olmasının en temel sebebi, sektörde

en önemli girdiler olan yakıt, enerji ve hammadde olması ve bu girdilerin maliyetlerinin üretimi ve tüketimi doğrudan etkilemesindendir.



Şekil 2.17: GSYH ile çimento tüketimi ilişkisi

Türkiye 2017 yılı sonu ile 7,9 Mt çimento ve 4,9 Mt klinker ihraç etmiştir. Çimento ihracatını önceki yıla kıyasla %3,9 artırırken, klinker ihracatında %29 gibi yüksek bir oranda arttırmıştır. En çok çimento ihraç ettiğimiz ülkelerin başında ise Amerika ve Suriye gelirken, en çok klinker ihraç edilen ülkeler de ise başı Gana ve Kolombiya çekmektedir.

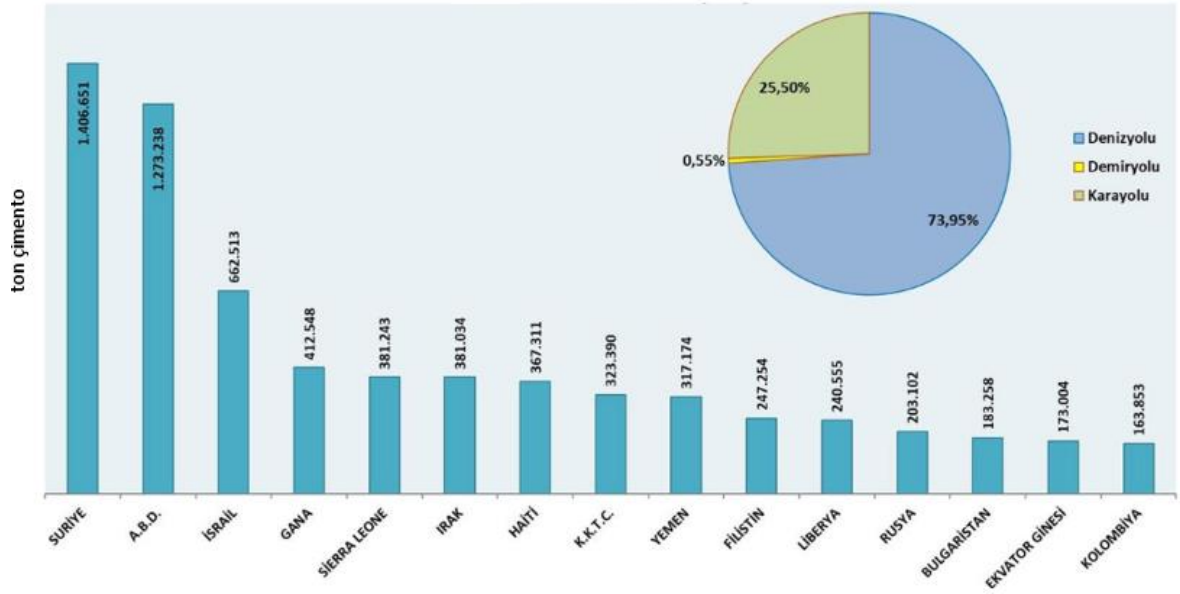
2017 yılı ihracat yapılan ilk 10 ülke ve ihraç edilen çimento ve klinker miktarları (ton) Çizelge 2.12’de sıralanmıştır.

Çizelge 2.12: 2017 yılı çimento ve klinker ihracatı (ton)

ÇİMENTO (ton)		KLİNKER (ton)	
Ülkeler	Toplam	Ülkeler	Toplam
SURİYE	1.406.651	GANA	784.242
A.B.D.	1.273.238	KOLOMBİYA	525.526
İSRAİL	662.513	FİLDİŞİ SAHİLİ	493.674
GANA	412.548	GİNE	386.832
SİERRA LEONE	381.243	SENEGAL	357.119
IRAK	381.034	A.B.D.	334.706
HAİTİ	367.311	BREZİLYA	261.879
K.K.T.C.	323.390	İSRAİL	236.306
YEMEN	317.174	K.K.T.C.	178.270
FİLİSTİN	247.254	İSPANYA	162.444

Türkiye 2017 yılında yaklaşık 100 ülkeye 7,9 Mt civarında çimento ihracatı yapmıştır. Çimento, iç pazarda tüketilmek üzere üretilen bir ürün olmasına rağmen, ülkemiz ihrac pazarları olan Ortadoğu ve Afrika'ya yakınlığı sebebiyle çimento ihracında önemli rol oynamaktadır. Toplam çimento ihracatın %18'i Suriye, %15'si ABD' ye yapılmıştır. Klinker ihracatının ise, %16'sı Gana' ya yapılırken, %11'i Kolombiya' ya yapılmıştır.

Çimento ihracatı %73,95'i deniz yolu kullanılarak yapılmaktadır. Bunun en önemli sebebi ise deniz aşırı ülkelere ihracatın fazla oluşudur. Çimento ihracatının yapıldığı ülkeler ve taşıma şekli Şekil 2.18'de verilmiştir [34]



Şekil 2.18: Ünelere göre çimento ihracatı ve taşıma şekli

Klinker ve çimento ithalatı ülkemizde çok az oranlarda yapılmaktadır. 2017 yılı verilerine göre klinker ithalatı yapılan ülkeler Yunanistan (18.200 ton) ve Bulgaristan (35.050 ton)' dır.

Ekonomik büyüme 2017 yılında %7,4 olmasına rağmen çimento sektöründe %9,8 büyüme gerçekleşmiştir. Çimento sektörü iç satışta %9,8 büyüme kaydederken, üretimde %7,7 ve ihracatta %3,9'luk artış gerçekleştirmiştir. Yurt içindeki rekabetin artması ve kapasite fazlalığının oluşması sebebiyle Türk çimento sektörü büyümeye devam etmek için alternatif pazarlara yönelmeyi hedeflemektedir. Ortadoğu ve İran da enerji maliyetlerinin düşük olmasından dolayı rekabette zorluk çeken sektör işletmecileri, Mozambik, Fildişi sahilleri ve Libya ülkelere fabrika yatırımları ile varlıklarını arttırmaktadırlar [24].

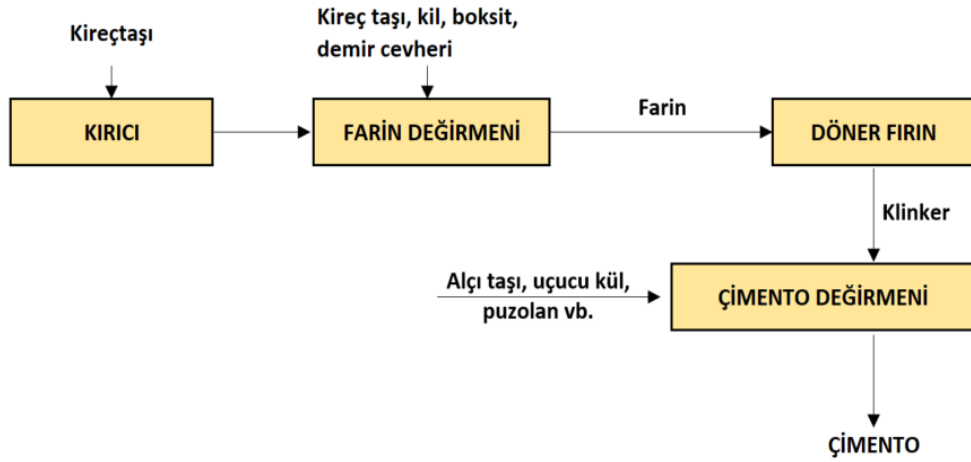
2.5.2. Çimento Üretimi

Çimento: Doğal kalker taşı ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bağlayıcı malzemedir. Hidrolik bağlayıcı maddeler, su ile tepkimesi sonucunda sert bir kütle oluşturarak; su içerisinde dağılmayan, sertliğini ve mukavemetini koruyan ya da artıran bağlayıcı maddelerdir. Çimentolar da, diğer bağlayıcı maddeler gibi, CaO, MgO v.b alkalin öğeler ve SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ v.b hidrolik öğelerden oluşmaktadır. Bağlayıcı maddenin niteliğini alkalin ve hidrolik öğelerin oranları belirlemektedir.

Çimento üretimi kapsamında kuru üretim prosesine yer verilmiştir. Basitleştirilmiş çimento üretim akışı Şekil 2.19’da verilmiştir. Kalker, kil ve marn hammadde olarak ocak bölgesinden taşınarak, tozsuzlaştırma ünitesi ile donatılmış çeneli kırıcılara beslenir. Kırılan hammaddeler çeşitlerine göre stoklanırken, transfer noktalarında bulunan torbalı filtreler ile tozlar geri kazanılır. Hammaddeler değirmende öğütülerek **farin** haline getirilir. Farin; çimento hammaddelerinin orantılanmış, ana bileşenleri kireç ve silis olan karışımdır. Kirecin kaynağı, kalker veya marn gibi kalsiyum karbonat içeren kayaçlar iken, silisin başlıca kaynağı kildir. Alümin ve demir oksit bunları takip eder. Magnezyum ve alkali oksitler gibi diğer maddeler de az miktarda bulunmaktadır.

Tartılarak silosundan alındıktan sonra siklonlardan oluşan ön ısıtıcı kuleye beslenen farin, 30C°’den 1000C°’ye kadar ısıtılarak %90 oranında kalsine olur. Farin, fırında pişerken hammadde içerisindeki önce serbest hale geçen oksitler, sıcaklık yükseldikçe aralarında yeni bileşikler oluştururlar. Ön ısıtıcıdan gelen farin döner fırında 1500 C°’de pişirilmektedir. Fırından çıkan ürüne **klinker** adı verilir. Fırından 1300C°’de çıkan klinker, sıcaklığı 100C°’ye düşünceye kadar soğutulur. Soğutucudan çıkan klinker çimento üretimi için ara ürün sayılır. Klinkerin, ağırlıkça %3-5 arası, kalsiyum sülfat ile öğütülmesi sonucunda çimento elde edilir. Çimento su ile karıştırıldığında kimyasal reaksiyonların ve katılma sürecinin kontrolü için klinkere öğütme sırasında katılan kalsiyum sülfat oranı önemlidir. En son bu ürün silolara gönderilir. Silolardan çimento; torbalı çimento ve dökme çimento olmak üzere 2 şekilde çıkartılır [35].

Çimento üretim aşamaları; hammadde kazanımı, hammadde depolanması ve hazırlanması, yakıtın depolanması ve hazırlanması, klinker pişirme, çimento öğütme ve depolama, ambalajlama ve sevk etme şeklindedir [36]. Bu işlemler sırasıyla anlatılmıştır.



Şekil 2.19: Basitleştirilmiş genel çimento üretiminin proses akış şeması [28]

2.5.2.1. Hammaddenin Kazanılması

Çimentonun ana bileşeni klinkerdir. Klinkerde başlıca kireç taşı (kalker), kil ve marndan oluşmaktadır. Bunun dışında yardımcı maddeler olan puzzolonik maddeler (yüksek fırın cürufu, alçı taşı, uçucu kül, demir cevheri v.b. katkı maddeleri) klinkere eklenerek 5 ana çimento türünde 27 farklı çeşit çimento imalatında kullanılmaktadır.

Kireç taşı (kalker); kimyasal bileşimi en az %90 kalsiyum karbonat (CaCO_3) içeren kayalardır. Kalkerler, bileşimlerinde kalsiyum karbonatın dışında magnezyum karbonat, kil mineralleri, demir silikat-oksit ve sülfürleri, silikat asidi gibi çeşitli bileşikler de içermektedirler. Çimento üretiminde hammadde ya da düzenleyici olarak kullanılan kalkerin kalitesinde, safsızlığı önemlidir. İçerdiği CaCO_3 ve CaO yüzdeleri safsızlığını göstermektedir. Kalkerin kimyasal özelliğinin dışında, hammadde yataklarının fabrikaya yakınlığı, cevherin sökülmesi, kırılması, nem oranları, öğütülmesi, pişirilme nitelikleri ve homojenlikleri üretim maliyetleri açısından önemli olan unsurlardandır.

Kil; mineralojik bileşiminde %90'a kadar kil mineralleri bulunan kayalardır. Kil minerallerinin temel özelliği, bileşimlerinde alüminyum oksit bulunması ve sulu alüminyum silikatlarının olmasıdır. Çimento üretiminde kullanılan kilin kimyasal bileşiminde $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ oranı 2/1 civarında olması gerekir. Buna ek olarak, SiO_2 miktarının belirli bir sınırdan kalması ve alkali oksit miktarının maksimum %1 olması gerekmektedir. Kaolin (kil minerali) ise beyaz çimento üretiminde kullanıldığı için da ayrı bir önem taşımaktadır.

Marn; doğada bulunan %50-70 oranındaki kalker ile %50-30 kil karışımından oluşan kayalarlardır. Klinker, yaklaşık %70 kalker ile %30 kil içeren hammaddenin öğütülerek yüksek sıcaklıkta pişirilmesi sonucu elde edilir. Marn doğal olarak bu bileşime sahip olmasından dolayı çimento için ideal hammaddedir. Bunun yanı sıra kalkere göre daha yumuşak olduğu için kolay öğütülebilmektedir. Böylece kırma ve öğütme işleminde tüketilen enerji daha az olmaktadır [37].

Doğal hammaddelerin kazanımının tamamı madencilik ve taş ocakları faaliyetlerini içermektedir. Malzemeler açık yüzeyli ocaklardan çıkarılır. Faaliyetler genel olarak; kaya delme, patlatma, kazıma, taşıma ve ufalamayı kapsamaktadır. Kalker, kil ve marn genellikle tesise yakın olan taş ocaklarından çıkartılır. İlk kırılma işleminden sonra hammaddeler, depolanması ve hazırlanması için çimento fabrikasına taşınmaktadır. Diğer demir cevheri, yüksek fırın cürufu, boksit vb. yardımcı hammaddeler, başka yerlerden getirilir.

Üretim süreci ve klinker kalitesi, hammaddelerden direk olarak etkilenmektedir. Bu nedenle hammaddeler klinker yakma işlemi için gerekli özellikleri ve kimyasal bileşenleri kapsamalıdır [36].

2.5.2.2. Hammaddenin Depolanması, Hazırlanması ve Öğütülmesi

Hammaddenin hazırlanması, hem beslenen hammaddenin kimyasal bileşimi açısından hem de beslenen maddenin fırın sistemine girmeden önce yeterince ince taneli olması bakımından büyük önem taşımaktadır [36].

Hammaddenin hazırlanmasında, ilk önce toplanan kalkerler kırıcılar yardımıyla daha küçük boyutlara getirilir ve açık veya kapalı alanlarda depolanır. Ufaltılmış olan kalkerler, diğer hammaddeler ile istenilen kimyasal kompozisyonu oluşturmak için uygun oranlarda karıştırılır. Karışım hem kurutma hem de öğütme işlemi için farin değirmenine iletilir. Hammaddenin hazırlanması enerji gerektiren bir prosestir. Kullanılan toplam elektrik enerjisi, üretim şeklinin yaş veya kuru olmasına, kırıcı ve farin değirmeninin türüne, hammaddenin nem oranına ve hammaddenin sertliğine göre değişkenlik göstermektedir. Genellikle 25-35 kWh/ton hammadde aralığındadır [28].

Hammadde depolanması; çimento fabrikalarında daha az yatırım maliyeti gerektirdiği için yaygın olarak açıkta stoklama kullanılmaktadır. Ancak malzemeyi yukarıdan dökme; vinç, kepçe gibi makinalarla alma/yükleme işlemlerinden çıkan toz ile mücadele etmek oldukça zordur. Ayrıca hava şartlarının etkilerine açık olan malzemelerin, özellikle klinker kalitesinin stoklama süresince olumsuz etkilenmesi istenmemektedir. Sektör; çevre koruma

baskıları, kalite bilincinin yükselmesi ve süreci daha iyi denetleyebilmek açısından, tam kapalı veya yarı kapalı stoklama alanlarına yönelmektedir [28].

Fırın sistemine beslenecek olan hammaddenin kimyasal açıdan homojen olması gerekmektedir. Bunun için beslenecek olan hammadde, öğütme tesisinde sürekli olarak kontrol edilir. Maden ocağından çıkan hammaddeler içerik bakımından çeşitlik göstermektedir. Deponun uzunluğu boyunca malzemenin sıra haline veya tabaka halinde yığılması ve hammadde alınırken çapraz kesitlerin çıkarılması ile ilk ön homojenizasyon sağlanabilir. Madendeki malzeme homojen ise, basit yığma sistemleri de kullanılabilir [36].

Hammaddenin Öğütülmesi; Klinker pişirme prosesindeki kimyasal tepkimeleri kolaylaştırmak için yapılan bir yüzey artırma işlemi ve hammadde boyutlarının küçültülmesine dayanan fiziksel değişim sürecidir. Değirmene beslenecek olan hammaddenin hazır hale getirilme işlemidir. Hammadde öğütme işleminde harcanan enerji proses tipine göre değişmektedir. Yaş üretim prosesinde 1300 - 1600 kcal/klinker, yarı yaş üretim prosesinde 900 - 1100 kcal/klinker, kuru üretim prosesinde ise 850 - 900 kcal/klinker arasında değişim göstermektedir. Kuru üretim prosesinde klinker başına toplam enerji tüketiminin daha az olması nedeniyle, çimento üretim tesislerinde kuru üretim prosesi giderek yaygınlaşmaktadır. Hammadde öğütme işlemi için değirmenler kullanılmaktadır. Ülkemizde hammadde öğütmede en çok bilyalı değirmenler ve dik değirmenler kullanılmaktadır. Dünya’da kullanılan diğer değirmenlerden bazıları ise, otojen değirmenler, roller presli değirmenler, yatay valsli değirmenler olarak sayılabilir [28].

- **Bilyalı değirmenler:** Malzeme dönen bir tüp içinde öğütme elemanlarıyla birlikte dönerken, sürtünme yolu ile öğütülür. Değirmende malzeme ve öğütme elemanları birlikte yukarı çıkar ve sonrasında aşağı düşerler. Bu yoğun temas malzemenin ufalmasını sağlar. Çimento sektöründe öğütme elemanı olarak çelik bilyalar veya silindir parçalar kullanılmaktadır.
- **Dik değirmenler:** Çalışma şekli hava süpürmelidir. Gövdeleri içindeki seperatör ile çalışarak malzeme kurutma işlemi yaparlar. Dik değirmenler aynı kapasitede bilyalı değirmenler ile kıyaslandığında daha az yer kaplar ve %10 - 15 daha az enerji tüketirler. Bunun dışında bilyalı değirmenlerde malzemenin alıkonma süresi 5 - 10 dk iken, dik değirmenlerde daha kısadır. Bu nedenle yeni kurulan farin değirmenlerinin %80’i dik değirmenlidir [28].

2.5.2.3. Yakıt Depolanması ve Hazırlanması

Proses için gereken enerji ve ısıyı sağlamak için çeşitli yakıtlar kullanılabilir. Çimento üretiminde kullanılan fırın sisteminde genellikle kullanılan yakıtlar; toz halindeki kömür veya petrokok, fuel oil ve doğalgazdır. Bu yakıtların temel kül bileşenleri; silis ve alümin bileşikleridir. Bunlar hammaddelerle birleşerek, klinkerin parçasını oluştururlar. Bu nedenle kül içeriği sabit olan yakıtlar tercih edilmektedir. Isı kayıplarının minimum olması için çimento fırınlarında kolay ve tam yanma sağlanması gerekir.

Yakıtların depolanması; işlenmiş kömür ve petrokok, hammaddeye benzer şekilde depolanır. Toz halindeki kömür ve petrokok güvenlik sebebiyle silolarda depolanmaktadır. Fuel oil çelik ise tanklarda depolanır.

Yakıtların hazırlanması; kömür ve petrokok, öğütme tesislerinde kaba un inceliğinde toz haline getirilerek hazırlanır. Yanma açısından, toz halindeki yakıtın inceliği önem taşımaktadır. Taneler çok ince olduğunda alev sıcaklıkları çok yüksek olabilirken, çok kaba olduğunda yanma kötü olabilmektedir [36].

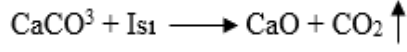
2.5.2.4. Klinker Pişirme

Prosesin en önemli kısmı ürünün kalitesi, maliyeti ve emisyon potansiyeli açısından bu bölümdür. Kısaca, klinkerin pişirilmesi için farin döner fırın sistemine beslenir, burada kurutulur, ön ısıtma işlemine tabii tutulur, kireçlenir ve çimento klinkeri üretmek için sinterlenir. Klinker hava ile soğutulur ve depolanır [36].

Klinker üretimi ön ısıtıcı ve prekalsinasyonlu döner fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Öğütülmüş olan hammadde karışımı (farin) döner fırına beslenmeden önce, ön ısıtmalı siklonlardan geçirilmektedir. Ön ısıtıcı siklonlarda sıcak fırın çıkış havası kullanılmaktadır. Ön ısıtıcıda fırın içerisinden gelen sıcak gaz yukarı doğru hareket ederken, farin aşağı doğru hareket etmektedir. Kademeli siklonlardan oluşan ön ısıtıcıda, farin ile sıcak gaz bir araya gelerek prekalsinasyon işlemini gerçekleştirir. Farin, sıcaklığı yaklaşık 1500C°'ye ulaşan döner fırına beslenmektedir.

Döner fırın hafif eğimli (yaklaşık 2°), iç bölgesi yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması için özel refrakter malzeme ile kaplanmış çelik bir silindirden oluşmaktadır. Döner fırın dakikada birkaç devir olacak şekilde yavaş yavaş döner. Fırında pulvarize edilmiş kömür, doğalgaz, fuel-oil ve petrokok gibi yakıtlar kullanılmaktadır. Bu yakıtlar, fırın bölgesinin sonundaki kalsinasyon için gerekli olan ısıyı oluşturacak alevi bir brülör vasıtasıyla beslemek amacıyla yakılır. Fırının dönme hareketiyle klinker kısmen erimiş halde fırının sonuna düşer ve

klinker soğutucularında soğutma işlemi gerçekleşir. Fırındaki yoğun ısı, farinde kimyasal ve fiziksel değişiklikleri tetikleyerek, çimento klinkerine dönüşmesini sağlar. Kalsiyum karbonatın (CaCO_3) 900 C° de ayrışması ile çimento üretim prosesi başlar. Kalsiyum karbonatın ayrışmasıyla oluşan kimyasal tepkimeye kalsinasyon adı verilmektedir.



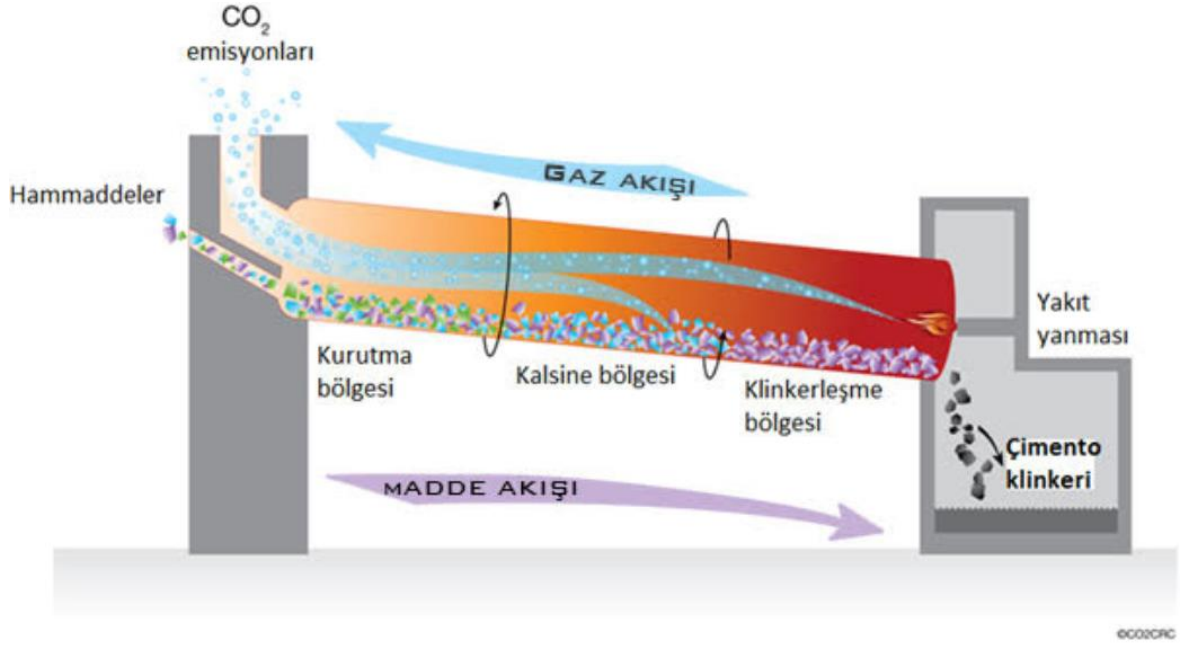
Klinkerleşme esnasında kalsiyum oksit, yüksek sıcaklıkta ($1400 - 1500\text{C}^\circ$) silis, alümin ve demir oksit ile tepkimeye girerek klinkeri meydana getiren silikatları, alüminatları ve kalsiyum ferritleri oluşturur [28]. Ön ısıtıcı ve fırın içerisinde gerçekleşen olaylar reaksiyonlar Çizelge 2.13'te özetlenmiştir [37].

Çizelge 2.13: Ön ısıtıcı ve fırında gerçekleşen reaksiyonlar [37]

Sıcaklık	Meydana gelen olay	Türü
100 C°	Hammaddenin rutubetinin uçması	Endotermik
500 C° ve üzeri	Kil minerallerinin kristal suyunun çıkması	Endotermik
$650 - 700\text{ C}^\circ$	MgCO_3 'ün kalsinasyonu	Endotermik
$800 - 900\text{ C}^\circ$	CaCO_3 'ün kalsinasyon başlangıcı	Endotermik
900 C° ve üzeri	Kil minerallerinin kristalizasyonu	Ekzotermik
$900 - 1200\text{ C}^\circ$	Alüminyum silikatların CaO ile reaksiyonu	Ekzotermik
900 C° ve üzeri	Monokalsiyum alüminat ($\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) oluşumu Monokalsiyum silikat ($\text{CaO}.\text{SiO}_2$) oluşumu ve Dikalsiyum silikata ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$) dönüşümü	
$1185 - 1285\text{ C}^\circ$	Trikalsiyum alüminat ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) ve Tetrakalsiyum alüminoferrit ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_3\text{O}_3$) oluşumu; Dikalsiyum silikat oluşumu ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$) oluşumunun tamamlanması	
$1250 - 1280\text{ C}^\circ$	Sıvı faz başlangıcı	Ekzotermik
1280 C° ve üzeri	Sıvı faz oluşumu ile birlikte katı fazda son ürünlerin ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$) oluşumu	Ekzotermik

Pişme işlemi sırasında farindeki oksitler birbiri ile reaksiyona girerek, yeni kristal yapılar oluştururlar. Pişmiş haldeki bu malzemeye **klinker** adı verilmektedir.

Döner fırın içerisinde gerçekleşen klinker üretiminde, sıcaklık aralıklarına göre çeşitli ısı bölgeleri oluşmaktadır. Temel ısı bölgeleri; kurutma bölgesi ($\sim 450\text{ C}^\circ$), kalsinasyon bölgesi ($450\text{-}900\text{ C}^\circ$) ve klinkerleşme bölgesi ($1300\text{-}1550\text{ C}^\circ$) olarak belirtilebilir. Klinker prosesinde oluşan ısı bölgeleri Şekil 2.20’de verilmiştir [28].



Şekil 2.20: Klinkerleşme prosesinde oluşan ısı bölgeleri

Klinker üretimi döner fırında tamamlandıktan sonra, klinker soğutucunun bulunduğu bölgeye iletilir. Klinker soğutucusu, döner fırın sisteminin en önemli parçasından biridir. Sıcak klinkerden fazla ısıyı mümkün olduğunca geri kazanarak tekrar prosese iletir ve klinkerin sıcaklığını 100 C° ’ye kadar azaltır. Daha sonrasında klinker kapalı alanda depolanır.

Dünya’da çimento üretimi farklı fırınlar kullanılarak yapılmaktadır. Üretim prosesi kuru veya yaş olsa da döner fırın içerisinde aynı kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Klinker üretiminde kullanılan başlıca fırın tipleri; uzun kuru döner fırınlar, yarı kuru (lepol) döner fırınlar, ön ısıtıcı ve prekalsinasyonlu döner fırınlar, yaş proses döner fırınlar ve dikey şarftlı fırınlardır. Dünya’da ve Türkiye’de kullanılan çimento fırın türleri ve kullanım oranları Çizelge 2.14’te verilmiştir.

Çizelge 2.14: Dünya’da ve Türkiye’de kullanılan çimento fırın türleri ve kullanım oranları

ÜLKELER	Fırın Türleri			
	Kuru Proses Fırını (%)	Yarı Kuru Proses Fırını (%)	Yaş Proses Fırını (%)	Dikey Şaftlı Fırın (%)
Türkiye	92,2	5,2	0	2,6
Kanada	71	6	23	0
ABD	82	1	18	0
Brezilya	98	Veri yok	Veri yok	Veri yok
Avrupa	92	4,5	3,5	0
Çin	50	0	3	47
Hindistan	50	9	25	16
Japonya	100	0	0	0
Güney Kore	93	0	7	0
Güneydoğu Asya	80	9	10	1
Avustralya ve Y. Zellanda	24	3	72	0
Afrika	66	9	24	0

Endotermik reaksiyonların gerçekleşmesi için gerekli olan minimum enerji yaklaşık olarak 1,8 GJ/ton klinkerdir. Ancak hammaddenin nem oranına bağlı olarak bu oran değişebilmektedir. Farklı fırın tiplerine göre yakıt tüketimleri Çizelge 2.15’te verilmiştir [28].

Çizelge 2.15: Farklı fırın tiplerine göre yakıt tüketimi

FIRIN TÜRÜ	Yakıt Tüketimi (GJ/ton klinker)
Yaş Proses Fırını	5 - 6,7
Yarı yaş / Yarı kuru Proses Fırını	3,3 - 5,4
Kuru Proses Dik Şaftlı Fırın	4,8 - 6,7
Uzun Kuru Fırın	4,6 - 5,3
1 Kademe Siklon Ön Isıtıcı Fırın	4,2
2 Kademe Siklon Ön Isıtıcı Fırın	3,8
3 Kademe Siklon Ön Isıtıcı Fırın	3,3
4 Kademe Siklon Ön Isıtıcı ve Prekalsinatörlü Fırın	3,1
5 Kademe Siklon Ön Isıtıcı ve Prekalsinatörlü Fırın	3,0 - 3,1
6 Kademe Siklon Ön Isıtıcı ve Prekalsinatörlü Fırın	2,9

2.5.2.5. Çimentonun Öğütülmesi ve Depolanması

Klinkerin üretilmesinden sonra katkı maddesi ilave edilerek, farklı türde çimentolar elde edilmektedir. Alçı taşı ve katkı olarak kullanılacak hammadde, çimento değirmenlerine doğrudan beslenemeyecek boyutta olduğu için önce kırıcılardan geçirilerek çimento değirmenine beslenirler. Ülkemizde çimento öğütmede en çok bilyalı değirmenler kullanılmaktadır. Sıcak klinker besleme ve öğütme işlemleri sonucunda, çimento değirmenlerinde sıcaklığı yaklaşık 100-110 C°'ye yükselir, böylelikle malzeme öğütülürken bir yandan da rutubeti alınmış olur [37]. Çimento üretiminde klinkere ilave edilen katkı maddeleri; doğal puzolan (tras), pomza ve perlit, yüksek fırın cürufu, pulvarize kül, yanmış petrol kumu, alçı taşı, silis dumanı ve pişmiş şist gibi maddelerdir.

Klinkerin içerisine katkı maddesi katılmasında ekonomik çimento üretiminin yanı sıra, daha az klinker kullanılmasına sebep olduğundan birim çimento başına düşen sera gazı emisyonlarının azaltılmasına da katkıda bulunmaktadır [28]. Çimento değirmeni çıkışında çimento, türlerine göre stoklanmak için silolara alınmaktadır [37].

2.5.2.6. Ambalajlama ve Sevk Etme

Çimento havanın nemi ile kendi kendine tepkimeye girme özelliğine sahip olduğu için, kapalı alanda stoklanmalı ve uzun süre stokta bekletilmemelidir. Çimento fabrikalarında üretilen klinker doğrudan satışa sunulabilmekte veya ihraç edilebilmektedir. Satılan bu klinker, kullanılacağı ülke veya bölgede ki öğütme tesislerinde gerekli katkı maddesi ilave edilerek öğütülüp çimento haline getirilebilmektedir. Böylelikle katkı maddelerinin taşınması gerekmediğinden maliyetler de daha düşük olmaktadır [28].

Çimento, dökme çimento ve torbalı çimento olarak iki şekilde satışa çıkmaktadır. Dökme çimento; silolardan direk silobuslara yüklenir. Torbalı çimento ise; paketleme bölümünde 50kg'lık kağıt torbalara doldurulduktan sonra kamyonlara yüklenmektedir [37].

2.5.3. Çimento Üretim Teknikleri

Dünya'da tüketilen enerjinin önemli bir kısmı çimento sektörü tarafından kullanılmaktadır. Bu nedenle sektördeki gelişmeler; az enerji kullanımı, düşük maliyet ve en önemlisi alıcı ortama düşük gaz salınımı yapma yönünde olacaktır. CO₂, klinkerin hammaddesi olan CaCO₃'ün kalsinasyonundan ve yakıtların yanmasından ortaya çıkmaktadır. 1 ton çimento üretmek için 0,55 ton CO₂ oluşurken, klinker üretimi için gerekli sıcaklığa ulaşmakta kullanılan yakıttan da 0,45 ton CO₂ gelmektedir. Özetle 1 ton çimento üretmek için %60

oranında kalsinasyondan, %40 oranında da yakıttan atmosfere 1 ton CO₂ salınımı yapılmaktadır [38].

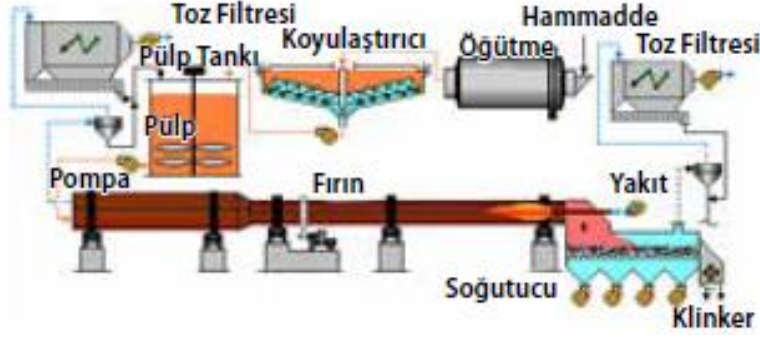
Çimento üretim için dünya genelinde 4 ana üretim prosesi uygulanmaktadır. Bunlar sırasıyla; yarı kuru (lepol) üretim prosesi, yarı yaş üretim prosesi, yaş üretim prosesi ve kuru üretim prosesidir.

Proses seçimi genellikle hammaddenin durumuna göre seçilir. Dünya geneline bakıldığında klinker üretiminin hala büyük oranda yaş üretim prosesi ile yapılmaktadır. Avrupa’da ise kuru hammaddelere erişim sayesinde klinker üretiminin %90’dan fazlası kuru üretim prosesi ile yapılmaktadır. Yaş prosesler, kuru proseslere göre daha fazla enerji tüketimi yaptıklarından, daha da pahalı proseslerdir [36].

2.5.3.1. Yaş üretim prosesi

Yaş üretim prosesinde klinker üretimi, hammaddeler (çoğunlukla nem içeriği yüksek olan) suda öğütülerek pompalanabilir çimento harcı oluşturulur. Öğütülen çimento harcı direk fırına beslenir veya harç kurutucuya verilir [36].

Yaş üretim prosesinde uzun fırınlar kullanılmaktadır. Bunun sebebi ise, kurutma, ön ısıtma, kalsinasyon ve diğer işlemlerin fırında gerçekleştiriliyor olmasıdır. Bu yöntemdeki fırınların uzunluğu 230 m ve çapları da 6 m’ye kadar olabilmektedir [38]. Yaş üretim prosesinde, hammaddeler öğütme işlemi için belirli oranlarda değirmene beslenirler. Öğütme işleminde hammadde değirmenine, hammaddeye ek olarak ağırlıkça %36 - 40 oranında su verilir. Değirmende yaş olarak öğütülen hammaddeler çamur kıvamındadır. Bu şekilde üretilen farin, pülp (çamur) tanklarında karıştırılarak homojen hale geldikten sonra fırına beslenmektedir. Fırına beslenen farindeki suyun buharlaştırılması gerekmektedir. Buharlaşma işlemi fırının girişinde bulunan kurutma bölgesinde gerçekleşir. Orta bölgede kalsine olan farin son olarak soğutucuya dökülür. Yaş üretim prosesinde, hammaddenin çok nemli olmasından dolayı birim klinker üretimi başına ortalama 1800-1900 kcal enerji tüketilmektedir. Bu nedenle diğer proseslere göre daha pahalıdır [37]. Şekil 2.21’de yaş üretim prosesi ile klinker üretiminin akış şeması verilmiştir [38].



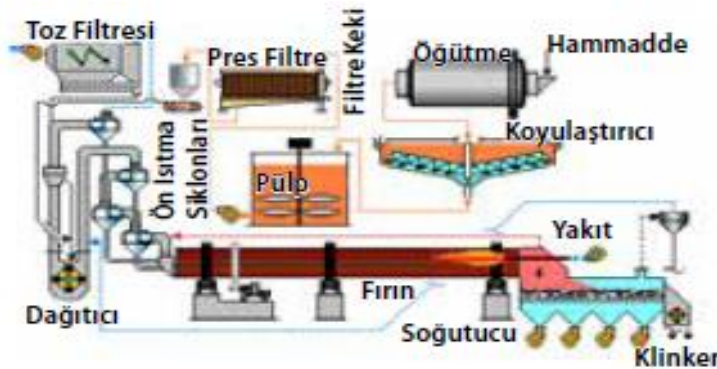
Şekil 2.21: Yaş üretim prosesi ile klinker üretimi [38]

Yaş üretim prosesi, karıştırılması, öğütülmesi ve partikül dağılımı kontrolünün daha kolay olması sebebiyle önceki yıllarda tercih sebebi olmuştur. Ancak modern çimento tesisleri karıştırma ve öğütme teknolojilerinin gelişmesiyle beraber, çok kademeli ön ısıtıcı ve prekalsinatörlü kuru döner fırınlara geçmişlerdir. Yaş üretim prosesindeki fırına beslenen %36 -38 oranındaki suyu buharlaştırmak için kullanılan yüksek enerji ihtiyacı gibi nedenlerden dolayı 1950’lerde kuru üretim prosesine geçilmeye başlanmıştır [28].

Ülkemizde ise yaş fırınların büyük bir kısmı 1965-1973 yıllarındaki üretim kapasitelerindeki artış ve 1974 yılı itibarı ile de yakıt tasarrufu nedeniyle kuru üretim prosesine çevrilmiştir [37].

2.5.3.2. Yarı yaş üretim prosesi

Yarı yaş üretim prosesinde klinker üretimi, pülp halindeki sulu öğütülmüş hammadde filtreden geçirilerek ısıl işlem öncesinde nemi yaklaşık %10’a kadar düşürülmektedir. Filtreleme işleminde birbirine yapışarak topaklaşan hammadde uygun bir ekipman ile dağıtıldıktan sonra ön ısıtma siklonlarına verilir. Siklonlarda kurutma ve ön ısıtma işlemleri yapılmaktadır. Siklon sonrasında ise hammadde fırına beslenmektedir [28]. Şekil 2.22’de yaş üretim prosesi ile klinker üretiminin akış şeması verilmiştir [38].

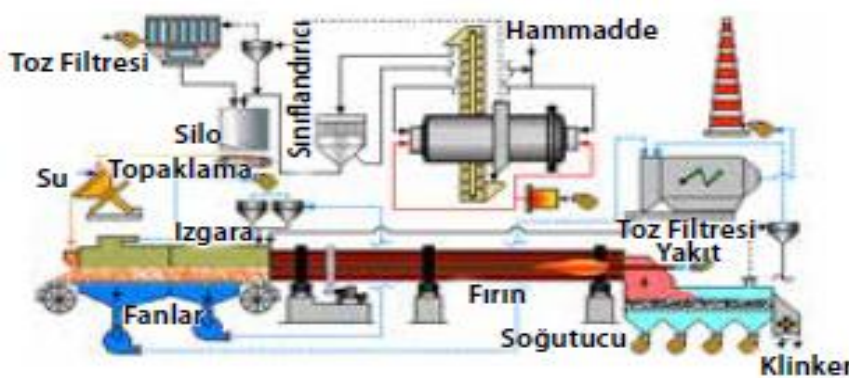


Şekil 2.22: Yarı yaş üretim prosesi ile klinker üretimi [38]

2.5.3.3. Yarı kuru (lepol) üretim prosesi

Yarı kuru üretim prosesinde; hammadde değirmeninde uygun oranlarda karıştırılan maddeler öğütülerek farin elde edilir. %12-14 oranında su elde edilen farine ilave edilerek granül (topaklar) oluşturulmaktadır. Oluşan granüller önce (topraklar) kurutma ve ısıtma işlemleri için lepol ızgaralara beslenir. Isıtma sırasında kısmi olarak gerçekleşen kalsinasyonun geri kalanı ve klinkerleşme reaksiyonları döner fırında gerçekleşir. Fırın çıkışında sıcak olan klinker soğutucularda soğutulur. Yaş üretim prosesi fırınları, yarı kuru (lepol) üretim prosesi fırınlarına göre %15-30 oranında daha uzundur. Çünkü yaş proses fırınlarında ön ısıtıcı bulunmadığı için kurutma, ısıtma, kalsinasyon ve klinkerleşme işlemlerinin hepsi fırın içerisinde gerçekleşmektedir. Ayrıca, yarı kuru fırın sistemlerinde su ilavesi daha az olduğu için, yakıt tüketimi de daha azdır [37].

Uzun yıllar çimento fabrikalarında klinker üretiminde kullanılan bu fırınlar son dönemlerde yerini kuru tip fırınlara bırakmıştır [28]. Şekil 2.23'te yarı kuru (lepol) üretim prosesi ile klinker üretiminin akış şeması verilmiştir [38].



Şekil 2.23: Yarı kuru (lepol) üretim prosesi ile klinker üretimi [38]

2.5.3.4. Kuru üretim prosesi

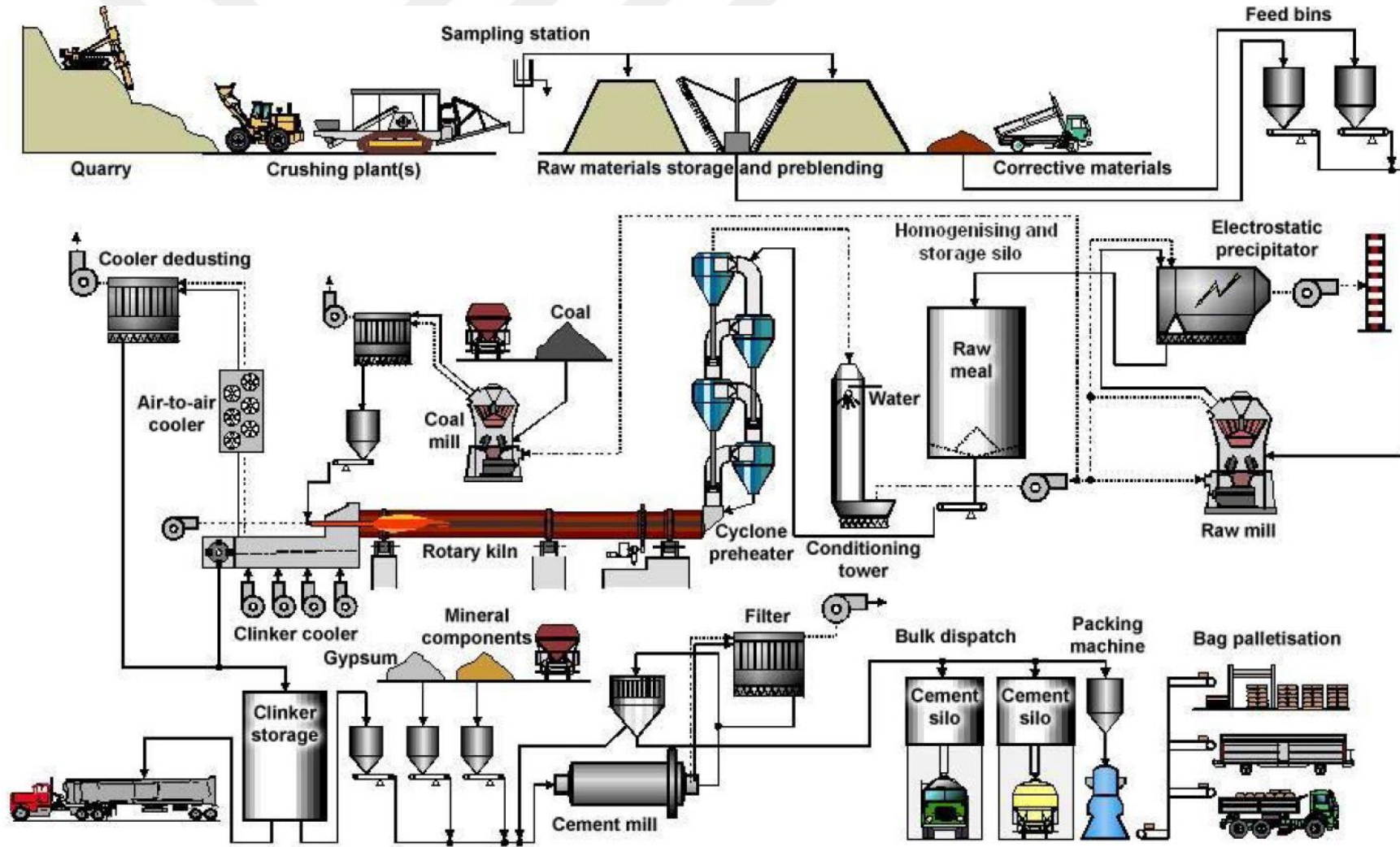
Kuru üretim prosesinde, önceden homojenize edilmiş olan hammadde karışımı (farin) bir ön ısıtıcıya, prekalsinatörlü döner fırına veya uzun kuru fırına beslenmektedir. Kuru üretim fırını, yaş üretim fırını ile aynı çapa sahip olabilmesine rağmen boyu yaklaşık 45m daha kısadır. Ön ısıtıcılı ve prekalsinatörlü fırınlar, yüksek ön ısıtıcı kulelere sahiptirler [28].

Ön ısıtmalı klinker üretim süreci; Genelde 4 siklonlu ön ısıtıcı kulelere öğütülmüş hammadde üstten verilir. Fırın çıkış gazından gelen sıcak hava ile temas eden hammadde, kurutma ve ön ısıtma haricinde %10 oranında kalsine olmaktadır. Soğutucudan çıkan ısının bir kısmı fırında kullanılırken, diğer kısmı yakıt ve hammadde kurutulmasında

kullanılmaktadır. Ön ısıtma sürecinde kalsinasyon sistemde ise ön ısıtma siklonlarına eklenen bir kanal ile ilave yakma işlemi ile fırına girmeden önce hammadde yaklaşık %50 oranında kalsine edilmektedir. Bu yakma işlemi ile fırın refrakterin ömrü uzatılmakta aynı zamanda fırın kapasitesi arttırılmaktadır. Yakma kanalında atık ve lastik yakma olanağı da bulunmaktadır. Kuru tip fırın sisteminde fırın çıkış gazının tamamı yakma kanalına geçtiği için, yanma sonucunda alıcı ortama yayılan NO_x değeri daha düşüktür [38].

Kalsinatör sistemli klinker üretim süreci; Soğutucudan siklonlara ısı kanalıyla bağlantı kurulmuştur. Bu sayede soğutucudan gelen havanın sıcaklığı, siklonlara verilmeden kalsinatördeki yakma odasında arttırılmıştır. Tüketilen yakıtın % 40-50'si fırında, %50-60'ı kalsinatördeki yakma odasında kullanılmaktadır. Hammadde siklonlarda sıcak havayla %90-95 oranında kalsine olmaktadır. Bu yöntemin kullanımıyla hem fırın boyları kısaltılmış hem de fırınlarda daha az yakıt tüketilmesi sağlanmıştır. Ayrıca yüksek kapasite de klinker üretimi gerçekleştirilmiştir.

Çok kademeli ön ısıtma siklon ve kalsinatörlü kuru klinker üretiminde kullanılan enerji miktarı, yaş üretime oranla çok düşüktür. Günümüzde modern kalsinatörlü klinker üretimi yaygınlaşmıştır. Bu yöntem ile hem daha kısa fırınlar kullanılmakta hem de düşük maliyetli ve yüksek kapasiteli tesisler kurulabilmektedir [38]. Genel bir çimento üretim proses akış şeması Şekil 2.24'te verilmiştir [36].



Şekil 2.24: Kuru üretim prosesi ile çimento üretim akış şeması [36]

2.5.4. Çimento Türleri

Çimento üretimi belli standartlara göre yapılmaktadır. Avrupa Standardizasyon Komitesi tarafından 1973 yılında Avrupa ülkelerinin çoğunda geçerli olacak çimento standartlarının hazırlanmasına başlanmıştır. Komitenin, Avrupa ülkelerindeki yerel standartlara uygun olarak kullanılan çok sayıda çimento türünü dikkate alarak genel çimentolar için çok sayıda çimento türü içeren EN 197-1'i hazırlamıştır. Bu Avrupa standardı, genel amaçlı türk çimentolarının yerini almış ve direk Türk standardı kabul edilmiştir. Genel çimentolar TS EN 197-1'de "CEM Çimentosu" olarak adlandırılmıştır. CEM Çimentosu; hidrolik sertleşmesi öncelikle kalsiyum silikatların hidrasyonu ile meydana gelen ve içindeki reaktif CaO ve reaktif SiO₂ toplamının kütlece en az %50 olması gereken çimentodur. Bileşimi portland çimentosu klinkeri, kalsiyum sülfat ve çeşitli mineral katkılarıdır. Standartta göre CEM Çimentoları 27 alt çeşit içeren 5 ana tiptedir.

CEM I Portland Çimentosu: Klinkerin en fazla %0-5 arası mineral katkı ile öğütülmesi sonucu oluşan çimentodur.

CEM II Çimentosu: Bu grupta yer alan çimentolarda mineral katkı %6-35 arasındadır. Mineral katkının türüne bağlı olarak "Portland Cürufu", "Portland Puzolanlı" gibi isimler almaktadır.

CEM III Yüksek Fırın Cürufu Çimentolar: Mineral katkı miktarları %36-95 arasındadır.

CEM IV Puzolanik Çimentolar: Bu çimentolarda katkı maddesi olarak kalker veya cüruf kullanılmaz. Katkı maddesi olarak kullanılan puzolan ve uçucu kül miktarı %11-55 arasındadır.

CEM V Kompoze Çimentolar: Katkı maddesi olarak hem %18-50 arasında cüruf hem de %18-50 arasında puzolan ve uçucu kül belli sınırlar içerisinde değiştirilerek kullanılır. Katkı maddesi miktarı klinker oranı %20-64 arasında olacak şekilde ayarlanmaktadır [39].

Çizelge 2.16'da TS EN 197-1 deki 27 tür çimento içerdikleri katkı madde oranları ile birlikte verilmiştir [37].

Çizelge 2.16: Çimento türleri

Çimento Tipi	Adı	Notasyon	Ana Bileşenler (Kütlece % olarak)									
			Klinker K	Yüksek Finn Cürufu S	Silis Dumanı D	Doğal Puzolan P	Endüstri- yel Puzolan Q	Silissi Uçucu Kül V	Kalkersi Uçucu Kül W	Pişmiş Şist T	Kalker L	Kalker LL
CEM I	Portland											
	Çimento	CEM I	95 - 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEM II	Portland Cürufu	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	-
	Çimento	CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35	-	-	-	-	-	-	-	-
	Portland Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	90 - 94	-	6 - 10	-	-	-	-	-	-	-
	Portland Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	80 - 94	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-
		CEM II/B-P	65 - 79	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	-
		CEM II/A-Q	80 - 94	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-
		CEM II/B-Q	65 - 79	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-
	Portland Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-V	80 - 94	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-
		CEM II/B-V	65 - 79	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-
		CEM II/A-W	80 - 94	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-
		CEM II/B-W	65 - 79	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-
	Portland Pişmiş Şistli Çimento	CEM II/A-T	80 - 94	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-
		CEM II/B-T	65 - 79	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-
	Portland Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-
		CEM II/B-L	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-
		CEM II/A-LL	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20
		CEM II/B-LL	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35
	Portland Kompoze Çimento	CEM II/A-M	80 - 94	6 - 20								
		CEM II/B-M	65 - 79	21 - 35								
CEM III	Yüksek Finnli Çimento	CEM III/A	35 - 64	36 - 65								
		CEM III/B	20 - 34	66 - 80								
		CEM III/C	5 - 19	81 - 95								
CEM IV	Puzzolanik Çimento	CEM IV/A	65 - 89	11 - 35								
		CEM IV/B	45 - 64	36 - 55								
CEM V	Kompoze Çimento	CEM V/A	40 - 64	18 - 30			18 - 30					
		CEM V/B	20 - 38	31 - 50			31 - 50					

Çizelge 2.16’da sayılan çimentoların dışında TS-EN 197-1 kapsamında yer alan, özel kullanım amaçlı olarak üretilmiş 5 çeşit daha çimento bulunmaktadır. Bunlar klinker üretimi sırasında veya sonrasında ilave edilen mineral katkıları ile yapılmaktadır.

Sülfatlara Dayanıklı Çimentolar: Trakalsiyum alüminat miktarı sınırlanmış (maksimum %5) olarak üretilen klinkerin kalsiyum sülfat ile öğütülmesi ile elde edilmektedir.

Beyaz Portland Çimentosu: Özel nitelikli kil ile kireç taşının birlikte pişirilmesi elde edilen beyaza yakın klinkerin bir miktar kalsiyum sülfat ile öğütülmesiyle elde edilir.

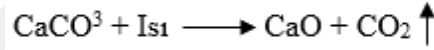
Harç Çimentosu: Portland çimentosu klinkeri içeren ince öğütülmüş çimentodur. İlave bileşene ihtiyaç duyulmadan kum ve su ile karıştırılarak duvar, sıva ve kaplama işlerinde kullanılmak üzere harç yapımında kullanılır.

Yüksek Fırın Cürufu Katkılı, Düşük Erken Dayanımlı Çimentolar: Sınırlandırılmış hidratasyon (çimento ile suyun karışımından sonra başlayan kimyasal reaksiyon) ısısına sahip, yüksek fırın cürufu katkı ve erken dayanımı düşük olan çimentodur.

Çok Düşük Hidratasyon Isılı Özel Çimentolar: Su ile karıştırıldığında sertleşen bir hamur oluşturan ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımı ve kararlılığını koruyan çimentodur [39].

2.5.5. Türkiye’de Çimento Üretiminden Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonları

Çimento Dünya çapında önemli bir yapı malzemesidir ve sonuç olarak çimento üretimi küresel CO₂ emisyonlarının ciddi bir kaynağıdır. Endüstriyel işlemler ve enerji kullanımından kaynaklanan CO₂ emisyonları, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %2,4’ünü oluşturmaktadır. CO₂ çimentonun bileşeni olan klinkerin üretiminde, kalkerin (kireçtaşı CaCO₃) kirece (CaO) dönüştürülmesiyle oluşan yan üründür ve proses emisyonu olarak hesaplanmaktadır. Bu sebeple çimento üretimindeki CO₂’in ana kaynağı klinker üretimidir. Bunun yanı sıra fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan emisyonlar bulunmaktadır ve bu emisyonları olarak hesaplanmaktadır [40].



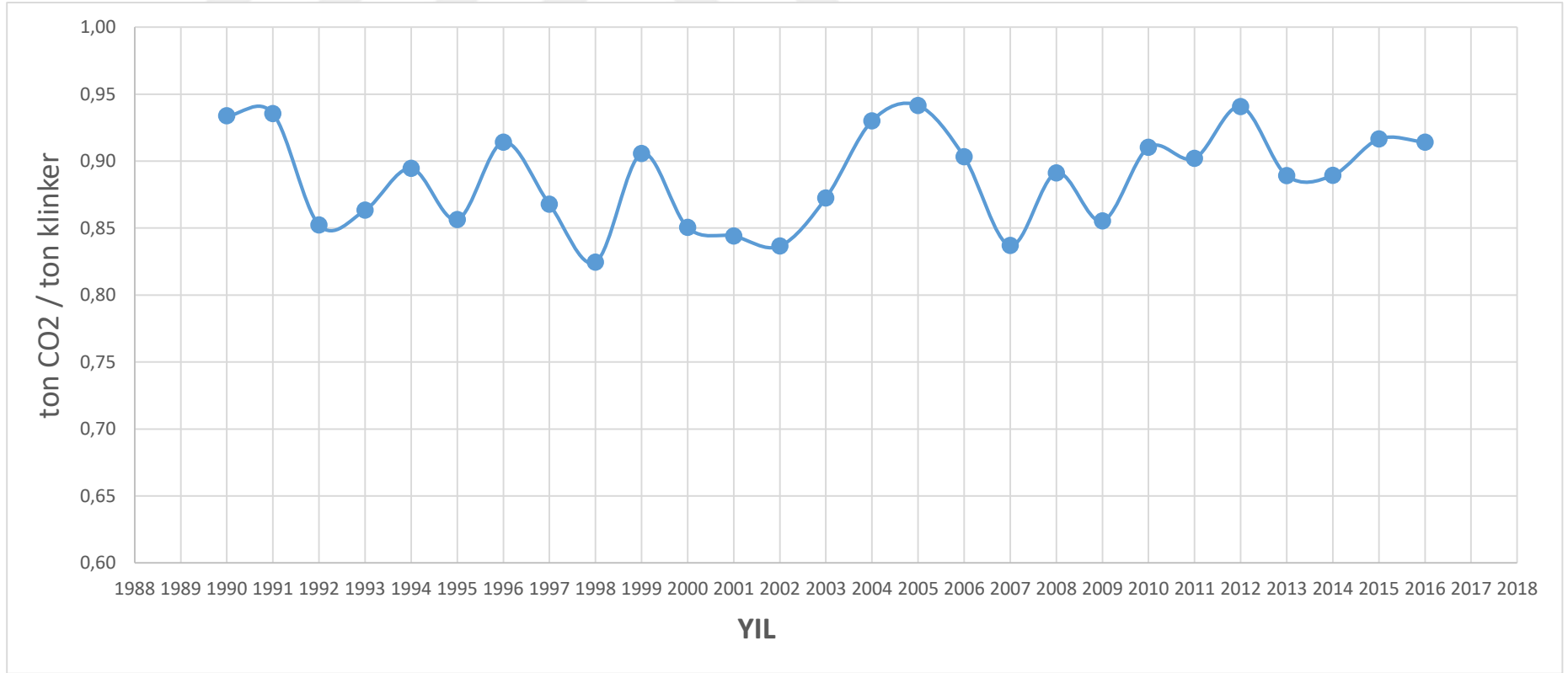
Çimento üretimi enerji yoğun bir sektördür. Bu nedenle Türkiye’de emisyonlarının hesaplanması zorunlu kılınan “ana kategori (key category)” olarak adlandırılmıştır. Kyoto Protokol’ü kapsamında taraf ülkelerin UNFCCC’ye sunmakla yükümlü olduğu Ulusal Sera Gazı Envanter Raporu (NIR)’nda çimento üretiminden kaynaklanan proses emisyonları, Mineral Sanayi başlığı altında yer almaktadır. Mineral Sanayi kapsamında çimento üretiminin yanı sıra, kireç üretimi, cam üretimi ve karbonat kullanan diğer üretim prosesleri yer almaktadır. Türkiye’de mineral sanayiden kaynaklanan sera gazı emisyonları (proses kaynaklı) 2016 yılında 41.924 Kt CO₂’dir. Bu emisyonların % 85,2’sini (~35.716 Kt) çimento sektörü oluşturmaktadır [20].

Türkiye’deki çimento sektörünün emisyon durumu 1990 - 2016 yılları arasındaki 1 ton klinker üretimi için salınan CO₂ değerleri Çizelge 2.17’de verilmiştir. Çizelge 2.17’de yer alan enerji emisyonları; çimento sektörünün kullanmış olduğu enerji türleri Enerji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan Enerji Denge tablolarından [41] alınmış ve Tier 1 metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Enerji emisyonlarının hesaplama detayı 3.2.1 bölümünde anlatılmıştır. Proses emisyonları ve üretilen toplam klinker verileri, Türkiye’nin UNFCCC’ye sunmuş olduğu Ulusal Sera Gazı Envanter Raporu (NIR)’ndan alınmıştır.

Çizelge 2.17: 1990 yılından 2016 yılına kadar birim ton başına düşen CO₂ değerleri

YIL	Enerji Emisyonları (Gg)	Proses Emisyonları (Kt)	Toplam Emisyon (Kt)	Üretilen Toplam Klinker (Kt)	1 ton klinker için üretilen CO2 emisyonu
1990	8.467,22	10.444,54	18.911,77	20.252,00	0,93
1991	9.639,43	12.020,78	21.660,20	23.153,00	0,94
1992	8.460,36	13.265,45	21.725,81	25.489,00	0,85
1993	8.484,10	13.048,64	21.532,74	24.941,00	0,86
1994	9.657,98	13.493,19	23.151,17	25.880,00	0,89
1995	9.068,29	14.132,70	23.200,99	27.094,00	0,86
1996	10.799,65	14.661,75	25.461,40	27.852,00	0,91
1997	9.807,82	15.104,55	24.912,37	28.706,00	0,87
1998	8.739,27	15.292,27	24.031,54	29.148,00	0,82
1999	10.738,63	14.589,78	25.328,41	27.966,00	0,91
2000	9.436,53	15.183,73	24.620,26	28.950,00	0,85
2001	9.175,74	15.086,93	24.262,67	28.746,00	0,84
2002	9.163,71	15.513,29	24.677,01	29.499,00	0,84
2003	10.519,22	16.021,78	26.541,00	30.419,00	0,87
2004	13.278,32	17.207,18	30.485,51	32.779,00	0,93
2005	15.140,24	19.117,01	34.257,25	36.382,00	0,94
2006	14.896,31	20.840,53	35.736,85	39.569,00	0,90
2007	13.353,25	22.779,56	36.132,81	43.174,00	0,84
2008	17.135,55	24.836,89	41.972,44	47.095,00	0,89
2009	16.576,62	26.557,94	43.134,56	50.436,00	0,86
2010	21.222,86	29.283,99	50.506,84	55.485,00	0,91
2011	21.636,07	30.526,93	52.163,00	57.823,00	0,90
2012	23.886,52	30.449,10	54.335,62	57.758,00	0,94
2013	22.790,95	32.994,75	55.785,70	62.736,00	0,89
2014	23.130,06	33.471,69	56.601,75	63.642,00	0,89
2015	24.176,91	32.618,66	56.795,56	61.971,00	0,92
2016	26.318,73	35.716,25	62.034,98	67.856,00	0,91

1990 ile 2016 yılları arasında 1 ton başına düşen CO₂ trendlerine bakıldığında, 0,82 ile 0,94 CO₂ salınımı yaptığı, ortalama olarak 0,89 ton CO₂/ton klinker olduğu Şekil 2.25'te gösterilmiştir. Emisyonların en yüksek olduğu 2005 ve 2012 yıllarında yoğun olarak taş kömürü ve petrokok tüketimi olduğu gözlemlenmiştir. Birim ton klinker başına düşen en düşük emisyonun ise 1998 yılında gerçekleştiği görülmektedir. 1998 yılındaki yakıt miktarlarında olan düşüş emisyonların düşüşünü açıklamaktadır.



Şekil 2.25: 1990-2016 yılları arası 1 ton klinker üretimi başına düşen CO₂ emisyonları

2.5.6. Çimento Üretiminde Mevcut En İyi Teknikler (MET)

Mevcut en iyi teknikler (Best Available Techniques/BAT) terimi; emisyonları ve çevresel etkileri önlemek, önlemenin mümkün olmadığı durumlarda, emisyon ve çevreye etkileri azaltmak amacıyla tasarlanmış olan en etkili ve ileri aşamadaki teknikler olarak tanımlanmaktadır. Bunlar emisyon limit değerleri için uygulanan tekniklerin, uygulamaların kontrolünü ve uygulama yöntemlerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. En iyi kavramı, çevrenin en üst düzeyde korunması için en etkili olanı içermektedir. BAT dokümanları, ilgili sanayi sektöründe uygulamaları mümkün olacak şekilde Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü (IPPC) Direktifi kapsamında yayınlanmaktadır. Doküman, kullanılan teknolojileri, tesisin tasarımını, inşa edilmesini, bakımını ve işletilmesi veya devre dışı bırakılması ile ilgili teknikleri içermektedir. Çimento sektöründe yeni kurulacak olan tesislerin tasarlanması ve işletilmesinde “Çimento, Kireç ve Magnezyum Oksit Üretimi için Mevcut En İyi Teknikler Referans Kılavuzu” kaynak doküman olarak kabul edilmektedir [42].

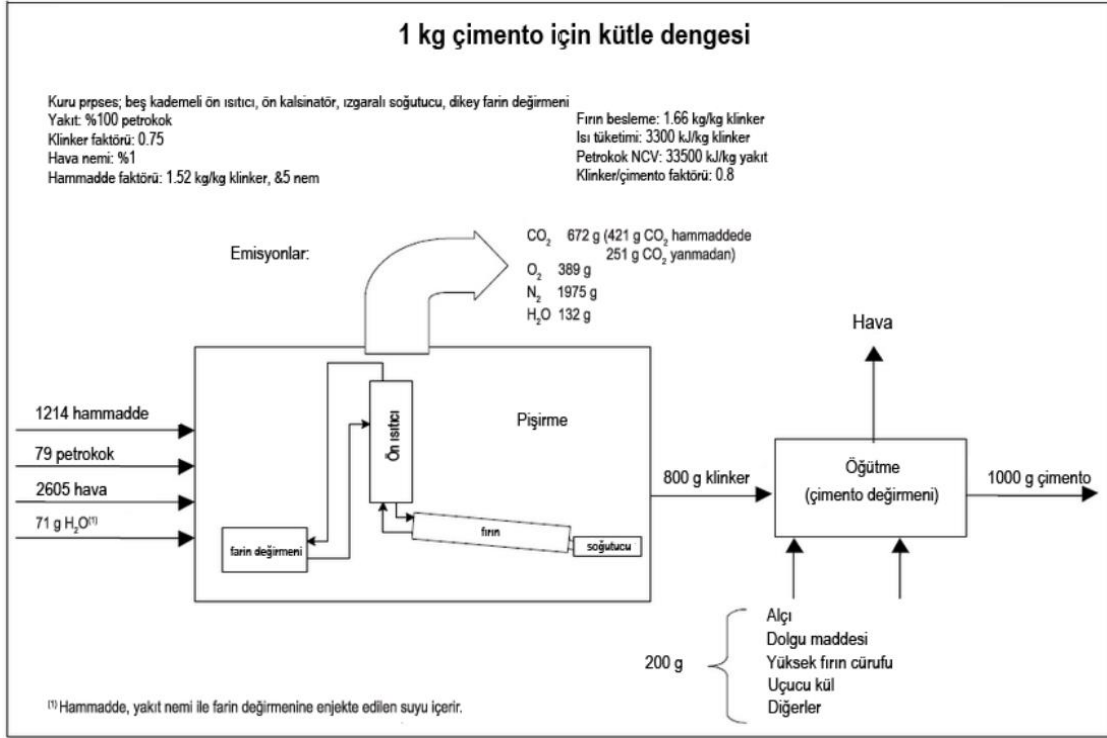
2.5.6.1. Çimento Üretimindeki Mevcut Tüketim ve Emisyonlar

Çimento üretiminde havaya yapılan emisyonlar ve enerji kullanımı temel çevresel konulardır. Yakıtların depolanması ve taşınması, toprak ve yeraltı suları için potansiyel kirlilik kaynağıdır. Sisteme giren ve çıkan kütle bileşenlerini değerlendirmek için kütle dengesi önemlidir. Bir çimento tesisi, farin değirmeni, ön ısıtıcı, fırın ve soğutucu sisteminden oluşmuş ise Çizelge 2.18’de verilen girdi ve çıktıları sahiptir [36].

Çizelge 2.18: Çimento tesisindeki sistemin girdi ve çıktıları

Girdiler	Çıktılar
Hammaddeler (konvansiyonel ve/veya atık)	Klinker
Enerji (yakıtlar, elektrik enerjisi)	Proses kayıpları / atığı (filtre tozları)
Su (hammadde nemi, yakıt nemi, hava nemi ve farin değirmeninde su enjeksiyonu)	Havaya yapılan emisyonlar (toz, NO _x , SO _x vb)
Hava (birincil hava, nakil havası, soğutma havası ve kaçak hava)	Suya yapılan emisyonlar
Yardımcı maddeler (mineral katkıları, ambalaj malzemeleri)	

1 kg çimento üretimindeki kütle dengesi Şekil 2.26’da paylaşılmıştır. Kütle dengesinde proses tipi kuru ve yakıt olarak %100 petrokok kullanımı baz alınarak oluşturulmuştur [36].



Şekil 2.26: Kuru proses kullanıldığında 1 kg çimento üretimi için kütle denkliliği [36].

Çimento üretimi sırasında hava ve gürültü emisyonlarına ek olarak, atık kullanımından kaynaklanan kokular da ortaya çıkabilmektedir. Çimento üretim prosesinde yer alan katı maddelerin, hammaddenin ve yakıtların (atık yakıtlar dahil) taşınması ve depolanması gibi adımlardan kaynaklanan hava kirletici emisyonların türleri ve nerelerden kaynaklandıklarını anlamak, emisyon azaltımı için önemli bir nokta oluşturmaktadır.

IPPC Direktifi, çimento üretiminde dikkate alınması gereken temel hava kirleticileri şu şekilde belirlemiştir.

- Azot oksitler (NO_x) ve diğer azot bileşikleri
- Kükürt dioksitler (SO₂) ve diğer kükürt bileşikleri
- Toz
- Toplam organik bileşikler (TOC), uçucu organik bileşikler (VOC) dahil
- Poliklorlu dibenzo-p-dioksinler ve dibenzofuranlar (PCDD ve PCDF)
- Metaller ve bileşikleri
- Hidrojen florür (HF)
- Hidrojen klorür (HCl)
- Karbon monoksit (CO)

Çimento üretiminde, fırın sisteminden kaynaklanan emisyonlar en önemli emisyonlardır. Bunlar hammadde ve yakıtların yanmasında gerçekleşen fiziko-kimyasal tepkimeler sonucu meydana gelmektedir. Çimento fırınından çıkan ana bileşenler; yanma kaynaklı azot, CaCO_3 'ün kalsinasyonu ve yakıt yanması kaynaklı CO_2 , yanma prosesi ve hammaddelerden kaynaklanan su buharı ve oksijen fazlasıdır.

Fırın sistemlerinde, katı maddelerin hareket yönü sıcak yanma gazlarına doğru ters akıntı şeklindedir. Bu ters akıntı, kirletici emisyonlarını etkilemektedir. Hammaddenin klinkere dönüştürülmesi veya yakıtların yanması ile meydana gelen pekçok bileşen, ters akıntı halinde hareket eden hammadde tarafından absorblanabilmektedir. Bunların yanı sıra taşıma ve öğütme işlemleri sonucu hammaddeler, katı yakıtlar ve ürün gibi diğer kaynaklardan toz emisyonları oluşmaktadır. Hammaddenin ve katı yakıtların dışarıda depolanması, çimento ürünlerinin yüklenmesi gibi iletim sistemlerinin de toz emisyonu potansiyeli bulunmaktadır. Bu sistemler iyi tasarlanmadığı veya korunmadığı durumlarda emisyonların büyüklüğü önemli olabilmekte ve ciddi sorunlara yol açabilmektedir [36].

Hava kirletici emisyonlarının nerelerden kaynaklandıklarını tek tek başlık altında inceleyelim.

Karbondioksit (CO_2): Çimento üretiminde 3500-5000 MJ/ton klinker için, özgül ısı ihtiyacına göre, 900-1000 kg CO_2 /ton klinker emisyon salımı olduğu tahmin edilmektedir (yakıt türüne bağlıdır). Çimentonun mineral ilave edilerek öğütülmesi, ton çimento başına CO_2 emisyonları azalmaktadır. Çünkü emisyonların yaklaşık %62'si kalsinasyon prosesinden geri kalan %38'i yakıtların yanmasından kaynaklanmaktadır. Yakıtların karbon içeriği ve kalorifik değerinin oranı ile yakıt kaynaklı emisyonlar doğru orantılıdır. Yanma kaynaklı CO_2 emisyonları, yakıtı daha verimli kullanan fırın prosesleri ile son 25 yılda yaklaşık %30 oranında azalmıştır.

CO_2 emisyonları, iklim değişikliği açısından büyük öneme sahiptir. Çimento sektöründe hem proses hem de enerji ihtiyacı için büyük oranlarda CO_2 salınımı yapılmaktadır. Bu nedenle, emisyonların azaltılmasına yönelik önlemler alınması gerekmektedir. Bu önlemler başlıca; yakıtların verimli kullanımı, kuru fırın tipi üretim prosesi seçimi, atıkların alternatif yakıt ve hammadde olarak kullanımı, mineral katkı içerikli çimento üretimi olarak sıralanabilir [36].

Azot oksitler (NO_x): Klinker pişirme prosesi yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği için, NO_x lerin oluşumuna neden olmaktadır. Yanma işlemi sırasında yakıt azotun alev içerisinde

oksijen ile birleşmesi ya da hava azotunun yanma havası içinde oksijen ile birleşmesi sonucu oluşan NO_xler hava kirliliği açısından büyük öneme sahiptir.

NO_x oluşumuna iki kaynak sebep olmaktadır.

- Termal NO_x: yanma havası içerisinde bulunan azotun bir bölümü oksijen ile reaksiyona girerek, çeşitli azot oksitleri oluşturmaktadır. Fırın içindeki alev, azot oksit oluşumunun ana mekanizmasıdır. 1050 C°'nin üzerindeki sıcaklıklarda oluşmaktadır.
- Yakıt NO_x: azot bileşenleri içeren yakıtların, hava ile reaksiyona girmeleri sonucu çeşitli NO_x'lerin oluşmasıdır.

Çimento döner fırını egzoz gazlarının içindeki azot oksitlerin %95'i NO ve %5'ini N₂O'ler oluşturmaktadır [36].

Kükürt dioksitler (SO_x): Çimento tesislerinden kaynaklanan SO₂ emisyonları, hammadde ve yakıt içindeki uçucu kükürt içeriğine ve kullanılan prosesin tipine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. SO₂, klinkerin içindeki CaSO₄ ve diğer kombine bileşikler, toz gibi fırın sistemlerinin farklı noktalarından salınmaktadır. Kükürdün büyük bir kısmı klinkerin içerisinde yerleşir veya proses tarafından sistem dışına atılır. Organik sülfür içeren hammaddeler kullanıldığında ve hemen oksitlenebilir olduğunda, yüksek SO₂ emisyonları gözlemlenebilmektedir. Sönmüş kireç Ca(OH)₂ kullanımı gibi ikincil kontrol önlemleri kullanılmasıyla emisyonlar önemli ölçüde azaltılabilir. SO₂ emisyonlarının %40 – 85'i ön ısıtıcıda CaCO₃ tarafından tutulmaktadır. Ön ısıtıcıda tutulmayı etkileyen en önemli iki parametre; ham gazın toz içeriği ve en üst siklon kademesindeki ham gazın oksijen konsantrasyonudur. Fazla oksijen Normal salınan tüm sülfür bileşiklerini fazla oksijen ile hemen okside olarak SO₂ formuna geçmektedir [36].

Karbon monoksit (CO): Klinker pişirme işlemi aşamasında meydana gelen CO emisyonları, hammadde yoluyla giren küçük miktarlardaki organik bileşenlerdir. Bu emisyonlar, fırına beslenen malzemelerin ön ısıtılması sırasında okside olarak CO ve CO₂'ye dönüşmektedir. Ayrıca, CO emisyonları ikincil ateşlemede meydana gelen yetersiz yanma ve uygun olmayan pişirme koşullarından da kaynaklanabilir. Klinker pişirme prosesi, klinker kalitesi nedeniyle fazla hava ile çalıştırılması gereken bir prosestir. Bu nedenle yüksek sıcaklıklar yakıtın tümüyle yanmasına yol açar. Hammaddeye bağlı olarak, 1 kg klinker için prosese 1,5-6 gr organik karbon girmektedir. Hammaddenin içerisi bulunan organik

bileşiklerin %85-95'i, %3 oksijen varlığında CO₂'ye dönüştüğü, kalan kısmının ise CO'ya dönüştüğü testler ile tespit edilmiştir [36].

Toz: Çimento üretiminde partikül maddeler ve fırın bacalarından salınan toz emisyonları en önemli çevre konulardan biridir. Toz emisyonlarının ana kaynakları; hammadde hazırlama işlemi (farin değirmeni), öğütme ve kurutma üniteleri, klinker pişirme süreci (fırınlara ve klinker soğutucuları), yakıt hazırlama bölümleri ve çimento öğütme üniteleri (değirmenler) dir. Bunların yanı sıra, hammaddenin kırılması, hammadde konveyörleri ve elevatörleri, hammadde ve çimentonun depolanması, öğütme değirmenleri, yakıtların depolanması ve çimento yükleme işlemleri, gibi yan proseslerden de toz emisyonları yayılabilmektedir.

Kırma ve öğütme, sevkiyat gibi toza sebep olan işlemlerde kullanılan ekipmanlar torbalı filtreler ile donatılmaktadır. Modern elektrostatik çökticilerin ve torbalı filtrelerin tasarımı ile toz emisyonları ciddi boyutta azaltılabilmektedir [36].

Toplam organik bileşikler (TOC): Uçucu organik bileşikler ve CO yanma sürecindeki yetersiz yanma sonucu meydana gelmektedir. Ön ısıtıcı ve ön kalsinatörlere beslenen farinin içerisindeki organik maddenin ısınması sonucu uçucu organik madde (VOC) emisyonu oluşmaktadır. 400 – 600 C° arasındaki sıcaklıklarda organik madde salınımı gerçekleşmektedir [36].

PCDD ve PCDF: Fırın ve prosesin tasarımı, yanma koşulları, fırına besleme özellikleri, emisyonları kontrol eden ekipmanların türü ve çalışmasına bağlı olarak çeşitli formasyon mekanizmalarının bir araya gelmesi sonucu oluşur. PCDD ve PCDF emisyonlarının oluşabilmesi için beş faktörün eş zamanlı olarak olması gerekmektedir. Bunlar; hidrokarbonlar, klorürler, katalizör, uygun sıcaklık (200 – 450 C°) ve uygun sıcaklıkta uzun alıkonma süresidir [36].

Metaller ve bileşikleri: Yakıtlar ve hammaddeler genellikle metal içeriklidir. Metaller ve bileşikleri, uçuculuklarına ve tuzlarına bağlı olarak dört sınıfa ayrılabilir.

- Uçucu olmayan veya ateşe dayanıklı metaller (Cu, Fe, As, Ba, Ag, Be, Al, Ni, Cr, Ca, Ti, V ve Mn)
- Yarı uçuculuğa sahip veya bu tür bileşikleri içeren metaller (Na, Se, Sb, K, Cd, Zn ve Pb)
- Talyum (uçucu)
- Civa (uçucu)

Klinker pişirme prosesinde metallerin davranışları ve emisyonları; uçuculuğa, hammaddeler ve yakıtların metal içeriğine, proses türüne ve ana baca üzerindeki toz toplama sisteminin çökeltme verimliliğine bağlıdır. Uçucu olan metaller ön ısıtıcı ve/veya döner fırının sıcak bölgelerinde tamamen veya kısmen buharlaşabilirler. Uçucu olmayanlar ise prosesin içinde kalarak çimento klinker bileşiminin parçası olarak fırından çıkar [36].

Hidrojen klorür (HCl) ve hidrojen florür (HF): Klorid ve floridler küçük bileşenler olup, fırın sistemine hammadde ve/veya yakıt gibi girdiler ile girebilirler. Bu maddeler için düzenli periyodik izleme yapılması uygundur [36].

2.5.6.2. Mevcut En İyi Teknikler

Bu başlıkta tez kapsamına uygun olarak; BREF dokümanında [36] çimento üretimine yönelik paylaşılan tekniklerden CO₂ emisyonlarını azaltmaya veya önlemeye yönelik olanlar paylaşılabacaktır.

Enerji verimliliği: Enerji kullanımı; termal enerji kullanımı ve elektrik enerjisi kullanımı olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir. Fırın sistemi için en iyi termal koşullar belirlenerek enerji kullanımı azaltılabilmektedir. Yeni yapılacak olan tesisler ve büyük ölçekli değişikliklerde, entegre kalsinatör veya tersiyer hava kanalına sahip çok kademeli (4 -6 kademeli) siklon ön ısıtıcılı fırın sistemleri standart teknik olarak düşünülmektedir. Ön ısıtıcılardaki siklon sayısı yakıt ve hammaddenin nem oranına bağlı olarak belirlenir. Termal enerji optimizasyonu tesisin değişik ünitelerinde uygulanabilmektedir. Optimizasyon teknikleri ünite bazında aşağıda sıralanmıştır.

- ✓ Soğutucu: modern klinker soğutucuların kullanımı. Eşit soğutma havası dağılımı yapacak yüksek akış direnci meydana getiren soğutucu plakaların kullanımı. Izgara bölümlerine kontrollü şekilde soğutma havası sağlanması.
- ✓ Fırın: yüksek kapasiteli fırın kullanımı. Uzunluk/çap oranının optimize edilmesi. Yakıt türüne göre fırın tasarımı. Fırın ateşleme sistemlerinin optimizasyonu. Tersiyer hava kanalı. Giren hava sızıntısının azaltılması. Çok kademeli ön ısıtıcılı ve prekalsinatörlü kuru proses fırınlarının kullanımı.
- ✓ Ön ısıtıcı: siklonlardaki basınç kaybının düşük olması ve yüksek ısı geri kazanım derecesinin sağlanması. Siklon kademeleri (3 – 6 siklon).
- ✓ Malzeme elleçleme: hammadde ve yakıtlarda nem içeriğinin düşük olması. Yüksek kalorifik değere sahip kolay yanabilen yakıt kullanımı. Fırına beslenen malzemenin homojen olması.

✓ Değirmenler: değirmenlerin birleşik çalışması.

Bunlara ek olarak; çimentodaki klinker oranının azaltılması, enerji tüketimini ve çimentonun birim kütlesi başına düşen emisyonları azaltmak için kullanılan bir tekniktir. Bu azaltım öğütme aşamasında, dolgu maddelerini (kül, uçucu kül, kireçtaşı, cüruf ve puzolan vb.) ve ilave edilecek maddeleri ekleyerek yapılmaktadır. Elektrik enerjisinin kullanılması, güç yönetim sistemleri kurulumu, klinkerin ufalanmasında kullanılan ekipmanlarda enerji tasarruflu olanlarının seçilmesi ve eski hammadde değirmenlerinin yerine yeni değirmenlerin kullanılmasıyla enerji tüketimi asgari düzeye indirilebilir. Proses kontrolü optimizasyonunun da elektrik enerjisi azaltımında olumlu etkileri olduğu görülmüştür [36].

Fırınlarda ve soğutuculardan/ kojenerasyondan enerji geri kazanımı: Çimento üretiminde prensip olarak, buhar ve elektrik için kojenerasyon ve enerji santrallerinin kullanımı uygulanmaktadır. Bunun sebebi ısı ve elektrik ihtiyacının aynı anda olmasıdır. Fazla ısı çoğunlukla, klinker soğutucusundan ve fırından çıkan gazlardan geri kazanılmaktadır. Klinker soğutucularından veya fırından çıkan gazların geri kazanılan fazla ısıları, bölgesel ısıtmada kullanılmaktadır. Isının geri kazanılmasıyla; buhar ve elektriğin beraber üretilmesi, enerji maliyetlerinin azalması ve emisyonların azaltımı sağlanabilmektedir [36].

Atıkların yakıt olarak kullanımı: Atıklar yeterli (net) kalorifik değeri ve belirli spesifikasyonları sağladıkları takdirde çimento fırınlarında fosil yakıtlar yerine kullanılabilir. Atıklar genellikle klinker pişirme prosesi için belirli bir ön arıtmadan sonra kullanılabilir. Fırın çalışması ve emisyonları etkileyebilecek atık yakıtların seçiminde; fiziksel ve kimyasal kriterler belirleyici rol oynamaktadır. Atık yakma işleminde tehlikeli atıkların kullanımında güvenlik yöntemi dikkate alınmalıdır. Ön arıtmaya tabi tutulan atık yakıtların kullanımında kendi kendine tutuşma potansiyeli olanlar için güvenlik önlemleri düşünülmelidir. Ekonomik olarak değerlendirildiğinde, atık yakıt kullanımı işletme maliyetlerini azaltabilmektedir. Çimento üretiminde enerji kullanımı, üretim maliyetlerinin % 30-40' ını oluşturmaktadır. Atık yakıtlar, fosil yakıtlara göre daha ucuz olabilmektedir [36].

Atıkların yakıt olarak kullanımı, CO₂ emisyonları açısından da önem taşımaktadır. Tehlikeli veya tehlikesiz nitelikte olan atıklar çimento fırınlarında kullanılmadıklarında, düzenli depolama veya vahşi depolama alanlarında (katı atık bertaraf alanı) bertaraf edilmesinin yanı sıra; fosil yakıt tüketiminin devamlılığını sağlayarak doğal kaynak tüketiminin artmasına yol açmaktadır. Atıklar, katı atık bertaraf alanlarında hem CO₂ oluşumuna yol açmakta hem de

geniş alanların bertaraf bölgesi olarak kullanılmasına sebep olmaktadır. Çimento fırınlarında atık yakma işlemi ile doğal kaynak tüketimi azaltılırken, hem bertaraf bölgelerinin kullanımı hem de bu alanlardaki atıkların oluşturduğu CO₂ emisyonları azaltılmış olacaktır.

Hammadde olarak atıkların kullanımı: Klinker pişirme prosesinde atıkların hammadde olarak kullanımı, büyük miktarda hammaddenin yerini geçmesini sağlayabilir. Ancak, hammadde olarak kullanılacak atıklar klinker pişirme prosesi için gereken özellikleri, kimyasal element ve bileşenleri içermek zorundadır. Atıkların hammadde olarak kullanımı ile doğal kaynak kullanımı azaltılabilmektedir [36].

2.5.6.3. Uygulama Örnekleri

İklim değişikliği açısından CO₂ emisyonları büyük önem taşımaktadır. Küresel boyutta önlem alınması gereken konuların başında gelen sera gazı emisyonlarının azaltılması artık günümüzde, her sektörde uygulanmaya başlamıştır. Çimento sektörü de enerjinin çok kullanıldığı sanayilerden biri olarak, CO₂ emisyonlarına ciddi derecede katkı sağlamaktadır. Çimento üretiminde, CO₂ emisyonlarının azaltımı için uygulanmış olan çeşitli uygulamalar bu başlık altında incelenmiştir.

a) Alternatif yakıt ve hammaddeler: Çimento üretiminin yüksek miktarlarda yenilenemez doğal kaynaklardan elde edilen hammadde ve yakıt tüketimi gerektirmektedir. İspanya’da bulunan Cemex firması, yenilemez kaynakların azaltılması için fosil yakıtlarını, alternatif yakıtlar ile değiştirmiştir. Avrupa’da yer alan Cemex tesisleri alternatif yakıt kullanımı ile enerji değişim oranlarında % 80’lere ulaşmıştır.

Alternatif yakıtların kullanılması için iki yeni tesis kurulmuştur. Tesislerde yapılan işlemler fırınlarda kullanılan alternatif yakıtların boşaltılması, nakliyesi ve dağıtımıdır. Proje; besleme hunisi, taşıyıcı bantlar, torba filtreler, malzeme süzgeci, iki terazili depolama silosunun, ölçüm cihazlarının ve fırınların brülörlerine pnömatik taşıma sisteminin (kilit ve üfleme) kurulumundan oluşmaktadır. Sistemin tamamı, partiküllerin malzeme transferi sonucu atmosfere yayılmasını önlemek için bir parçacık toplama ve azaltma sistemi ile donatılmıştır.

Buna ek olarak, klinker ve çimento üretim proseslerinde alternatif hammadde kullanılmasına yönelik projelerde yapılmıştır. Yeni bir cüruf taneleme tesisi kurulmuş ve yüksek fırın cürufunu çimento üretimi için alternatif hammadde (katkı maddesi) olarak kullanmıştır. Cürufun düşük öğütülebilirliği ve nem içeriğinden dolayı, öğütme tesisinde ayrı olarak öğütüldükten sonra çimentoya katılması gerekmektedir. Bu sayede, fırınlardan kaynaklanan

partikül ve CO₂ emisyonlarını azaltılmaktadır. Yıllara göre alternatif yakıt kullanımı Çizelge 2.19’da ve hammadde kullanım miktarları Çizelge 2.20’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.19: Yıllara göre alternatif yakıt tüketimleri (ton)

YAKIT TÜKETİMİ (ton)										
	Geleneksel yakıtlar			Alternatif Yakıtlar						
	Kok	Akaryakıt	Kömür	Düşük kaliteli kömür	Pirinç çeltiği	Ponza	Zeytin ağacı dalı	Bitkisel döküntü (budama)	Talaş	ATY
2006	189.088	409	0	3.007	7.614	1.230	197	3.379	0	0
2007	124.784	491	86.588	5.610	5.356	1.694	62	1.022	0	0
2008	95.596	455	48.303	2.374	3.969	1.640	579	4.985	0	0
2009	114.164	407	0	0	5.860	0	0	30.180	12.933	9.367

Çizelge 2.20: Yıllara göre alternatif hammadde tüketimleri (ton)

ALTERNATİF HAMMADDE TÜKETİMİ (ton)						
	Çamur	Kum	Moloz	Cüruf	Endüstriyel Çamur	Seramik
2008	1.310	604	6.118	3.557	8.940	0
2009	2.623	627	706	5.009	23.558	5.296

Bu çalışmaların sonucu olarak; Sera gazı emisyonlarının azaltılması, fosil yakıt tasarrufu ve katı atıkların toprağa girmesi azaltılmıştır [43].

b) Klinker üretiminde, kanalizasyon arıtma çamurunun alternatif yakıt olarak kullanımı; Proje kapsamı önceden kurutulmuş arıtma çamurunun klinker üretim fırınında alternatif yakıt olarak kullanımıdır. Kurutulmuş arıtma çamuru 3000-4000 kcal/kg ısı değer ve 0,6-0,7 t/m³ yoğunluğa sahiptir. Bu değerler, fosil yakıtların yerine kullanılması için ideal değerlerdir. Bu projenin iki yararı bulunmaktadır. Birincisi; alternatif yakıt olarak kurutulmuş arıtma çamurunun kullanımı ile kok kömürü gibi çevreye olumsuz etkisi daha çok olan maddelerin yakılması engellenmiştir. Böylece, doğal kaynak kullanımının azaltılmasına ve Kyoto Protokolünde belirtilen sera gazı emisyonlarının azaltılması hedefine de katkı sağlamaktadır. İkincisi; arıtma çamurunun giderilmesi ile atığın toprağa gitmesi ve

diğer çevre dostu olmayan uygulamaların önlenmesi sağlanmıştır. Arıtma çamurunda bulunan biokütle nedeni ile toplamda tahmini CO₂ tasarrufu 15.500 t/yıl olmuştur.

Sonuç olarak; çamur kurutmada tüketilen enerji, yakıt tüketiminin azalması ve depolama sahası bertarafına (toprağa gönderme) ihtiyaç duyulmaması düşünüldüğünde, CO₂ emisyonlarında tahmini 130.000 t/yıl azaltım sağlanmıştır [44].

c) Arıtma çamurunun kurutulması için fırın gazı artık ısısının kullanımı; Türkiye’de bulunan Nuh Çimento fabrikası 250 ton/gün kapasiteli evsel ve endüstriyel atıksu arıtma tesisinden çıkan arıtma çamurlarını baca gazlarından geri kazandığı ısı ile kurutarak, tesis için alternatif yakıt kaynağı oluşturmuştur. Kurutulan çamurun kalorifik değeri 2500-3500 kcal/kg değerindedir. Kurutulmuş olan arıtma çamurunun kullanılması ile yılda 30.000 ton CO₂, çamur kurutma işlemini atık ısı ile yapılması ile de yılda 10.000 ton CO₂, atıklarında katı atık depolama alanlarında oluşturacağı metan emisyonlarını engelleyerek yılda 30.00 ton CO₂ emisyonunu engellemiştir [45].

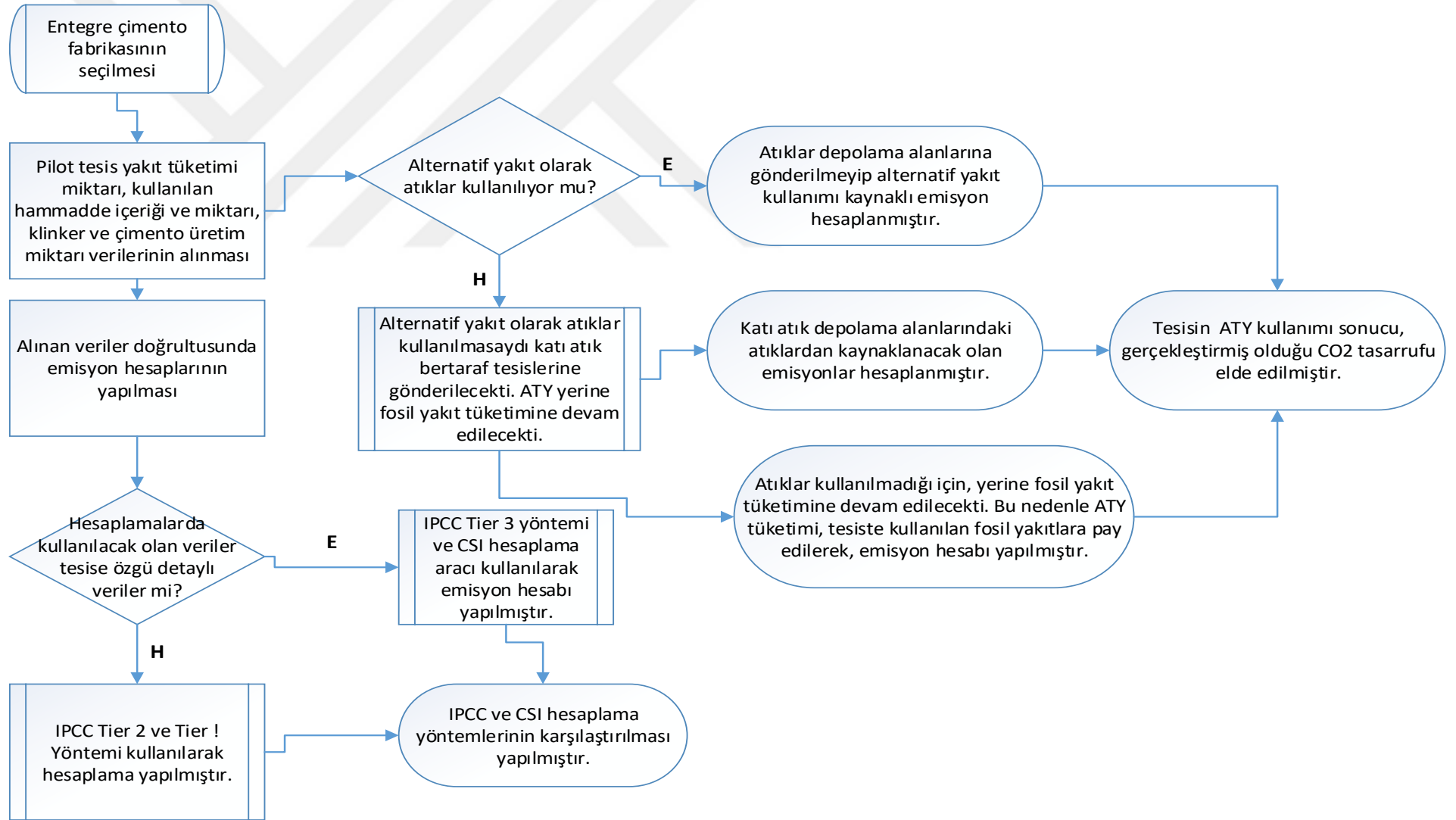
d) Atık ısı geri kazanımı; Klinker üretimi esnasında ön ısıtıcıdan ve klinker soğutmadan 350C° – 400C° sıcaklıklardaki atık ısı ile 340 C°’de düşük basınçlı buhar elde edilerek, tek noktadan türbine iletilmektedir. Bu şekilde atık ısıdan elektrik üretilerek, tesisin elektrik ihtiyacının bir bölümü karşılanmaktadır. Üretilen enerji ise 40.000 konutun enerji tüketimine eşittir. Bunun yanı sıra atık ısının geri kazanılması sonucu yılda 76.000 ton CO₂ azaltımı sağlanmıştır [45].

3. MATERYAL VE METOT

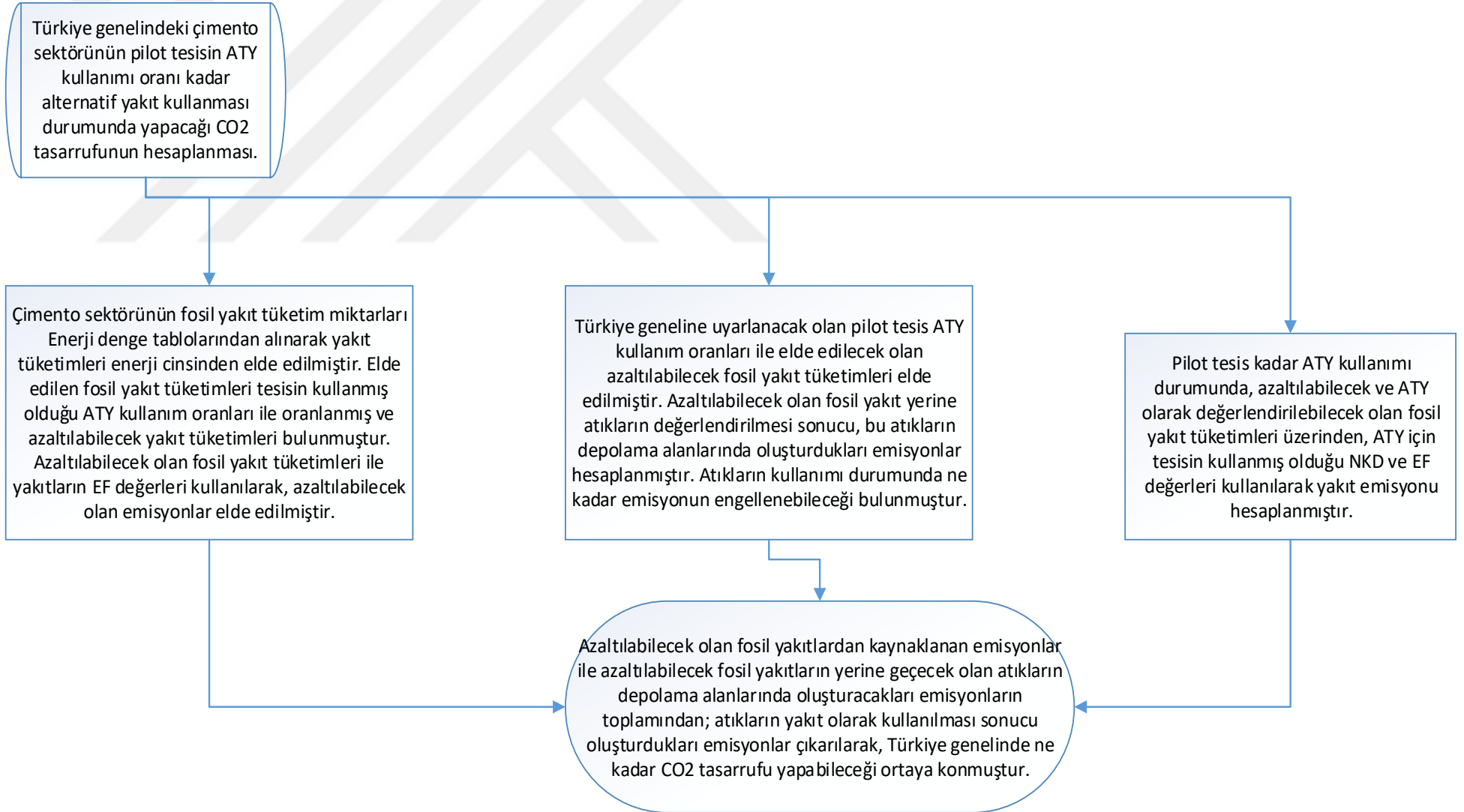
Çalışma kapsamında çimento ve klinker üretimi yapan entegre bir tesis seçilecek ve ilk olarak tesisten kaynaklanan sera gazı emisyonlarını hesaplama için tesisten alınan veriler kullanılmış olup, temin edilemeyen veriler için IPCC varsayımları kabul edilmiştir. Hesaplamalarda olarak öncelikle IPCC'nin oluşturduğu Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerin yanı sıra Çimento Sürdürülebilirlik Girişiminin yapmış olduğu hesaplama aracı kullanılmış ve tüm yöntemlerin karşılaştırması yapılmıştır.

Pilot tesis seçiminde alternatif yakıt kullanımı olan ve klasik bir atık yakma ünitesine sahip entegre fabrika olmasına özen gösterilmiştir. Tez çalışmasının ikinci adımı olarak atıkların yakıt olarak kullanılmayıp, toprağa gönderilmesi halinde oluşacak olan emisyonlar değerlendirilmiştir. Tesis mevcut durumda kullanmakta olduğu alternatif yakıt olan atıklar yerine fosil yakıt tüketimine devam etmesi durumunda oluşacak emisyonlar bulunmuş, ayrıca atıklar yakılmayıp depolama alanlarına gönderilmesi durumunda da emisyonu sebep olacağı için, bu alanlardaki emisyonları da hesaplanmıştır. Daha sonrasında tesisin ATY kullanması sonucu oluşturduğu emisyonlar, depolama alanlarında oluşan ve fosil yakıt tüketimine devam edilmesi durumunda oluşan emisyonlardan çıkarılarak, tesisin yapmış olduğu CO₂ tasarrufu ve kazançları bulunmuştur. Şekil 3.1'de tez kapsamı için oluşturulmuş akış şeması verilmiştir.

Son olarak tesisin ATY kullanım oranları Türkiye geneli çimento sektörüne uyarlayarak için çeşitli senaryolar oluşturulmuştur. Senaryolar ile sektörün aslında ne kadar fosil yakıt tüketimini azaltabileceği, ne kadar atığın depolama alanlarına gönderilmesinin engellenebileceğini ve toplamda ne kadar CO₂ tasarrufunun olabileceği ortaya konmaya çalışılmıştır. Türkiye için yapılacak olan Türkiye senaryoları için akış şeması Şekil 3.2' de paylaşılmıştır.



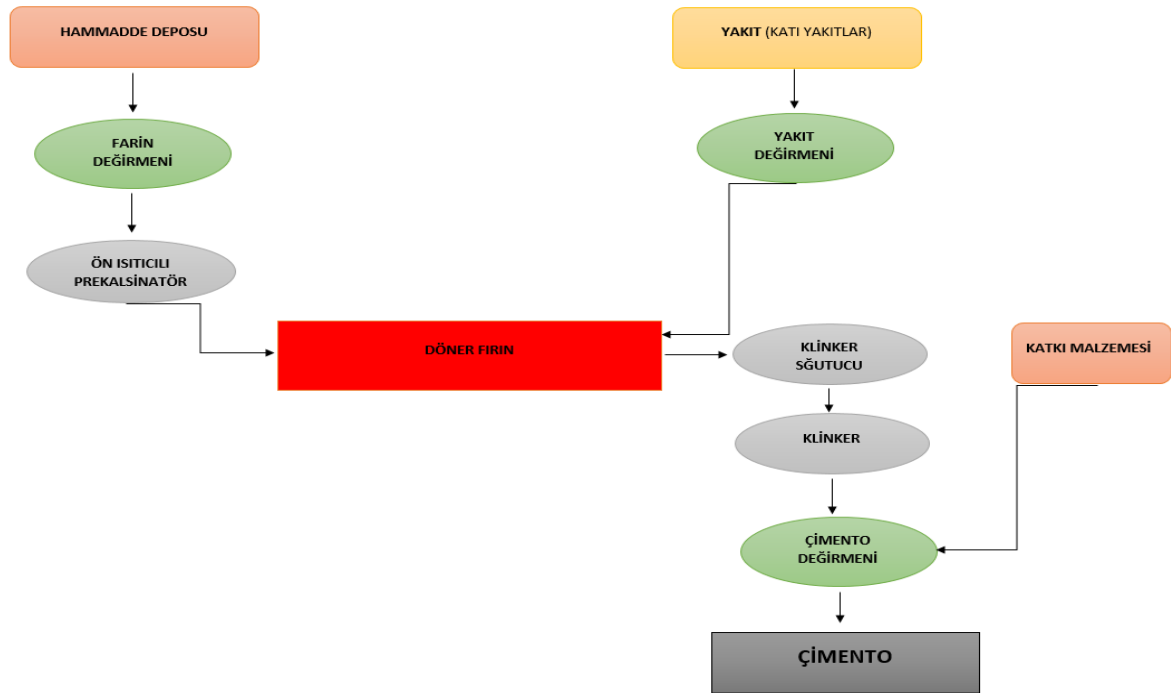
Şekil 3.1: Tez kapsamı için oluşturulmuş akış şeması



Şekil 3.2: Türkiye senaryoları için oluşturulmuş akış şeması

3.1. Pilot Tesis Bilgileri

Klinker üretimi döner fırında yüksek sıcaklıklarda yapılmakta olduğu için, çimento sanayi enerji yoğun sektörlerin başında gelmektedir. Pilot tesis olarak, atık yakma ünitesine sahip entegre bir çimento üretim tesisi seçilmiştir. Bunun en önemli sebebi tesiste klinker üretiminin yapılmasıdır. Çünkü çimento üretiminden kaynaklanan emisyonların büyük kısmı klinker üretimi aşamasında oluşmaktadır. Tesis için basitleştirilmiş akış şeması Şekil 3.3’de paylaşılmıştır.



Şekil 3.3: Çimento üretimi akış şeması

Seçilmiş olan pilot tesis tüm Türkiye’de mevcut bulunan 72 adet entegre çimento fabrikasından biridir, ayrıca Türkiye’ de atık bertarafı konusunda öncü firmalardan biridir. Tesiste kurulu olan atık yakma ünitesi ile fırın için gerekli olan enerjinin bir kısmı atıklardan elde edilmektedir.

3.1.1. Yakıt ve Hammadde Kaynakları

Hammadde olarak kullanılan kalker, kil ve demir cevherini tesis kendi ocaklarından temin etmektedir. Doğal katkı malzemesi olarak ise; alçı, kalker ve tras; alternatif katkı malzemesi olarak da; seramik ve alçı atıkları ilave edilmektedir.

Fosil yakıt olarak; kömür, linyit, petrokok ve doğalgaz kullanılmaktadır. Fosil yakıtlardan kömür ve petrokok ithal edilirken, doğalgaz ve linyit yerli tedarikçilerden temin

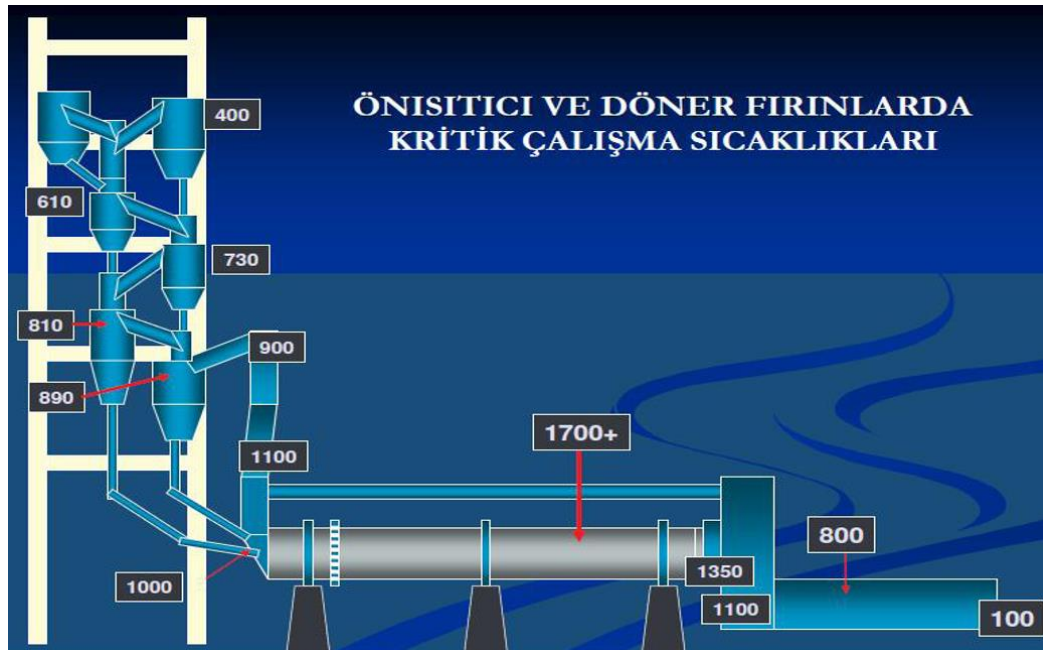
edilmektedir. Fosil yakıtlara ek olarak, atıklardan türetilmiş alternatif yakıt (endüstriyel atık), ömrünü tamamlamış lastikler, fuel oil atıkları kullanılmaktadır. Atıklardan türetilmiş olan alternatif yakıtların kullanımına 2013 yılında başlayan tesis, bu sayede fosil yakıt kullanımı azalmıştır. Tesisin 2015, 2016 ve 2017 yıllarında çimento üretiminde kullandığı hammadde miktarları ve içerikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Tesiste yıllara göre kullanılan kalker miktarı ve içeriği

YIL	Kullanılan Kalker (ton)	*Kalkerin CaCO ₃ içeriği (%)		
		min	max	ort
2015	2.087.483,00	45	55	50
2016	2.179.062,00	45	55	50
2017	1.604.517,00	45	55	50

3.1.2. Üretim (Proses) Teknikleri

Pilot tesiste ön ısıtıcı ve prekalsinatörlü döner fırın kullanılmaktadır. Bu sistemler enerji tüketimi anlamında en düşük sistemlerdir. Tesiste 2 adet ön ısıtıcı ve prekalsinatörlü döner fırın bulunmaktadır. Döner fırınların çapı 3,6 m olup, uzunlukları sırasıyla 52m ve 55m dir. Döner fırınlar 3 bölgeden oluşmaktadır. Ön ısıtıcı ve döner fırınlarda kritik çalışma sıcaklıkları Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4: Ön ısıtıcı ve döner fırınlarda kritik çalışma sıcaklıkları

- **Ön ısıtıcı kule ve kalsinatör:** Hammaddelerin öğütülmesi sonucu oluşan farinin fırına ilk beslendiği bölümdür. Ön ısıtıcı kule farklı siklon kademelerinden oluşmaktadır. Malzeme en üst siklondan pişme prosesine beslenirken, yanma gazları da aynı bölgeden kuleyi terk etmektedir. Farin en üst siklondan, alt siklonlara hareket ederken, sıcak gaz ile kalsinasyona uğramaktadır. Kalsinasyon: farin içerisindeki kalsiyum karbonatın kalsiyum oksit ve karbondioksit olarak bozunması işlemidir. Bu şekilde malzeme fırında pişmeye hazır hale getirilmektedir. En üst kademenin sıcaklığı 300-350 C° iken, en alt kademe de sıcaklık 950 – 1000 C° olmaktadır. Ön ısıtıcı kule ve kalsinatör sistemi kullanımı ile farin fırına girmeden önce %95-98 oranında kalsine olmaktadır.
- **Döner fırın:** Siklonların son bölümünden sonra malzeme döner fırına geçmektedir. Fırın ayarlanabilen devirle dönmekte ve %3- 4,5 eğime sahip bir ekipmandır. Klinker reaksiyonları ve pişme bu bölümde gerçekleşmektedir. Fırın içerisindeki sıcaklık 1450-1500 C° arasındadır. Pişme için gereken ısı fırının son bölgesine yerleştirilmiş olan alev borusu ile sağlanmaktadır. Alev borusuna yakıt hava ile iletilmekte ve fırına yüksek bir hızla pulvarize olarak püskürtülmektedir.
- **Soğutma ünitesi:** Pişirilmiş olan klinker yaklaşık 1250 C° sıcaklık ile soğutuculara iletilir. Soğutma ünitesinde fanlar yardımı ile içeriye hava basılarak klinkerin sıcaklığı 120-200 C°'ye kadar soğutulur. Böylelikle klinker pişirme işlemi tamamlanmış olur.

Çimento üretiminde ara ürün olarak kabul edilen klinker oluşumu tamamlandıktan sonra silolara alınmaktadır. Üretilcek olan çimento türüne göre silolardan alınan klinker çimento değirmenlerinde katkı maddeleri ile öğütülmekte ve çimento elde edilmektedir. Son olarak üretimi tamamlanan çimento torbalı veya dökme olarak sevk edilmektedir.

3.1.3. Çimento ve Klinker Üretim Miktarı

Seçilmiş olan pilot tesis, hem klinker üretimi hem de çimento üretiminin yapıldığı entegre bir çimento fabrikasıdır. Üretilen çimento dökme olarak veya torbalı olarak satışa sunulmaktadır. Tesiste bulunan iki adet fırının toplam klinker üretim kapasitesi 3.850 ton/gün' dür. Tez kapsamında emisyon hesabı için baz alınan 2015, 2016 ve 2017 yıllarında tesiste üretilen toplam klinker ve çimento miktarı Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2: Tesiste yıllara göre üretilen klinker ve çimento miktarları (ton)

YILLAR	Toplam üretilen klinker miktarı (ton)	Toplam üretilen çimento miktarı (ton)
2015	1.350.748	1.109.748
2016	1.405.817	1.173.902
2017	1.304.573	1.200.990

3.2. IPCC Kılavuzu ile Emisyon Hesaplama Yöntemi

IPCC Kılavuzu; Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine (UNFCCC) istinaden ülkelerin sera gazı envanterlerini tahmin edebilmeleri için oluşturulmuş bir kılavuz rehberdir. Ülkeler bu envanteri kullanarak sera gazı hesaplamalarını yaparak, UNFCCC'ye raporlamaktadırlar.

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli olarak bilinen IPCC hazırlamış olduğu rehber ile, ülkelere ulusal sera gazı emisyon envanterlerini eksiksiz bir şekilde oluşturmaya olanak sağlamaktadır. Kılavuz, emisyonların güvenilir şekilde tahmin edilmesi ve bu gazların uzaklaştırılmasını sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. En basit hali ile, bir ülkenin sadece ulusal faaliyet verilerini sağlayarak hesap yapabilmesi için, tüm sektörler için gerekli olan çeşitli parametreleri ve emisyon faktörlerinin varsayılan değerlerini sunmaktadır. Bunun yanı sıra kılavuz, daha fazla bilgi ve kaynağa sahip olan ülkeler için ülkeler arasında uyumluluk, karşılaştırılabilirlik ve tutarlılığı koruyarak, ülkeye özgü metodolojilerin kullanmasına da olanak sağlamaktadır [46].

Emisyonların hesaplanmalarında 3 yöntem belirlenmiştir. Bunlar sırası ile Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 olarak adlandırılmaktadır. IPCC kılavuzu yakıt tüketiminden kaynaklanan emisyonların hesaplanmasında “Cilt 2: Enerji” kılavuzuna yönlendirme yaparken, endüstriyel işlemlerden kaynaklanan proses emisyonları için “Cilt 3: Endüstriyel Prosesler ve Ürün Kullanımı” kılavuzuna yönlendirme yapmaktadır.

Tez kapsamında 2015, 2016 ve 2017 yılları için emisyon hesabı yapılmıştır. Hesaplamalar; yakıt ve proses emisyonları başlıklarında ayrı ayrı değerlendirilmiş, en son yılların toplam emisyon değerleri elde edilmiştir. Hesaplama yöntemleri ile ilgili detaylar; yakıt emisyonları için 3.2.1 bölümünde, proses emisyonları için ise 3.2.2 bölümlerinde detaylı şekilde açıklanmıştır.

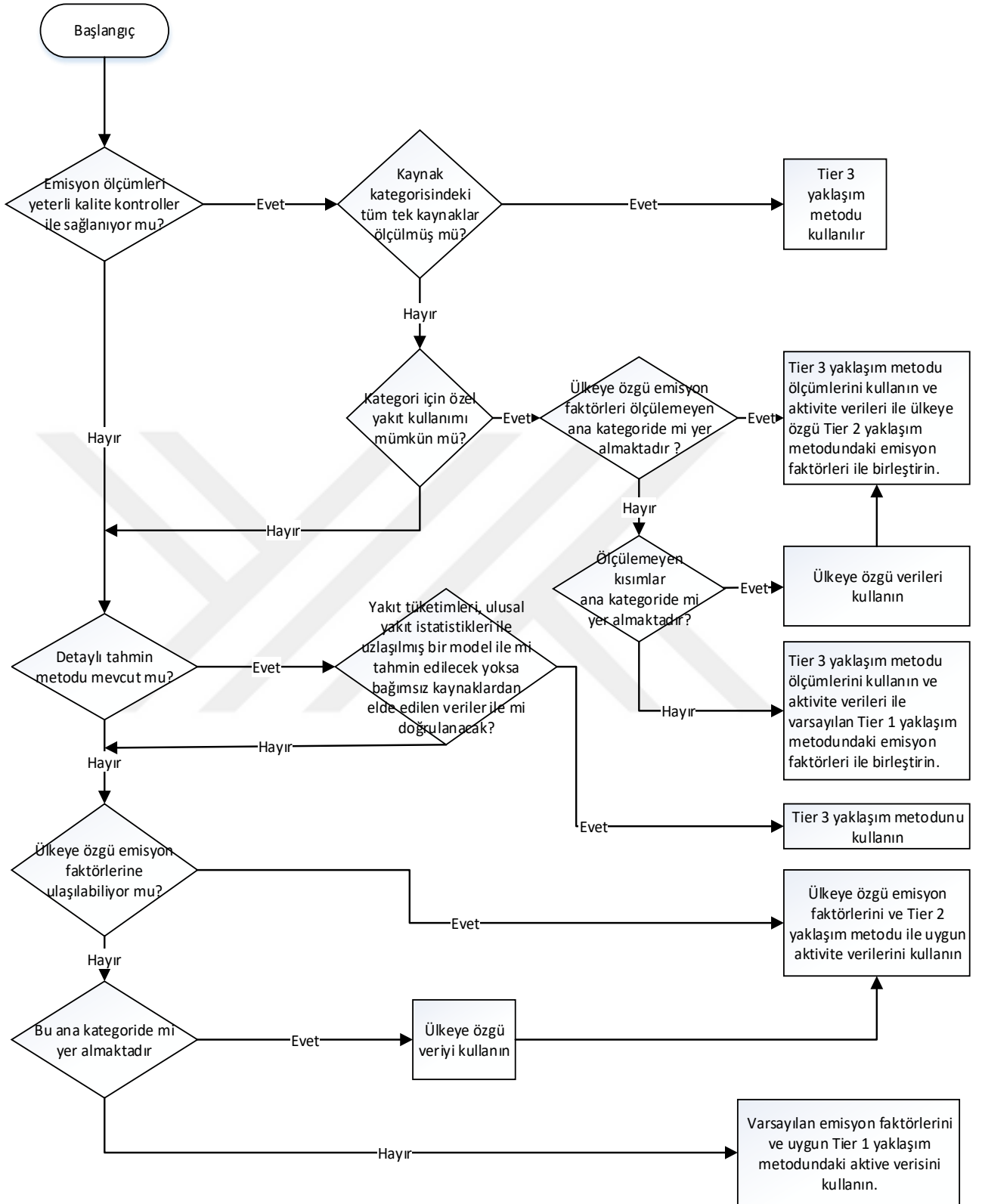
3.2.1. Yakıt Emisyonlarının Hesaplanması

Yakıt emisyonlarının hesaplanmasında kullanılacak olan yöntem seçiminde Şekil 3.5’te verilen karar ağacı kullanılmaktadır. Burada asıl önemli olan emisyon hesabı yapılan sektörün, ülke genelinde “ana kategori” de olup olmadığına karar verilmesidir. Çimento sektörü enerji yoğun sektör olması nedeniyle, Türkiye için ana kategoride yer almaktadır. Ancak tez kapsamında tüm hesaplama yöntemleri kullanılmış, hesaplamalar arasında karşılaştırma ve değerlendirmeler yapılmıştır. Hesaplamaların yapılabilmesi için tesiste kullanılan yakıt miktarlarının düzenli olarak takip edilmesi ve kayıt altına alınarak envanter oluşturulması gerekmektedir. Tez için yapılacak olan hesaplamalarda, tesisten alınmış olan 2015, 2016 ve 2017 yıllarına ait veriler kullanılarak yakıt emisyonları hesaplanmıştır.

Yakıt tüketimine bağlı oluşan sera gazı emisyonlarının hesaplanması; kullanılan yakıt miktarına bağlı olarak yakıtın türüne göre belirlenmiş olan emisyon faktörü ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. Tesiste kullanılan yakıt miktarları Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3: Tesiste kullanılan yakıt türleri ve miktarları

Yakıt Tipi	Yakıt Tüketimi (ton)		
	2015	2016	2017
Taş Kömürü	12.237	36.958	6.453
Linyit	30.722	21.270	20.771
P.Kok	86.046	76.783	57.704
ÖTL	1.034	0	0
ATY	46.062	58.503	75.264
Fuel Oil (Atık yağ)	491	0	0
Doğalgaz	492	641	164
Dizel	54	56	65



Şekil 3.5: Yakıt emisyonlarının hesaplanmasında kullanılacak olan yöntem seçimi için karar ağacı [47].

3.2.1.1. Tier 1

Tier 1 yöntemi en basit ve en az veri gerektiren hesaplama yöntemidir. Bu metotla emisyon hesabı yapılabilmesi için, tesiste kullanılan yakıt miktarı ve IPCC kılavuzunda tanımlanmış olan “varsayılan değer” emisyon faktörüne ihtiyaç duyulmaktadır. IPCC kılavuzunda her yakıt türü için farklı emisyon faktörleri belirlenmiştir. Kullanılan yakıt türüne göre kullanılan emisyon faktörü (kg/TJ) “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gases Inventories, Volume 2 Chapter 2, Table 2.3 [47]” te tanımlanmış “varsayılan değer”lerden seçilmiştir. Yakıt emisyonlarının hesaplanması Eş. 3.1 de gösterildiği gibi yakıta ait EF ve tüketilen yakıtın miktarının çarpılması ile elde edilmiştir.

$$E_{yakıt} = Y_{T_{yakıt}} * EF_{yakıt} \quad (3.1)$$

Burada;

$E_{SGE, yakıt}$ = Verilen SGE’ nun yakıt türüne göre emisyonu (kg)

$Y_{yakıt}$ = Yakılan yakıt miktarı (TJ)

$EF_{yakıt}$ = Verilen SGE’ nun yakıt türüne göre varsayılan emisyon faktörü (kg/TJ).

Eş 3.1’de görüldüğü gibi yakıt tüketimi TJ cinsinden olması gerekmektedir. Kütle cinsinde verilen yakıt tüketimini enerji cinsine çevirebilmek için, yakıtların net kalorifik değerleri (NKD) kullanılmıştır. Yakıtlara ait net kalorifik değerler (TJ/Gg) için “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gases Inventories, Volume 2 Chapter 1, Table 1.2 [48]” de belirlenmiş olan *varsayılan değer*lerden seçilmiştir. Tesiste kullanılan yakıtlar ile ilgili IPCC kılavuzunda ulaşılamayan değerler için kabuller yapılmıştır. Kabul edilen ve IPCC den alınan EF ve NKD *varsayılan değerleri* Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Birden fazla yakıt türü kullanılan tesislerde, tüketilen yakıtlar için ayrı ayrı EF ile işlem yapılarak her yakıt türü için SGE miktarı bulunur. Daha sonrasında tesisin yakıt emisyon miktarı tüm yakıtların emisyonlarının Eş. 3.2’de verildiği gibi toplanması ile elde edilir.

$$E_{SGE} = \sum_{yakıt} E(SGE, yakıt) \quad (3.2)$$

Çizelge 3.4: Yakıtlar için IPCC den alınan ve kabul edilen değerler

Yakıt Türü	EF (kg/TJ) ⁽¹⁾			NKD ⁽²⁾ (TJ/Gg)
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Taş Kömürü	98.300	10	1,5	26,7
Linyit	101.000	10	1,5	11,9
P.Kok	97.500	3	0,6	32,5
ÖTL ⁽³⁾	85.000	-	-	31,5
ATY ⁽⁴⁾	83.000	-	-	10,0
Fuel Oil ⁽⁵⁾ (Atık yağ)	73.300	30	4	40,2
Doğalgaz ⁽⁶⁾	56.100	1	0,1	48,0
Dizel	74.100	3	0,6	43,0

(1) EF (kg/TJ); IPCC Volume.2, Chapter 2, Table 2.3: Default Emission Factors for stationary combustion in manufacturing industries and construction 'den alınmıştır [47]

(2) NKD (TJ); IPCC Volume.2, Chapter 1, Table 1.2: Default Net Calorific Values (NCVs) and lower and upper limits of the 95% confidence intervals 'den alınmıştır [48]

(3) Ömrünü Tamamlamış Lastikler (ÖTL) için EF değeri Cement Sustainability Initiative (CSI)'in yayınlamış olduğu değer olan 85 kg CO₂/ GJ [49] değeri kabul edilmiştir. Ancak NKD için CSI'de değer bulunmadığı için "Atık Taşıt Lastikleri ve Değerlendirme Yöntemleri" adlı makaleden 31,5 TJ/Gg olarak alınmıştır [50].

(4) Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY); tesiste yakılan atıkların büyük çoğunluğu endüstriyel atıktır, bu nedenle EF değeri CSI kılavuzunda belirtilen Endüstriyel atıklar için olan değerler kabul edilmiştir. Ancak CSI' de endüstriyel atıklar için belirlenmiş NKD olmadığı için, IPCC kılavuzunda biyokütle içerikli olmayan belediye atıkları için belirlenmiş olan net kalorifik değerler [48] kullanılmıştır.

(5) Fuel Oil içeriği atık olan yağlar olduğu için IPCC de belirtilmiş olan Atık Yağ değerleri kullanılmıştır.

(6) Doğalgaz değeri m³ cinsinden verilmiş olduğu için, doğalgazın yoğunluğu 0,678 kg/m³ kabul edilmiştir.

3.2.1.2. Tier 2

Tier 2' nin Tier 1'den farkı, EF' nin üretim gerçekleştirilen ülkeye özgü emisyon faktörlerinin kullanılmasıdır. Yapılan hesaplamalarda kullanılan emisyon faktörleri Türkiye'nin UNFCCC'ye 14.04.2018'de yayınlamış olduğu CRF (common reporting format) tablolarından [51] alınmıştır. CRF tabloları, UNFCCC'ye raporlama yapan tüm ülkeler için ortak bir raporlama formatıdır.

Ülkemizdeki emisyon faktörlerinde yakıt ayrımı sadece katı, sıvı, gaz ve diğer fosil yakıt başlıkları altında yapılmış olduğundan, kullanılan yakıtların kimyasal özelliklerine göre EF değerleri seçilmiştir. Seçilmiş olan ve yıllara göre değişiklik gösteren EF değerleri Çizelge 3.5'te verilmiştir. EF değerleri henüz raporlanmamış 2017 yılı için Çizelge 3.5'te verilen 2016 yılı değerleri kullanılmıştır. Yakıt tüketimleri TJ cinsinden ifade edilebilmesi için de Tier 1' de olduğu gibi "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gases Inventories, Volume 2 Chapter 1, Table 1.2" den Net Kalorifik Değerleri (NKD) seçilmiştir. Çünkü Türkiye sera gazı emisyon hesaplarında IPCC kılavuzundan seçmiş olduğu NKD kullanılmaktadır. Bu nedenle Tier 1 için kullanılan NKD değerleri Tier 2 için de

kullanılmıştır. Tier 2 yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamada Tier 1’ de kullanılan Eş 3.1 kullanılmıştır.

Çizelge 3.5: Yıllara göre yakıtlar için kabul edilen EF değerleri (kg/TJ)

YILLAR	2015			2016		
Yakıt Türü	EF ⁽²⁾ (kg/TJ)			EF ⁽²⁾ (kg/TJ)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Taş Kömürü	95.015,26	10,00	1,50	93.380,12	10,00	1,50
Linyit	95.015,26	10,00	1,50	93.380,12	10,00	1,50
P.Kok	95.015,26	10,00	1,50	93.380,12	10,00	1,50
ÖTL ⁽³⁾	141.394,19	30,00	4,00	-	-	-
ATY ⁽⁴⁾	141.394,19	30,00	4,00	137.679,84	30,00	4,00
Fuel Oil ⁽⁵⁾ (Atık yağ)	97.012,25	3,00	0,60	-	-	-
Doğalgaz	55.090,56	1,00	0,10	56.044,21	1,00	0,10
Dizel	97.012,25	3,00	0,60	96.741,07	2,99	0,60

(1) CRF tablolarında en son yıl 2016 olduğu için, 2017 yılı değerleri 2016 yılında verilen değerler ile aynı kabul edilmiştir.

(2) Emisyon Faktörü; Türkiye'nin Nisan 2018'de UNFCCC'de yayınlanmış olan CRF tablosu non- metallic minerals sekmesindeki yakıtlar (katı, sıvı,gaz ve diğer fosil yakıtlar) için belirlenmiş olan emisyon faktörleri kullanılmıştır.

(3) ÖTL için Emisyon faktörü CRF tablosundaki diğer fosil yakıt değerleri kabul edilmiştir.

(4) Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY); Emisyon faktörü CRF tablosundaki diğer fosil yakıt değerleri kabul edilmiştir.

(5) Fuel Oil için Emisyon faktörü CRF tablosundaki sıvı yakıt değerleri kabul edilmiştir.

3.2.1.3. Tier 3

Tier 1 ve Tier 2, kullanılan yakıtlar için ortalama bir emisyon faktörü kullanımı ile elde edilen hesaplama yöntemleridir. Ancak emisyonlar aslında aşağıda sıralanan parametrelere bağlı olarak değişim göstermektedir.

- Kullanılan yakıt türü
- Yanma teknolojisi
- Çalışma koşulları
- Kontrol teknolojileri
- Yakıtın yandığı ekipmanın yaşı

Tier 3 yaklaşımında, yakıt yanma istatistikleri üzerine farklı olasılıkları dikkate alır ve bu farklılıklara bağlı emisyon faktörlerini kullanmaktadır. Teknolojiye bağlı değişkenler ve parametreler kullanılarak yapılan hesaplama Eş. 3.3 ile elde edilmektedir. Eşitlikteki

teknoloji; emisyonları etkileyebilecek herhangi bir cihaz, yanma süreci veya yakıt özelliği anlamına gelmektedir [47].

$$E_{SGE,yakıt} = \sum_{teknoloji} (YT_{yakıt, teknoloji} * EF_{SGE,yakıt, teknoloji}) \quad (3.3)$$

Burada;

$E_{SGE,yakıt, teknoloji}$ = Verilen SGE' nun yakıt ve teknoloji türüne göre emisyonu (kg)

$YT_{yakıt,teknoloji}$ = Her teknoloji için yakılan yakıt miktarı (TJ)

$EF_{yakıt,teknoloji}$ = Verilen SGE'nun yakıt ve teknoloji türüne göre emisyon faktörü (kg/TJ).

Tier 3 yöntemi, hesaplama yapılan ülkedeki sera gazı emisyon kaynakları içerisinde ana kategori olarak belirlenen sektör veya uygulamalar için kullanılması zorunlu olan hesaplama yöntemidir. Bu yöntem tesise özgü değerleri kullanmaktadır. Çimento sektörü Türkiye'de enerji yoğun sektör olması sebebi ile ana kategori içerisinde yer almaktadır. Bu nedenle tez kapsamında çimento sektörü seçilmiştir.

Tier 3 yöntemi ile yapılan hesaplamalarda yakıtlara ait pilot tesisten alınmış olan tesise özgü NKD ve EF kullanılmıştır. Tesisten alınan değerler 2015, 2016 ve 2017 yılları için Çizelge 3.6'da verilmiştir.

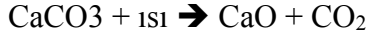
Çizelge 3.6: Tesisin 2015, 2016 ve 2017 yıllarına ait tesis EF (ton/TJ) ve NKD (GJ/ton)

Yakıt Türü	EF CO ₂ (ton/TJ)			NKD(GJ/ton)		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017
Taş Kömürü	101,0	101,0	101,0	25,96	25,96	25,96
Linyit	101,0	101,0	101,0	24,28	24,28	24,28
P.Kok	97,5	97,5	97,5	33,91	33,91	33,91
ÖTL	85,0	85,0	85,0	20,93	20,93	20,93
ATY	75,0	75,0	75,0	14,65	15,3	13,8
Fuel Oil (Atık yağ)	73,3	73,3	73,3	33,49	33,49	33,49
Doğalgaz	56,1	56,1	56,1	35,17	35,17	35,17
Dizel	74,1	74,1	74,1	41,8	41,8	41,8

3.2.2. Proses Emisyonlarının Hesabı

Çimento üretimi için CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ minerallerinin belirli oranlarda olması gerekmektedir. Bu nedenle; homojenize edilmiş kalker, kil ve demir cevheri öğütülerek farin

haline getirilmekte ve daha sonra döner fırınlara beslenerek klinker elde edilmektedir. Klinker çimentonun ara ürünüdür. Pişirme işlemi klinker elde edilmesi esnasında yapılması nedeniyle, çimento üretimindeki proses emisyonlarının kaynağı klinker oluşumunda açığa çıkmaktadır. Döner fırında; kalker ısı ile kireç (CaO) ve CO₂'e dönüşmektedir.

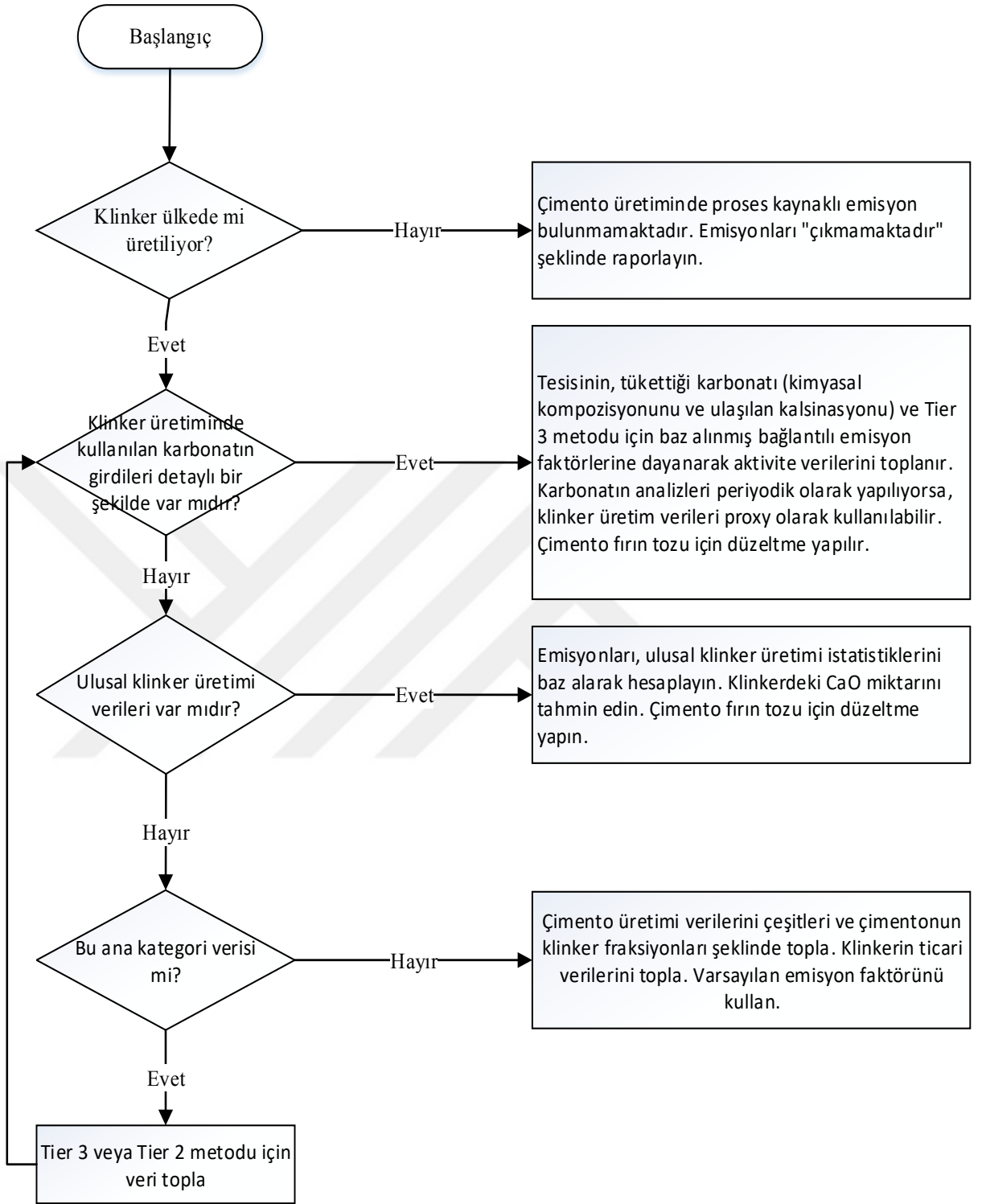


Proses emisyonlarının hesaplanmasında kullanılacak yöntemin belirlenmesinde Şekil 3.6'te verilen karar ağacı kullanılmaktadır. Karar ağacı, ulusal koşullara göre en uygun hesaplama yönteminin seçilmesine yardımcı olmaktadır. Ancak tez kapsamında IPCC kılavuzunda açıklanmış olan Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 hesaplama yöntemlerinin hepsi kullanılarak proses emisyonları hesaplanmış ve aralarındaki farklılıklar açıklanmıştır.

Tier 1 yönteminde emisyonlar, ithal edilen ve ihraç edilen klinker miktarları düzenlenmiş çimento üretim verilerinden elde edilen klinker üretim tahminlerine dayanarak yapılan hesaplama. Klinker ithalatı ve ihracatı hesaba katılmadan, doğrudan çimento üretiminden kaynaklanan emisyonların tahminini yaptığı için iyi bir uygulama yöntemi olarak kabul edilmemektedir.

Tier 2 yönteminde emisyonlar, direk klinker üretim verileri ve ulusal veya varsayılan emisyon faktörleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

Tier 3 yönteminde ise emisyonlar, tüm yakıt ve hammaddeden kaynaklanan karbonat girdileri, karbonatlar için olan emisyon faktörü ve ulaşılabilen kalsinasyon fraksiyonu ile hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım tesise özgü verilere dayanmaktadır. Eğer tesis düzeyinde veriler belirsiz ise Tier 2 yöntemi tercih edilmelidir [52].



Şekil 3.6: Proses emisyonlarının hesaplanmasında kullanılacak olan yöntem seçimi için karar ağacı [52].

3.2.2.1. Tier 1: Çimento üretim verilerinin kullanılmasıyla klinker üretiminin hesaplanması

Tier 1, karbonat girdi verileri veya üretilen klinker verisi olmadığında çimento üretim verileri kullanılarak yapılan hesaplama yöntemidir. Bu yöntemde üretilen çimento türleri ve miktarları ile bunların klinker içerikleri, klinker ihracatı ve ithalatı verilerinde gerekli olan düzeltmeler yapılır. Klinker ihracat ve ithalatının hesaplanması, emisyonların hesaplanmasında önemli bir faktördür. İthal edilen klinkerden kaynaklanan emisyonlar hesaba katılmaz. Çünkü üretildiği ülkenin emisyonlarının hesabında yer almaktadır. İhraç edilen klinkerden kaynaklanan emisyonlar ise, üretildiği ülkenin emisyon hesabına katılmalıdır.

Tier 1 yöntemi ile yapılan hesaplama Eş. 3.4 ile elde edilir.

$$CO_2 \text{ Emisyonu} = [\sum_i (M_{ci} * C_{cli}) - Im + Ex] * EF_{clc} \quad (3.4)$$

Burada;

CO_2 Emisyonu = Çimento üretiminden kaynaklanan CO_2 emisyonu (ton)

M_{ci} = i türünde üretilen çimento miktarı (ton)

C_{cli} = i türünde çimentonun klinker fraksiyonu

Im = İthal edilen klinker tüketimi (ton)

Ex = İhraç edilen klinker (ton)

EF_{clc} = Çimentoya özgü klinker için emisyon faktörü (ton CO_2 / ton klinker)

EF_{clc} = 0,52 ton CO_2 /ton klinker kabulü yapılmıştır. Bu değer IPCC Volume 3 Chapter 2’de yer alan eşitlik 2.4’ten alınmıştır [52]. Tesiste üretilen klinker ve çimento miktarları bölüm 3.1.3’te yer alan Çizelge 3.2’de verilmiştir.

3.2.2.2. Tier 2: Klinker üretim verilerinin kullanımı

Eğer klinker üretiminde tüketilen karbonatlar için detaylı ve eksiksiz veriye (ağırlıkları ve kompozisyonları dahil) ulaşılamıyorsa, klinkerdeki CaO içeriği verileri ve ulusal klinker üretim verileri kullanılması iyi bir uygulama olarak düşünülmektedir. Tier 2 metodu klinker üretim verilerini kullanarak hesaplama yöntemi sunmaktadır. Karbonat içeriğine net ulaşılamayan tesisler için proses emisyonu Eş. 3.5’te gösterildiği gibi üretilen klinker

miktarının, klinker için belirlenmiş olan emisyon faktörü ve çimento fırın tozunun (CKD) düzeltme faktörü ile çarpılması ile elde edilir.

$$CO_2 \text{ Emisyonu} = M_{cl} * EF_{clc} * CF_{ckd} \quad (3.5)$$

Burada;

CO_2 Emisyonu = Çimento üretiminden kaynaklanan CO_2 emisyonu (ton)

M_{cl} = Üretilen klinker miktarı (ton)

EF_{clc} = Klinker için emisyon faktörü (ton CO_2 / ton klinker).

CF_{ckd} = CKD için emisyon düzeltme faktörü.

CF değeri ise Eş. 3.6'da görüldüğü şekilde fırına geri döndürülemeyen çimento fırın tozu miktarı, çimento fırın tozundaki karbonat fraksiyonu, çimento fırın tozundaki kalsinasyon fraksiyonu ve çimento fırın tozunun emisyon faktörü verilerine dayanmaktadır.

$$CF_{ckd} = 1 + (M_d/M_{cl}) * C_d * F_d * (EF_c/EF_{cl}) \quad (3.6)$$

Burada;

CF_{ckd} = CKD için emisyon düzeltme faktörü.

M_d = Fırına geri döndürülmeyen CKD'nin miktarı (ton)

M_{cl} = Üretilen klinker miktarı (ton)

C_d = CKD' deki ilk karbonat fraksiyonu

F_d = CKD' deki ilk karbonatın kalsinasyon fraksiyonu

EF_c = Karbonat için emisyon faktörü (ton CO_2 / ton karbonat) (IPCC: Volume 3 Chapter 2 Table 2.1)

EF_{cl} = CKD için düzeltilmemiş klinker emisyon faktörü (ton CO_2 / ton klinker)

Pilot tesisin fırını kapalı sistem olduğu için $CKD = 0$ 'dır. Eş. 3.6'da CKD değeri yerine konulduğunda $CF = 1$ olarak elde edilmiştir. $EF_{clc} = 0,52$ ton CO_2 /ton klinker kabulü yapılmıştır. Bu değer IPCC Volume 3 Chapter 2'de klinker için belirlenen emisyon faktörü alınmıştır [52].

3.2.2.3. Tier 3: Giren karbonat verilerinin kullanılması

Tier 3 yöntemi tüketilen karbonatların emisyon faktörleriyle birlikte, klinker üretimi için tüketilen karbonatların miktarı ve türlerine bağlı verilerin biriktirilmesine dayanmaktadır. Tier 3 yöntemi fırına geri döndürülmeyen CKD içinde kalsine olmamış karbonatın çıkarılmasını içermektedir. CKD tamamen kalsine olmuş veya fırına tamamı geri döndürülüyorsa, CKD düzeltme faktörü 0' dır.

Karbonatlardan kaynaklanan emisyon, fırına geri döndürülemeyen kalsine olmamış CKD kaynaklı emisyon ve yakıt olmayan karbon içerikli maddelerden kaynaklanan emisyonlara dayanan Tier 3 metodu ile CO₂ emisyonu Eş. 3.7'de ki şekilde elde edilir.

$$CO_2 \text{ Emisyonu} = \underbrace{\sum_i (EF_i * M_i * F_i)}_{\text{Karbonatlardan kaynaklanan emisyon}} - \underbrace{M_d * C_d * (1 - F_d) * EF_d}_{\text{Fırına geri döndürülmeyen kalsine olmamış CKD kaynaklı emisyon}} + \underbrace{\sum_k (M_k * X_k * EF_k)}_{\text{Yakıt olmayan karbon içerikli maddelerden kaynaklanan emisyon}} \quad (3.7)$$

Burada;

CO₂ Emisyonu = Çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonu (ton)

EF_i = i türündeki karbonata özgü emisyon faktörü (ton CO₂ / ton karbonat) (IPCC: Vol.3 Chapter 2 Table 2.1) [52]

M_i = i türündeki karbonatın fırında tüketilen miktarı (ton)

F_i = i türündeki karbonat için ulaşılan kalsinasyon fraksiyonu. (klinker fırınında elde edilen sıcaklık ve kalma sürelerinde, klinker içerisine dahil edilen tüm maddelerin için kalsinasyon derecesi % 100 kabul edilebilir. Bu durumda F_i = 1 olmaktadır)

M_d = Fırına geri döndürülmeyen CKD'nin miktarı (ton)

C_d = Fırına geri döndürülmeyen CKD'deki ilk karbonat fraksiyonu

EF_d = Fırına geri döndürülmeyen CKD'deki kalsine olmamış karbonatın emisyon faktörü (ton CO₂ / ton karbonat)

M_k = k türündeki yakıt olmayan diğer karbon içerikli maddelerin miktarı (ton)

X_k = k türündeki yakıt olmayan hammadde içerisindeki toplam organik veya diğer karbon fraksiyonu

$EF_k = k$ türündeki karojen veya diğer yakıt olmayan karbon içerikli maddelerin emisyon faktörü (ton CO₂ / ton karbonat)

Tier 3 yöntemi özetle, tesise özgü analiz edilmiş olan verileri içermektedir. Kullanılan hammaddedeki karbon oranı, klinker üretiminde kullanılan fırın tipi, fırında gerçekleşen kalsinasyon kalitesi, yakıt dışında kullanılan hammaddelerdeki karbon içerikli maddelerin kullanılması önemli bir yer tutmaktadır. Seçilmiş olan pilot tesis kapalı sistem olarak çalıştığı için CKD değeri 0'dır. Bunun yanı sıra yakıt olmayan karbon içerikli herhangi bir madde kullanılmamaktadır.

3.3. CSI Hesaplama Yöntemi

Cement Sustainability Initiative (Çimento Sürdürülebilirlik Girişimi); 100'den fazla ülkede faaliyet gösteren 24 büyük çimento üreticisi tarafından oluşturulmuş küresel bir çalışmadır. Çimento Sürdürülebilirlik Girişimi ve Avrupa Çimento Araştırma Akademisi (ECRA) tarafından "Çimento CO₂ ve Enerji Protokolü: Çimento Sanayi için CO₂ ve Enerji Hesaplama ve Raporlama Standartı" geliştirilmiştir. Bu doküman emisyonları saydam bir şekilde sunmak amacıyla kullanıcılara, CO₂ emisyonlarının hesaplanması için uyumlaştırılmış metodoloji sunmaktadır. Dünya çapında çimento sektöründeki CO₂ emisyonlarının ölçülmesi ve raporlanması için uygun olan bir metodoloji olarak görülmektedir. Birçok uluslararası çimento firması bu yöntemi kullanmaktadır. CSI; CO₂ emisyonlarının hesaplanması için kullanıcılara bir "Excel Spreadsheet" adlı hesaplama aracı geliştirmiştir. Excel Spreadsheet'e istenilen veriler (tesis özelinde ölçümlenmiş ve analizi yapılmış olanlar) giriş yapıldığında, otomatik olarak CO₂ hesabı yapmaktadır. Hesaplamalar yakıt ve proses emisyonlarını ayrı ayrı gösterilmektedir [53].

3.4. Atık Emisyonu Hesabı

Atmosfere yayılan sera gazlarında, atık yönetimi de önemli bir rol oynamaktadır. Atık sektöründe sera gazı emisyonlarının büyük kısmını CH₄ emisyonları oluşturmaktadır. Belediye atıkları, endüstriyel atıklar ve diğer katı atıklar CH₄ kaynakları olarak sayılabilmektedir. Bu atıklar belediyenin katı atık bertaraf alanlarına (çöplüğe) gönderildiğinde, bu alanlarda emisyon oluşumuna sebep olmakta ve atmosferde sera gazı birikimine yol açmaktadır. Tez için seçilmiş olan pilot tesiste atıklar, alternatif yakıt kaynağı olarak kullanılarak, fosil yakıt tüketimi azaltılmaktadır. Bu sayede fosil yakıtlardan kaynaklanacak olan emisyonlarını azaltmasının yanı sıra katı atık bertaraf bölgelerine

gönderilecek olan atıkları yakarak, çöplükte oluşacak olan emisyonları da bir nebze engellemektedir. Bunun yanı sıra, tesiste yakıt olarak kullanılan atıkların büyük çoğunluğu endüstriyel içerikli tehlikeli atık olduğu için çevresel açıdan değerlendirildiğinde, büyük ölçüde toprak kirliliği de önlenmektedir.

Atık emisyon hesabının yapılmasının amacı; birlikte işleme yöntemi (fosil yakıt yerine atık kullanımı – atıklarının depolama alanlarına gönderilmemesi) ile ne kadar emisyon azaltımı yapıldığını, hesaplama yapılan 2015, 2016 ve 2017 yılları için gösterebilmektir. Tesiste 2014, 2015, 2016 ve 2017’de kullanılan ATY miktarları Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7: Yıllara göre kullanılan ATY miktarı (ton)

YIL	Atıktan Türetilmiş Yakıt Miktarı (ton)
2014	43.325
2015	46.062
2016	58.503
2017	75.264

Atık emisyonlarının hesaplanmasında “IPCC Volume 5: Atık” kılavuzunda tarif edilen yöntem kullanılmıştır. IPCC hesaplama yöntemine göre katı atık bertaraf tesislerinden (Solid waste disposal sites – SWDS) kaynaklanan CH₄ emisyonlarının hesaplanmasında atığın birinci dereceden bozunma/ayırışma (First order decay – FOD)’ya uğradığı kabul edilmektedir. Buna göre biyolojik olarak bozunmaya uğrayan atıklar, atık içeriğine göre değişebilen sürelerde, bozunma işlemi tamamlanana kadar sürekli olarak CH₄ emisyonu oluşturmaktadır.

FOD baz alınarak CH₄ emisyonu, Eş. 3.8 de gösterildiği gibi belirli bir yıla ait atık türü ile o yılda oluşan CH₄ ve oksidasyon faktörlerinin kullanılması ile elde edilmektedir [54].

$$CH_4 \text{ Emisyonu} = [\sum_x CH_{4\text{generated},T} - R_T] * (1-OX_T) \quad (3.8)$$

Burada;

CH₄ emisyonu = T yılı içinde yayılan CH₄, Gg

T = Envanter yılı

x = Atık türü veya kategorisi

R_T = T yılında kazanılan CH₄, Gg

OX_T = T yılındaki oksidasyon faktörü

Atık emisyonu hesaplanırken dikkat edilmesi gereken bir diğer parametre ise atığın içerisindeki parçalanabilir organik karbon miktarıdır (Degradable organic carbon – DOC). Çünkü organik karbonlar parçalandıkça CH₄ emisyonu salınımına yol açmaktadır. DOC değeri atığın kategorisine (belediye atığı, endüstriyel atık, çamur vb.) ve atığın türüne (kağıt, gıda, metal, tehlikeli vb.) göre belirlenmektedir. Atıklar karışık halde ise yığılmış (toplanmış) atık olarak DOC değeri hesaplanmaktadır.

Yığın halde (toplu atık) olan atıklar için DOC değeri, farklı türlerdeki atıkların organik karbon fraksiyonu ve atık miktarlarının çarpımı ile Eş. 3.9’da gösterilen şekilde elde edilmektedir [54].

$$DOC = \sum_i (DOC_i * W_i) \quad (3.9)$$

Burada;

DOC = Toplu atıktaki parçalanabilir organik karbonun fraksiyonu, Gg C / Gg atık

DOC_i = i türündeki atıktaki organik karbon fraksiyonu

W_i = Atık kategorisine göre i türündeki atık fraksiyonu

Seçilmiş olan pilot tesisimizde kullanılan atıklar farklı türde ve kategoride yer aldığı için DOC değeri Eş. 3.9 kullanılarak hesaplanmıştır. Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY) içeriğini; %82’sini tehlikeli atıklar, %18’ini tehlikesiz atıklar oluşturmaktadır. Tehlikesiz atıkların kağıt endüstrisi, gıda endüstrisi, kauçuk endüstrisi ve tekstil endüstrisi v.b atıklarını içermektedir. Tesiste kullanılan atıklar için DOC değeri hesaplanarak Çizelge 3.8’de verilmiştir. DOC_i verileri için; tesiste kullanılan atıklar endüstriyel içerikli olduğu için; IPCC Volume 5 Chapter 2 Table 2.5 tanımlanmış *varsayılan değerler* kullanılmıştır [55].

Çizelge 3.8: ATY için hesaplanan DOC fraksiyonu

Atıklar	DOC	DOC _i	W _i
Tehlikeli	0,00146	0,01	0,146
Gıda	0,04515	0,15	0,301
Tekstil	0,01128	0,24	0,047
Kağıt	0,0872	0,4	0,218
Kauçuk	0,00546	0,39	0,014
Diğer	0,00146	0,01	0,146
Yığın Atık	0,15201		

Atıklardan salınan CH₄ miktarının hesaplanması için öncelikle, ayrıştırılabilen parçalanabilir organik karbon miktarının (DDOC_m) hesaplanması gerekmektedir. Çünkü katı atık bertaraf tesisine gönderilen atıklar, içeriğindeki organik karbonun çözünürlüğüne ve parçalanabilirliğine göre CH₄ emisyonu oluşumuna sebep olmaktadır. Atık ne kadar bozunabilirliğe sahip ise, atmosfere vermiş olduğu CH₄ miktarı o kadar fazla olacaktır. DDOC_m miktarı Eş. 3.10’ da gösterildiği gibi; biriken atık miktarı, belirlenen yıl içerisindeki parçalanabilir organik karbon ve organik karbonun fraksiyonu ile biyolojik bozunma için CH₄ düzeltme faktörlerinin çarpılması sonucu elde edilir [54].

$$DDOC_m = W * DOC * DOC_f * MCF \quad (3.10)$$

Burada;

DDOC_m = ayrışabilen DOC miktarı, Gg

W = biriken atık miktarı, Gg

DOC = yıl içerisinde biriken parçalanabilir organik karbon, Gg C / Gg atık

DOC_f = parçalanabilen DOC fraksiyonu

MCF = yıl içerisinde biriken biyolojik bozunma için CH₄ düzeltme faktörü [54]. (IPCC Volume 5, Chapter 3 Tablo3.1)

DDOC_m hesaplaması 2014, 2015, 2016 ve 2017 yılları için Çizelge 3.9’da verilmiştir. Hesaplama da kullanılan MCF = 0,6 olarak IPCC kılavuzu [54] Volume 5, Chapter 3, Table 3.1’den kategorize edilmemiş olan katı atık bertaraf tesisi değeri alınmıştır. Atıkların ne tür bir bertaraf tesisine gideceği bilinmediğinden bu değer alınmıştır. DOC_f = 0,5 değeri ise yine aynı IPCC kılavuzunda [54] belirtilen yaygın olarak kullanılan varsayılan değer kabulü yapılmıştır.

Çizelge 3.9: Yıllara göre biriken DDOC_m miktarları (Gg)

YIL	Toplam Atık Miktarı (Gg)	DOC	DOC _f	MCF	DDOC _m (Gg)
2014	0,04332500	0,15201	0,5	0,6	0,00197575
2015	0,04606200	0,15201	0,5	0,6	0,002100565
2016	0,05850300	0,15201	0,5	0,6	0,002667912
2017	0,07526400	0,15201	0,5	0,6	0,003432264

DDOC_m değeri hesaplandıktan sonra katı atıkların bertaraf edildiği tesislerde (SWDS) biriken “DDOC_{ma}” miktarı ve parçalanmış olan “DDOC_{m decomp}” miktarı hesaplanmaktadır. Biriken DDOC_{ma}, parçalanma işlemi tamamlanmayan ve bir sonraki yılda da bozunma işlemi devam edecek olan atığı ifade etmektedir. DDOC_{m decomp} ise, belirtilen yılda tamamen ayrılmış olan atığı ifade etmektedir. Belirlenmiş bir envanter yılında DDOC_{ma} ve DDOC_{m decomp} sırasıyla Eş. 3.11 ve Eş. 3.12’de gösterildiği şekilde hem yıl içerisinde biriken hem de bir önceki yıldan bozunmaya devam eden atıkların, tepkime sabiti ile çarpılması ile elde edilir.

$$DDOC_{ma_T} = DDOC_{md_T} + (DDOC_{ma_{T-1}} * e^{-k}) \quad (3.11)$$

$$DDOC_{m decomp_T} = DDOC_{ma_{T-1}} * (1 - e^{-k}) \quad (3.12)$$

Burada;

T = envanter yılı

DDOC_{ma T} = T yılı sonunda SWDS de biriken DDOC_m, Gg

DDOC_{ma T-1} = T-1 yıl sonunda SWDS de biriken DDOC_m, Gg

DDOC_{md T} = T yılı içinde SWDS de biriken DDOC_m, Gg

DDOC_{m decomp T} = T yılında SWDS de parçalanan DDOC_m, Gg

k = tepkime sabiti (IPCC Volume 5, Chapter 3, Table 3.3, bulk waste)

t_{1/2} = yarılanma süresi

Son olarak atık alanında oluşan CH₄ miktarı Eş. 3.13’te gösterildiği gibi; parçalanan DDOC_m (DDOC_{m decomp}), çöplükte oluşan gazın fraksiyonu ve organik karbonun moleküler ağırlığı ile çarpılmasıyla elde edilir. Parçalanan DDOC_m baz alınarak hesaplama yapılmasının sebebi ise, atıklar biyolojik olarak ayrıştıkça CH₄ emisyonu oluşumu gözlemlenmektedir. Atıktan belirli bir zamanda üretilen CH₄ için Eş. 3.13 kullanılmaktadır.

$$CH_{4\text{üretilen}_T} = DDOC_{m decomp_T} * F * 16/12 \quad (3.13)$$

Eşitlikte belirtilen F çöplükteki gazın düzeltme fraksiyonunu ifade etmektedir. Bu değer için IPCC de tanımlanmış olan 0,5 varsayılan değeri alınmıştır [54].

3.5. Belirsizlik Hesabı

Belirsizlik; ölçülen değerlerin dağılımını niteleyen, rastgele ve sistematik faktörlerin etkisini içerecek şekilde yüzde olarak ifade edilen ve değerlerin dağılımındaki olası asimetrikliği de dikkate alarak, elde edilen değerlerin %95'inin ortalama değerinin güven aralığını tarif eden parametredir [56].

Emisyon hesaplamasında kullanılan genel formül Eş. 3.14'de gösterildiği gibi faaliyet verisinin emisyon faktörü ile çarpılması şeklindedir.

$$Emisyon = Faaliyet\ verisi * Emisyon\ Faktörü \quad (3.14)$$

Emisyon hesaplarındaki belirsizlik Eş. 3.15'de verilen şekilde, faaliyet verisi ve emisyon faktörü belirsizliklerinin karelerinin toplamının karekökü ile elde edilir [57].

$$E \pm X = (FV \pm U_{FV}) * (EF \pm U_{EF})$$

$$X = \sqrt{(U_{FV})^2 + (U_{EF})^2} \quad (3.15)$$

Yakıtlardan kaynaklanan sera gazı emisyonu belirsizliğinin hesaplanmasında kullanılan faaliyet verisi ve emisyon faktörü belirsizlik yüzdeleri Çizelge 3.10'da verilmiştir. Çizelge 3.10'da verilen yakıt tüketimi belirsizliklerinde Tier 1 ve Tier 2 yöntemleri için Türkiye'nin NIR raporunda [20] belirlemiş olduğu veriler kullanılırken, Tier 3 yönteminde tesise özgü veriler kullanılmış olmasından ötürü kantarın belirsizliği kullanılmıştır. Kantar belirsizliği verisi ise, "carbon brain print" [58] adlı rapordan alınmıştır.

Çizelge 3.10: Çimento üretiminde yakıtlar için varsayılan belirsizlik değerleri

Yakıt Türü	Yakıt Tüketimi Belirsizlik (%)		Emisyon Faktörü Belirsizlik (%)		
	Tier 1 ve Tier 2	Tier 3	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Taş Kömürü	25,5%	2,5%	7%	100%	100%
Linyit	25,5%	2,5%	7%	100%	100%
P.Kok	25,5%	2,5%	7%	100%	100%
ÖTL	2%	2,5%	7%	100%	100%
ATY	2%	2,5%	7%	100%	100%
Fuel Oil (Atık yağ)	27,8%	2,5%	7%	100%	100%
Doğalgaz	29,2%	2,5%	7%	100%	100%
Dizel	27,8%	2,5%	7%	100%	100%

Proses kaynaklı emisyonların belirsizlik hesaplamasında kullanılan faaliyet verisi ve emisyon faktörü belirsizlikleri yüzdeleri Çizelge 3.11’de verilmiştir. Belirsizlik değerleri IPCC’nin mineral sanayi emisyonları ile ilgili yayınlamış olduğu “Volume 3 Chapter 2 Table2.3”den alınmıştır [52].

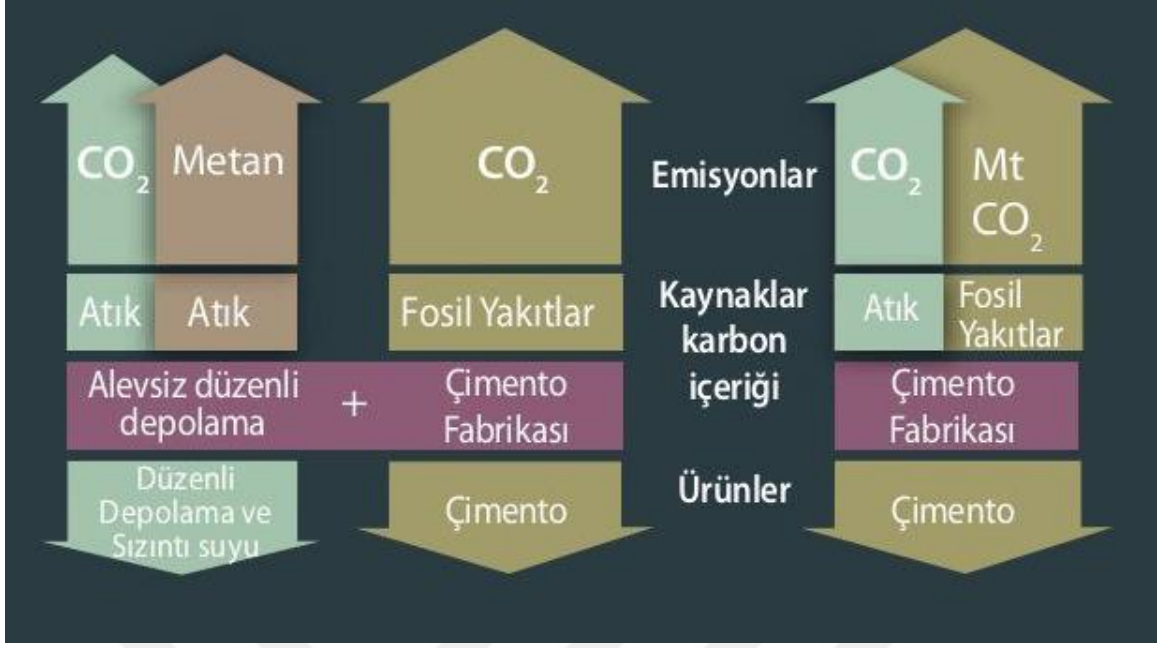
Çizelge 3.11: Çimento üretiminde varsayılan belirsizlik değerleri

Belirsizlik (%)	Çimento üretimi için varsayılan belirsizlik değerleri	Hesaplama Yöntemi
1-2%	Çimento üretim verisinin tesis seviyesinde raporlanması	Tier 1
1-2%	Klinker üretim miktarı	Tier 2
3-8%	Klinkerin içeriğinin 65% CaO olması	Tier 2
1%	CKD (tüm hammadde % 100 kalsine olduğunda)	Tier 2 - 3
1%	Karbonatın % 100 kalsinasyonu ile klinkere dönüşmesi	Tier 2 - 3
1-3%	Hammaddenin ağırlığı tesis seviyesinde ölçüm yapıldığında belirsizlik	Tier 3
1-3%	Karbonat içeriği ve türü ile ilgili kimyasal analizler	Tier 3

3.6. Birlikte İşleme ile Emisyon Azaltımı

Çimento üretiminde küresel ölçekte CO₂ emisyonlarının azaltılmasında birlikte işleme uygulaması çimento sektörüne yüksek potansiyeller sunmaktadır [59].

Birlikte işleme ile düzenli depolama alanlarında gönderilecek olan atıklar çimento üretiminde yakıt olarak kullanıldığında, depolama alanlarında oluşacak olan CH₄ emisyonunu engellemekte, aynı zamanda çimento üretim prosesinde kullanılan fosil yakıt tüketimini azaltmaktadır. Şekil 3.7’te birlikte işleme akışı ile CH₄ önlenmesi ve fosil yakıt tasarrufu gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Birlikte işleme akışı [59]

Tez çalışması kapsamında seçilmiş olan pilot tesis alternatif yakıt olarak, atıktan türetilmiş yakıt (ATY) kullanmaktadır. ATY kullanımında yıllara göre artış yapıldığı, tez kapsamında baz alınan 2015, 2016 ve 2017 yılları için net olarak gözlemlenmektedir. Tesiste kullanılan ATY tüketimi TJ cinsinden toplam yakıt tüketiminin baz yıllara göre sırasıyla %14,3, %17,9 ve %28,3'ünü oluşturmaktadır. Bunlar göz önüne alındığında, birlikte işleme yapılan tesiste 3 yılda toplam ne kadar CO₂ tasarrufu yapıldığı hesaplanabilmektedir. CO₂ tasarrufunun hesaplanması 3 basamakta açıklanmıştır. Bu üç basamak aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır:

1) Tesiste ATY, fosil yakıt tüketimine alternatif yakıt kaynağı olarak kullanılmaktadır. Doğal olarak tesiste, ATY kullanılmamış olsaydı fosil yakıt tüketimine devam edilmiş olacaktı. Tesisin yıllara göre kullanmış olduğu yakıt tüketimleri toplam yakıt tüketimine oranlanmıştır. ATY tüketim miktarı da, diğer fosil yakıt kullanım oranlarına göre dağıtılmıştır. Hesaplamalar tesise özgü olan verileri içerdiği için yöntem olarak Tier 3 kullanılmıştır. Tesisin 2015, 2016 ve 2017 yıllarındaki toplam yakıt tüketimi (TJ) ve yakıtların emisyon faktörleri (ton/TJ) Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.12: ATY tüketimi fosil yakıtlara dağıtıldığında, oluşacak olan emisyon hesabında kullanılan yakıt tüketimi (TJ) ve EF (ton/TJ)

Yakıt Türü	Yakıt Tüketimi (TJ)			Emisyon Faktörü (ton/TJ)
	2015	2016	2017	
Taş Kömürü	53,07	209,20	65,97	101,0
Linyit	124,64	112,63	198,66	101,0
P.Kok	487,51	567,82	770,74	97,5
Doğalgaz	2,89	4,91	2,27	56,01

2) Tesiste kullanılan atıklar ATY olarak değerlendirilmeseydi katı atık depolama alanına gönderilmiş olacaktı. Düzenli depolama alanında oluşacak olan CH₄ emisyonunun Tier 1 yöntemi ile hesaplanarak, CO₂ eşdeğeri cinsine çevrilmiştir. Hesaplama için gereken veriler bölüm 3.4 atık emisyonu başlığında detaylı olarak verilmiştir.

3) Tesis alternatif yakıt olarak ATY kullanıldığında, ATY kaynaklı emisyon Tier 3 yöntemi ile hesaplanmıştır. Tesisin kullanmakta olduğu ATY için EF (ton/TJ) ve NKD (GJ/ton) değerleri Çizelge 3.13'te sunulmuştur. NKD yakıt tüketiminin TJ cinsine dönüştürülmesinde önemlidir. Tesiste kullanılan ATY' nin NKD'i tesisin kendi ölçümleri sonucu elde ettiği değerlerdir. TJ cinsinden yakıt tüketimini elde etmek için kullanılan yakıt miktarı, yakıtın NKD değeri ile çarpılması sonucu elde edilir.

Çizelge 3.13: ATY' ın yanmasından kaynaklanan emisyonların hesaplanmasında kullanılan EF (ton/TJ), NKD (GJ/ton) ve yakıt tüketim değerleri

Yıllar	Net Kalorifik Değer (GJ/ton)	Yakıt Tüketimi (TJ)	Emisyon Faktörü (ton CO ₂ /TJ)
2015	14,65	674,81	75,00
2016	15,30	895,10	75,00
2017	13,80	1.038,64	75,00

Yukarıda sıralanmış olan 3 basamak ile ilgili gerekli olan hesaplamaların tamamlanmasının ardından CO₂ tasarrufunu bulabilmek için son olarak, Eş. 3.16'da verildiği gibi ATY yerine kullanılan fosil yakıt kaynaklı emisyonlar ile atıklar ATY olarak değerlendirilmeyip katı atık bertaraf tesislerine gönderildiğinde atıklardan kaynaklanan emisyonların toplamından, tesiste ATY kullanımı sonucu oluşan emisyonun çıkarılması sonucu elde edilir.

$$CO_2 \text{ tasarrufu} = ATY \text{ yerine tüketilen fosil yakıt kaynaklı emisyon} + \text{Atık emisyonu} - ATY \text{ emisyonu} \quad (3.16)$$

3.7. Türkiye Geneli Senaryoları

Tesis için 3 basamakta oluşturulmuş olan CO₂ tasarrufu Türkiye geneline uyarlanmıştır. 3 basamaklı Türkiye geneli senaryoları aşağıda açıklanmıştır. Bunun için öncelikle Türkiye için Enerji Bakanlığı tarafından hazırlanmakta olan Enerji Denge Tabloları kullanılmış ve Enerji denge tablolarından 2014, 2015 ve 2016 yıllarına ait çimento sektörünün kullanmış olduğu toplam fosil yakıt tüketimleri alınmıştır. Hesaplama yılları içerisinde 2017 yılı da dahildir. Ancak enerji denge tablolarında henüz 2017 yılı yayınlanmamış olduğu için, 2015 yılı ile 2016 yılı arasındaki %15,6'lık artış değeri; 2016 yılından 2017 yılına geçiş için oranlanmış ve 2017 yakıt tüketimi elde edilmiştir. Artış öngörülmesinin sebebi; Türkiye genelinde yapılaşma sürecinin devam etmesi, kentsel dönüşüm projelerinin yaygınlaşması, köprü ve havalimanı projelerinin gündemde olmasıdır. Türkiye genelinde çimento üretimindeki fosil yakıt tüketimleri yakıt türlerine göre Çizelge 3.14'te verilmiştir. Elektrik ve jeotermel ısı – ısı tüketimleri tabloya dahil edilmemiştir. Çünkü çimento üretiminde emisyon kaynakları içerisinde yer almamaktadır.

Çizelge 3.14: Türkiye geneli çimento üretimindeki yakıt türüne göre fosil yakıt tüketimleri (TJ) ve NKD (TJ/Gg)

Yakıt Tipi	Yakıt Tüketimi (TJ)				NKD (TJ/Gg)
	2014	2015	2016	2017	
Taş Kömürü	78.706,20	88.604,40	106.257,60	122.844	28,20
Linyit	20.075,30	11.376,40	6.556,90	7.580	11,90
Kok	0	0	564	652	28,20
P.Kok	125.775,00	130.942,50	153.985,00	178.022	32,50
Petrol	1.057,50	1.311,30	1.945,80	2.250	42,30
Doğalgaz	3.393,60	8.299,20	8.769,60	10.139	48,00
Toplam Yakıt Tüketimi (TJ)	229.007,60	240.533,80	278.078,90	321.487,02	

Enerji denge tablolarında orijinal birimlerden alınan yakıt tüketim miktarları (Gg), yakıt türlerine göre IPCC kılavuzundan seçilmiş olan NKD ile çarpılması sonucu yakıt tüketimleri TJ cinsinden elde edilmiştir. Tesisin yakıt tüketimlerindeki ATY kullanım oranı Türkiye geneli çimento üretimindeki yakıt tüketimlerine uyarlanmıştır. Tesis 2015, 2016 ve 2017 yıllarında kullanmış olduğu ATY oranı sırasıyla %14,32, %17,9 ve %28,3'tür. Senaryolarda

bu oranlar kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Senaryolar ile Türkiye’deki çimento sektörü, pilot tesisin ATY kullanım oranı kadar atık kullanması durumunda ne kadar CO₂ tasarrufu yapabileceği açıklanmıştır.

3.7.1. Senaryo 1

Türkiye’deki çimento sektöründe kullanılan yakıt tüketiminden kaynaklanan emisyonlar, ülke geneli için kabul edilen EF kullanılarak hesaplanacağı için Tier 2 yöntemi kullanılmıştır.

Pilot tesisin yıllara göre ATY kullanım oranları toplam yakıt tüketimine uyarlanarak, azaltılabilecek olan yakıt tüketimi elde edilmiş ve daha sonrasında Türkiye için belirlenmiş olan emisyon faktörleri ile çarpılarak, azaltılabilecek emisyon miktarı hesaplanmıştır. Yıllara ve yakıt türlerine göre kullanılan emisyon faktörleri Çizelge 3.15’te verilmiştir. Emisyon faktörü değerleri CRF tablolarından elde edilmiş olup, 2017 yılı verileri yayınlanmadığı için, 2016 yılı verisi kullanılmıştır.

Çizelge 3.15: Yıllara ve yakıt türlerine göre emisyon faktörü değerleri (kg/TJ)

YIL	2015			2016		
Yakıt Tipi	Emisyon Faktörü (kg/TJ)			Emisyon Faktörü (kg/TJ)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Taş Kömürü	95.020,00	10,00	1,50	93.380,00	10,00	1,50
Linyit	95.020,00	10,00	1,50	93.380,00	10,00	1,50
Kok	95.020,00	10,00	1,50	93.380,00	10,00	1,50
P.Kok	95.020,00	10,00	1,50	93.380,00	10,00	1,50
Petrol	97.010,00	3,00	0,60	96.740,00	2,99	0,60
Doğalgaz	55.090,00	1,00	0,10	56.040,00	1,00	0,10
Elektrik	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

3.7.2. Senaryo 2

Türkiye geneli çimento sektörü için enerji denge tablolarında bakıldığında, yakıt tüketiminin büyük kısmını fosil yakıtların oluşturduğu görülmektedir. Pilot tesis alternatif yakıt olarak atık kullanmaktadır. Türkiye genelindeki çimento sektörüne pilot tesisin atık kullanım oranları uygulanmış olsaydı, katı atık bertaraf tesislerinde ne kadar atık kaynaklı emisyon oluşumu önlenebileceği hesaplanmıştır. Hesaplamanın yapılabilmesi için, öncelikle Türkiye’nin fosil yakıt kullanarak, ne kadar atığı bertaraf tesislerine göndermiş olduğunun

bilinmesi gerekmektedir. Bunun için de senaryo 1’de pilot tesisin ATY kullanım oranları kullanılarak hesaplanan azaltılabilecek yakıt tüketimi (TJ) kullanılmıştır. Bu yakıt tüketimi, yakıtların NKD değerleri kullanılarak Gg cinsine çevrilmiş ve sonrasında tesis için yapılan atık emisyon hesabı Türkiye için yapılmıştır. Atık kompozisyonu için de pilot tesisin kullanmış olduğu atık içerikleri kabul edilmiştir. Yakıtların NKD’leri Çizelge 3.14’te paylaşılmıştır.

3.7.3. Senaryo 3

Senaryo 3’te Türkiye çimento sektörünün, pilot tesis gibi atıktan türetilmiş yakıt kullanmış olması durumunda ne kadar emisyon salınımı yapacağı hesaplanmıştır. Burada önemli olan nokta yakıt tüketimi için, pilot tesisteki ATY’lar için belirlenmiş olan NKD’lerin kullanılmasıdır. Senaryo 2’de kütle cinsinden elde edilen tüketilen yakıt tüketimleri, tesisin yakmakta olduğu atıkların net kalorifik değerleri ile çarpılarak enerji cinsinden yakıt tüketimi elde edilmiştir. Tesiste gerçekleşen uygulamanın Türkiye’de yapılmış olması durumunda emisyonlarda ne gibi değişiklikler gözlemlenebilirdi şeklinde senaryo oluşturulmuştur. Senaryo için emisyon hesabında tesisin ATY için belirlemiş olduğu emisyon faktörü kullanılmıştır.

4. SERA GAZI EMİSYONLARININ HESAPLANMASI VE SONUÇLARI

Bu bölümde, seçilen pilot tesisin 2015, 2016 ve 2017 yıllarına ait çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonu, tesiste yakıt olarak kullanılan atıklar ile CO₂ emisyonu azaltım sonuçları verilmiştir. Tesisin seçilen 3 yılda gerçekleşen CO₂ azaltım miktarı, Türkiye geneli çimento üretimine uyarlanarak değerlendirilmiş ve sonuçları paylaşılmıştır.

4.1. IPCC Kılavuzu ile Emisyonların Hesaplanması

Bu kısımda IPCC' nin geliştirmiş olduğu hesaplama yöntemleri kullanılmış ve sonuçları paylaşılmıştır.

4.1.1. Yakıt Emisyonlarının Hesaplanması ve Sonuçları

Yakıt emisyonlarının hesaplanmasında IPCC'nin 3 farklı yöntemi olan Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 kullanılmış ve sonuçları ayrı ayrı sunulmuştur. Yakıt emisyonlarının hesaplanması için gerekli olan parametreler; kullanılan yakıtın türü, miktarı ve emisyon faktörüdür.

4.1.1.1. Tier 1

Veri içeriği ve detayı bakımından en basit yöntemin Tier 1 olduğu önceki bölümlerde açıklanmıştır. Bu yöntem de kullanılan yakıt türüne göre emisyon faktörü IPCC kılavuzundaki varsayılan değerlerden seçilmektedir. Yakıt miktarı ise TJ cinsinden olması gerektiği için, yine aynı şekilde yakıtın net kalorifik değeri IPCC kılavuzlarından seçilmektedir. Bölüm 3.2.1.1'de Çizelge 3.4'te paylaşılmış olan varsayılan değerler kullanılarak emisyon hesabı yapılmıştır. Ayrıca bölüm 3.5 içerisinde yer alan Çizelge 3.10'da verilmiş olan belirsizlik değerleri kullanılarak, hesaplanan emisyonların belirsizlikleri bulunmuştur. Tier 1 yöntemi ile hesaplanmış olan 2015, 2016 ve 2017 yıllarına ait yakıt emisyonları ve belirsizliklerinin sonuçları sırasıyla Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'de detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1: 2015 yılı için Tier 1 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)

Yakıt Tipi	Yakıt Tüketimi (Gg)	NKD (TJ/Gg)	Yakıt Tüketimi (TJ)	Emisyon Faktörü (kg/TJ)			Emisyon (ton)			Yakıt Tüketimi belirsizlik (%)	Emisyon Faktörü belirsizlik (%)			Belirsizlik (%)			Emisyon Belirsizlik (ton)		
				CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Taş Kömürü	12,24	26,7	327	98.300	10	1,5	32.117	3	0	25,5%	7%	100%	100%	26,4%	103,2%	103,2%	8.492,90	3,37	0,51
Linyit	30,72	11,9	366	101.000	10	1,5	36.925	4	1	25,5%	7%	100%	100%	26,4%	103,2%	103,2%	9.764,14	3,77	0,57
P.Kok	86,05	32,5	2.796	97.500	3	0,6	272.658	8	2	25,5%	7%	100%	100%	26,4%	103,2%	103,2%	72.099,94	8,66	1,73
ÖTL	1,03	31,5	33	85.000			2.769			2,0%	7%	100%	100%	7,3%	100,0%	100,0%	201,55	0,00	0,00
ATY	46,06	10,0	461	83.000	30	4,0	38.231	14	2	2,0%	7%	100%	100%	7,3%	100,0%	100,0%	2.783,29	13,82	1,84
Fuel Oil (Atık yağ)	0,49	40,2	20	73.300	30	4,0	1.447	1	0	27,8%	7%	100%	100%	28,7%	103,8%	103,8%	414,77	0,61	0,08
Doğalgaz	0,492	48,0	23,63	56.100	1	0,1	1.325	0	0	29,2%	7%	100%	100%	30,0%	104,2%	104,2%	398,00	0,02	0,00
Dizel	0,054	43	2,32	74.100	3	0,6	172	0	0	27,8%	7%	100%	100%	28,7%	103,8%	103,8%	49,33	0,01	0,00
Toplam							385.644,72	29,75	4,64								94.203,92	30,27	4,73
Toplam (CO₂ eşd.)							387.707,85			Toplam Belirsizlik			24,84%			96.305,48			

Çizelge 4.2: 2016 yılı için Tier 1 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)

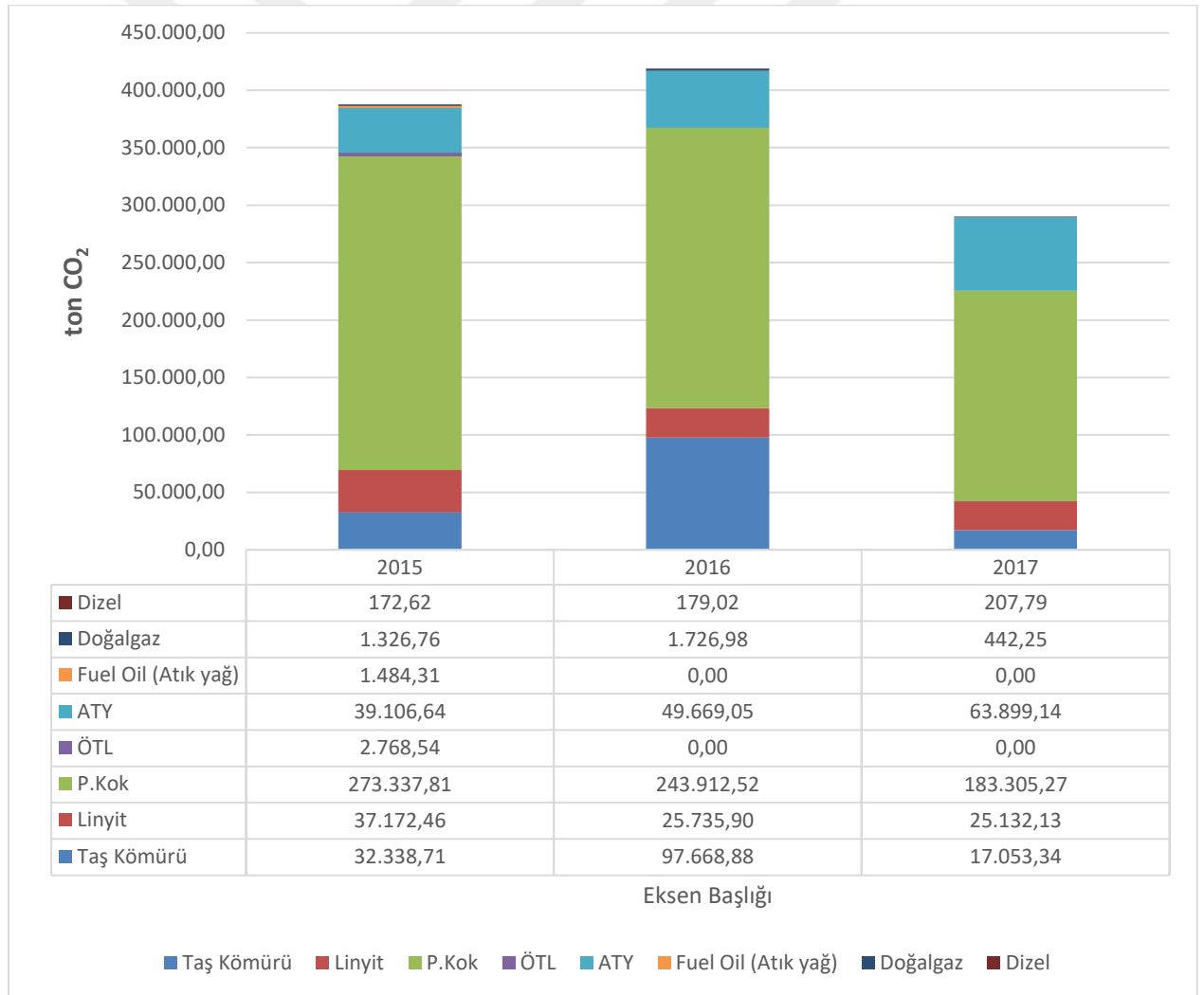
Yakıt Tipi	Yakıt Tüketimi (Gg)	NKD (TJ/Gg)	Yakıt Tüketimi (TJ)	Emisyon Faktörü (kg/TJ)			Emisyon (ton)			Yakıt Tüketimi belirsizlik (%)	Emisyon Faktörü belirsizlik (%)			Belirsizlik (%)			Emisyon Belirsizlik (ton)					
				CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O			
Taş Kömürü	36,96	26,7	987	98.300	10	1,5	97.000	10	1	25,5%	7%	100%	100%	26,4%	103,2%	103,2%	25.650,12	10,18	1,53			
Linyit	21,27	11,9	253	101.000	10	1,5	25.564	3	0	25,5%	7%	100%	100%	26,4%	103,2%	103,2%	6.760,08	2,61	0,39			
P.Kok	76,78	32,5	2.495	97.500	3	0,6	243.306	7	1	25,5%	7%	100%	100%	26,4%	103,2%	103,2%	64.338,26	7,73	1,55			
ATY	58,50	10,0	585	83.000	30	4,0	48.557	18	2	2,0%	7%	100%	100%	7,3%	100,0%	100,0%	3.535,04	17,55	2,34			
Doğalgaz	0,641	48,0	30,75	56.100	1	0,1	1.725	0	0	29,2%	7%	100%	100%	30,0%	104,2%	104,2%	518,06	0,03	0,00			
Dizel	0,056	43	2,41	74.100	3	0,6	178	0	0	27,8%	7%	100%	100%	28,7%	103,8%	103,8%	51,15	0,01	0,00			
Toplam								416.332,11	37,47	5,70							100.852,72	38,12	5,81			
Toplam (CO ₂ eşd.)										418.892,35				Toplam Belirsizlik			24,7%			103.459,56		

Çizelge 4.3: 2017 yılı için Tier 1 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)

Yakıt Tipi	Yakıt Tüketimi (Gg)	NKD (TJ/Gg)	Yakıt Tüketimi (TJ)	Emisyon Faktörü (kg/TJ)			Emisyon (ton)			Yakıt Tüketimi belirsizlik (%)	Emisyon Faktörü belirsizlik (%)			Emisyon Belirsizlik (%)			Emisyon Belirsizlik (ton)					
				CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O			
Taş Kömürü	6,45	26,7	172	98.300	10	1,5	16.937	2	0	25,5%	7%	100%	100%	26%	103%	103%	4.478,60	1,78	0,27			
Linyit	20,77	11,9	247	101.000	10	1,5	24.965	2	0	25,5%	7%	100%	100%	26%	103%	103%	6.601,49	2,55	0,38			
P.Kok	57,70	32,5	1.875	97.500	3	0,6	182.850	6	1	25,5%	7%	100%	100%	26%	103%	103%	48.351,52	5,81	1,16			
ATY	75,26	10,0	753	83.000	30	4,0	62.469	23	3	2,0%	7%	100%	100%	7%	100%	100%	4.547,82	22,58	3,01			
Doğalgaz	0,164	48,0	7,88	56.100	1	0,1	442	0	0	29,2%	7%	100%	100%	30%	104%	104%	132,67	0,01	0,00			
Dizel	0,065	43	2,80	74.100	3	0,6	207	0	0	27,8%	7%	100%	100%	29%	104%	104%	59,37	0,01	0,00			
Toplam								287.868,88	32,42	4,77							64.171,48	32,74	4,82			
Toplam (CO ₂ eşd.)										290.039,91				Toplam Belirsizlik			22,88%			66.366,52		

Çizelgelerde de görüldüğü üzere, pilot tesisin yakıt emisyonlarının büyük bir kısmını petrokok tüketimi oluşturmaktadır. Petrokok tüketimi 2016 yılında 2015 yılına göre bir miktar azalmış, 2017 yılında ise 2015 yılına göre %30 civarında azalmış olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, taş kömürü kullanımı da 2017 yılında 2015 yılına göre %52 oranında ciddi bir azalış gerçekleştirilmiştir. Fosil yakıtlarda bu azalış gerçekleşirken, ATY kullanım oranlarında da yıllara göre sürekli bir artış eğiliminde olduğu ve 2015 yılından 2017 yılına % 63,4 gibi bir yükseliş yaptığı görülmektedir.

Yakıt türlerine bağlı oluşan emisyonlarda Şekil 4.1’de de görüldüğü gibi en fazla paya petrokok sahiptir. Petrokokun kullanım oranının yüksek olmasının yanı sıra emisyon faktörü de ATY ve doğalgaza kıyasla daha yüksektir. 2017 yılında ATY tüketimi petrokoktan fazla olmasına rağmen, emisyonu katkısı petrokoktan daha düşüktür.

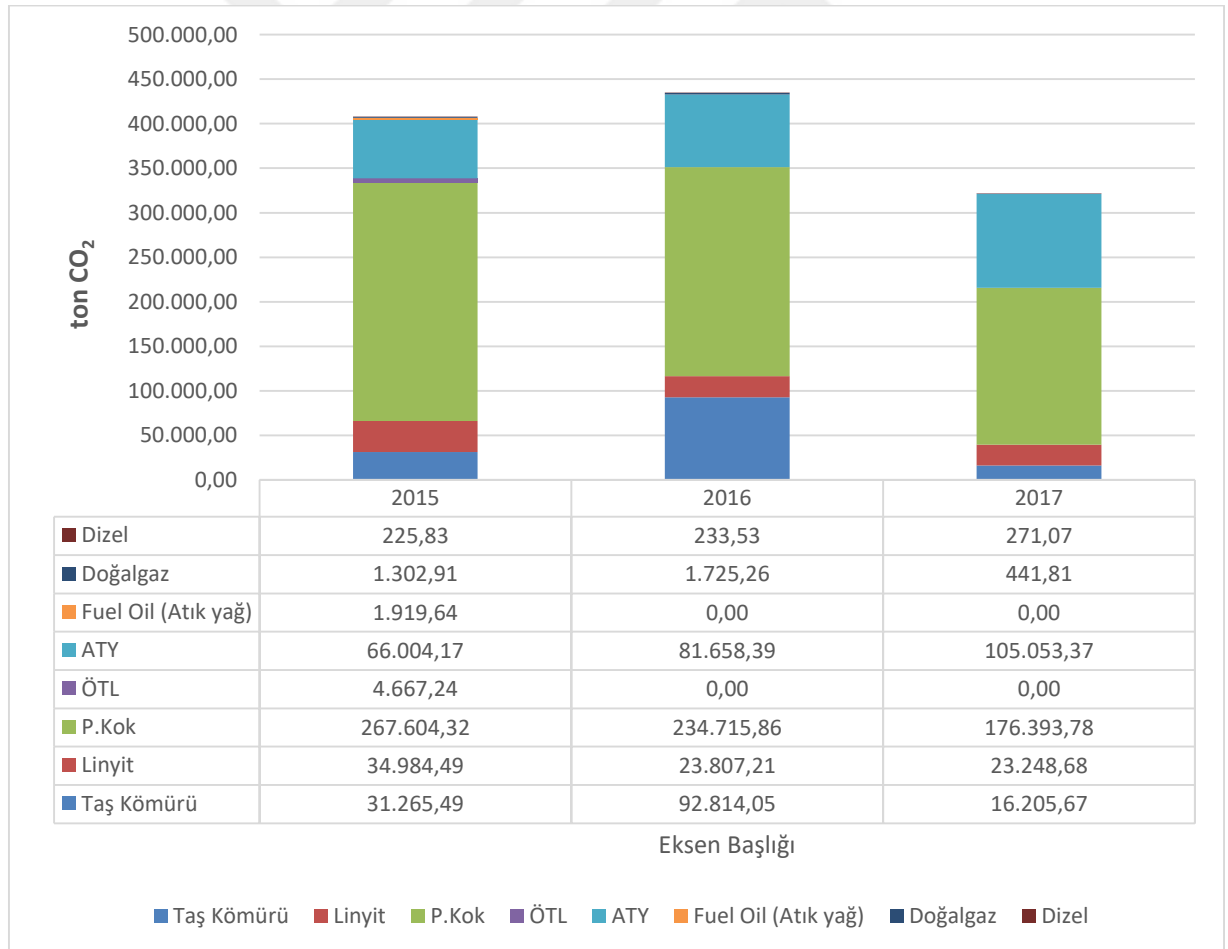


Şekil 4.1: Yakıt türlerinin Tier 1 yönteminde yıllara göre emisyon durumları

4.1.1.2. Tier 2

Tier 2 yönteminin Tier 1’den farkı daha önce bahsedildiği gibi emisyon faktöründe IPCC kılavuzundaki varsayılan değerler yerine ulusal olarak belirlenmiş olan EF değerlerinin kullanılmasıdır. Türkiye’ nin yakıtlara göre belirlemiş olduğu emisyon faktörü kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bölüm 3.2.1.2’de Çizelge 3.5’te verilen EF değerleri ile yakıtlardan kaynaklanan emisyonlar hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra bölüm 3.5 içerisinde paylaşılan Çizelge 3.10’daki belirsizlik değerleri kullanılarak da hesaplanan emisyonların belirsizlikleri bulunmuştur. Sonuçların detayları 2015, 2016 ve 2017 yılları için sırasıyla Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da paylaşılmıştır.

Yakıt türlerine göre emisyon durumları Şekil 4.2’de paylaşılmıştır. Tier 1’deki yakıt emisyonları ile kıyaslandığında, ATY de ciddi bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Bunun sebebi ise, Türkiye’nin yakıt emisyonlarının ayrımının katı, sıvı ve gaz olarak yapılmasıdır. Bunlar dışındaki yakıtlar için “diğer yakıtlar” olarak genelleme yapılmış olmasıdır.



Şekil 4.2: Yakıt türlerinin Tier 2 yönteminde yıllara göre emisyon durumları

Çizelge 4.4: 2015 yılı için Tier 2 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)

Yakıt Tipi	Yakıt Tüketimi (Gg)	NKD (TJ/Gg)	Yakıt Tüketimi (TJ)	Emisyon Faktörü (kg/TJ)			Emisyon (ton)			Yakıt Tüketimi belirsizlik	Emisyon Faktörü belirsizlik (%)			Emisyon Belirsizlik (%)			Emisyon Belirsizlik (ton)		
				CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Taş Kömürü	12,24	26,7	327	95.015,26	10,00	1,50	31.044	3	0	25,5%	7%	100%	100%	26,4%	103,2%	103,2%	8.209,11	3,37	0,505775
Linyit	30,72	11,9	366	95.015,26	10,00	1,50	34.737	4	1	25,5%	7%	100%	100%	26,4%	103,2%	103,2%	9.185,57	3,77	0,5659364
P.Kok	86,05	32,5	2.796	95.015,26	10,00	1,50	265.710	28	4	25,5%	7%	100%	100%	26,4%	103,2%	103,2%	70.262,51	28,86	4,3289763
ÖTL	1,03	31,5	33	141.394,19	30,00	4,00	4.605	1	0	2,0%	7%	100%	100%	7,3%	100,0%	100,0%	335,27	0,98	0,1303101
ATY	46,06	10,0	461	141.394,19	30,00	4,00	65.129	14	2	2,0%	7%	100%	100%	7,3%	100,0%	100,0%	4.741,46	13,82	1,8428485
Fuel Oil (Atık yağ)	0,49	40,2	20	97.012,25	3,00	0,60	1.915	0	0	27,8%	7%	100%	100%	28,7%	103,8%	103,8%	548,94	0,06	0,0122812
Doğalgaz	0,492	48,0	23,63	55.090,56	1,00	0,10	1.302	0	0	29,2%	7%	100%	100%	30,0%	104,2%	104,2%	390,84	0,02	0,0024614
Dizel	0,054	43	2,32	97.012,25	3,00	0,60	225	0	0	27,8%	7%	100%	100%	28,7%	103,8%	103,8%	64,58	0,01	0,0014448
Toplam							404.666,71	49,77	7,22								93.738,28	50,90	7,39
Toplam (CO ₂ eşd.)							407.974,09			Toplam Belirsizlik				23,81%			97.121,74		

Çizelge 4.5: 2016 yılı için Tier 2 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)

Yakıt Tipi	Yakıt Tüketimi (Gg)	NKD (TJ/Gg)	Yakıt Tüketimi (TJ)	Emisyon Faktörü (kg/TJ)**			Emisyon (ton)			Yakıt Tüketimi belirsizlik	Emisyon Faktörü belirsizlik (%)			Emisyon belirsizlik (%)			Emisyon belirsizlik (ton)		
				CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Taş Kömürü	36,96	26,7	987	93.380,12	10,00	1,50	92.146	10	1	25,5%	7,0%	100,0%	100,0%	26,4%	103,2%	103,2%	24.366,35	10,18	1,53
Linyit	21,27	11,9	253	93.380,12	10,00	1,50	23.636	3	0	25,5%	7,0%	100,0%	100,0%	26,4%	103,2%	103,2%	6.250,07	2,61	0,39
P.Kok	76,78	32,5	2.495	93.380,12	10,00	1,50	233.025	25	4	25,5%	7,0%	100,0%	100,0%	26,4%	103,2%	103,2%	61.619,63	25,75	3,86
ATY	58,50	10,0	585	137.679,84	30,00	4,00	80.547	18	2	2,0%	7,0%	100,0%	100,0%	7,3%	100,0%	100,0%	5.863,90	17,55	2,34
Doğalgaz	0,641	48,0	30,75	56.044,21	1,00	0,10	1.724	0	0	29,2%	7,0%	100,0%	100,0%	30,0%	104,2%	104,2%	517,55	0,03	0,00
Dizel	0,056	43	2,41	96.741,07	2,99	0,60	233	0	0	27,8%	7,0%	100,0%	100,0%	28,7%	103,8%	103,8%	66,78	0,01	0,00
Toplam				431.309,80			54,94	7,95									98.684,28	56,14	8,13
Toplam (CO₂ eşd.)				434.954,31			Toplam Belirsizlik			23,55%			102.410,09						

Çizelge 4.6: 2017 yılı için Tier 2 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)

Yakıt Tipi	Yakıt Tüketimi (Gg)	NKD (TJ/Gg)	Yakıt Tüketimi (TJ)	Emisyon Faktörü (kg/TJ)**			Emisyon (ton)			Yakıt Tüketimi belirsizlik	Emisyon Faktörü belirsizlik (%)			Emisyon belirsizlik (%)			Emisyon belirsizlik (ton)		
				CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Taş Kömürü	6,45	26,7	172	93.380,12	10,00	1,50	16.089	2	0	25,5%	7,0%	100,0%	100,0%	26,4%	103,2%	103,2%	4254,4518	1,7780863	0,2667129
Linyit	20,77	11,9	247	93.380,12	10,00	1,50	23.081	2	0	25,5%	7,0%	100,0%	100,0%	26,4%	103,2%	103,2%	6103,4451	2,5508462	0,3826269
P.Kok	57,70	32,5	1.875	93.380,12	10,00	1,50	175.123	19	3	25,5%	7,0%	100,0%	100,0%	26,4%	103,2%	103,2%	46308,419	19,353931	2,9030896
ATY	75,26	10,0	753	137.679,84	30,00	4,00	103.623	23	3	2,0%	7,0%	100,0%	100,0%	7,3%	100,0%	100,0%	7543,894	22,583715	3,0111621
Doğalgaz	0,164	48,0	7,88	56.044,21	1,00	0,10	441	0	0	29,2%	7,0%	100,0%	100,0%	30,0%	104,2%	104,2%	132,53593	0,0082045	0,0008205
Dizel	0,065	43	2,80	96.741,07	2,99	0,60	270	0	0	27,8%	7,0%	100,0%	100,0%	28,7%	103,8%	103,8%	77,515106	0,0086605	0,00173
Total							318.628,50	45,54	6,46								64420,261	46,283444	6,5661419
Toplam (CO₂ eşd.)							321.614,38			Toplam Belirsizlik				20,97%			67.456,23		

4.1.1.3. Tier 3

Tier 3, tamamen tesis spesifik değerleri kullanılarak yapılan hesaplama yöntemidir. Hesaplama da kullanılan teknoloji dahil olmak üzere, verilerin sürekli izlenmesi, takip edilmesi, parametre analizlerinin (yakıtların kalorifik değerleri, emisyon faktörleri) yapılması önemlidir. Çimento sektörü Türkiye açısından ana kategoride yer aldığı için, normalde kullanılması gereken hesaplama yöntemi Tier 3'tür. Pilot tesisten alınmış ve bölüm 3.2.1.3' de Çizelge 3.6'da listelenmiş olan veriler kullanılarak yapılan detaylı yapılan emisyon hesaplarının sonuçları 2015, 2016 ve 2017 yılları için sırayla Çizelge 4.7, Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9'da paylaşılmıştır.

Çizelgelerde de görüldüğü üzere, emisyon hesaplarının belirsizlikleri de açıklanmıştır. Belirsizlikler, bölüm 3.5 içerisinde paylaşılan Çizelge 3.10'daki Tier 3 için verilmiş olan belirsizlik değerleri kullanılarak yapılmıştır.

Yakıt türlerine göre emisyon durumları Şekil 4.3'te paylaşılmıştır.

Çizelge 4.7: 2015 yılı için Tier 3 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)

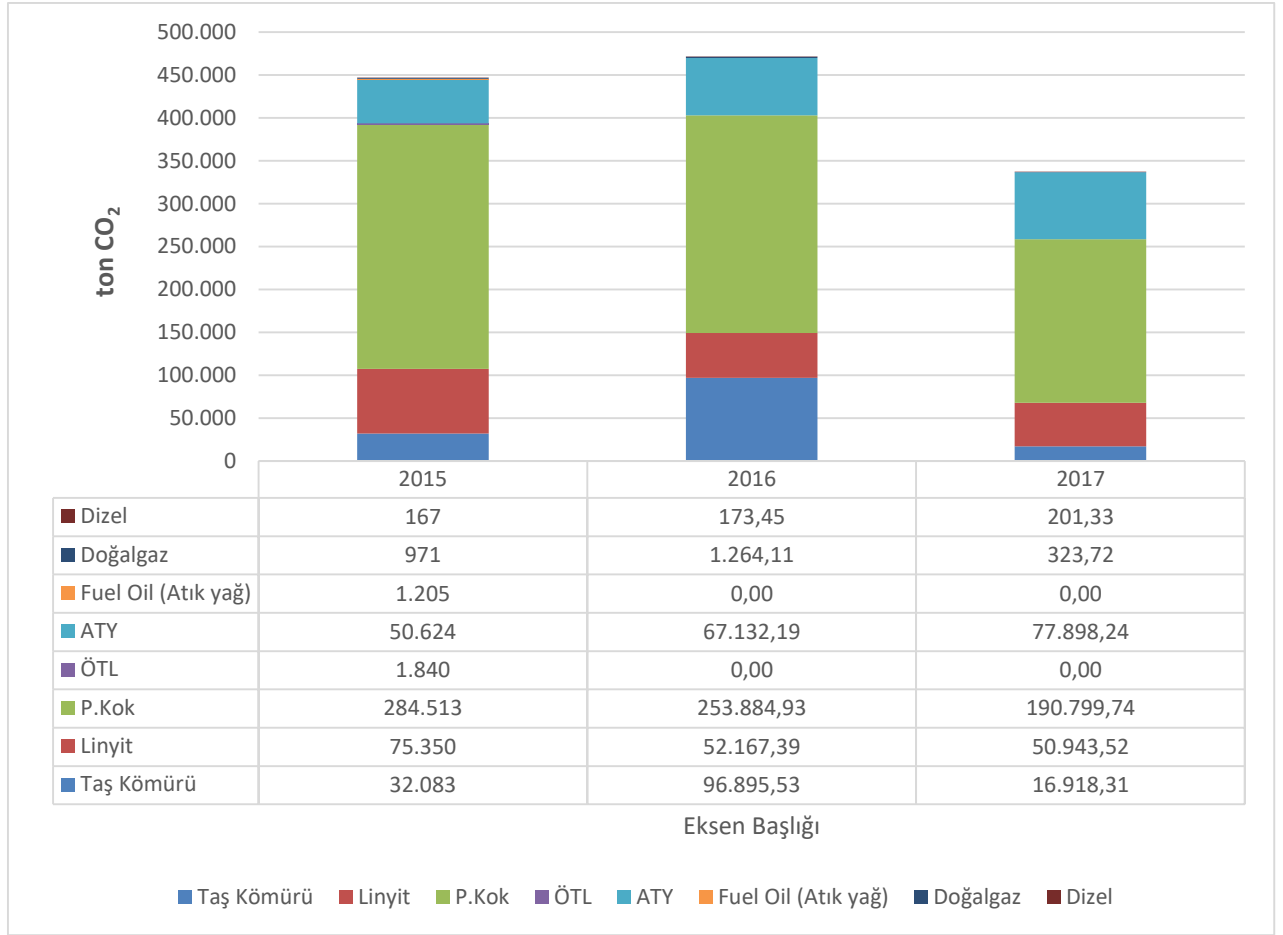
Yakıt Tipi	Yakıt Tüketimi (ton)	NKD (GJ/ton)	Yakıt Tüketimi (TJ)	Emisyon Faktörü (ton/TJ)	Emisyon (ton)	Yakıt Tüketimi belirsizlik	Emisyon Faktörü belirsizlik (%)	Belirsizlik (%)	Emisyon Belirsizlik (ton)
				CO ₂	CO ₂		CO ₂	CO ₂	CO ₂
Taş Kömürü	12.237	25,96	318	101	32.083	2,0%	7,0%	7,3%	2.335,65
Linyit	30.722	24,28	746	101	75.350	2,0%	7,0%	7,3%	5.485,54
P.Kok	86.046	33,91	2.918	97,5	284.513	2,0%	7,0%	7,3%	20.712,88
ÖTL	1.034	20,93	22	85	1.840	2,0%	7,0%	7,3%	133,95
ATY	46.062	14,65	675	75	50.624	2,0%	7,0%	7,3%	3.685,46
Fuel Oil (Atık yağ)	491	33,49	16	73	1.205	2,0%	7,0%	7,3%	87,76
Doğalgaz	492	35,17	17	56	971	2,0%	7,0%	7,3%	70,70
Dizel	54	41,8	2,3	74,1	167	2,0%	7,0%	7,3%	12,18
Toplam					446.753,08	Toplam Belirsizlik		7,3%	32.524,11

Çizelge 4.8: 2016 yılı için Tier 3 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)

Yakıt Tipi	Yakıt Tüketimi (ton)	NKD (GJ/ton)	Yakıt Tüketimi (TJ)	Emisyon Faktörü (ton/TJ)	Emisyon (ton)	Yakıt Tüketimi belirsizlik	Emisyon Faktörü belirsizlik (%)	Belirsizlik (%)	Emisyon Belirsizlik (ton)
				CO ₂	CO ₂		CO ₂	CO ₂	CO ₂
Taş Kömürü	36.958	25,96	959	101	96.896	2,0%	7,0%	7,3%	7.054,10
Linyit	21.270	24,28	517	101	52.167	2,0%	7,0%	7,3%	3.797,84
P.Kok	76.783	33,91	2.604	97,5	253.885	2,0%	7,0%	7,3%	18.483,10
ATY	58.503	15,30	895	75	67.132	2,0%	7,0%	7,3%	4.887,30
Doğalgaz	641	35,17	23	56	1.264	2,0%	7,0%	7,3%	92,03
Dizel	56	41,8	2,34	74,1	173	2,0%	7,0%	7,3%	12,63
Toplam					471.517,61	Toplam Belirsizlik		7,3%	34.327,00

Çizelge 4.9: 2017 yılı için Tier 3 yöntemiyle hesaplanmış yakıta dayalı emisyon değerleri (ton)

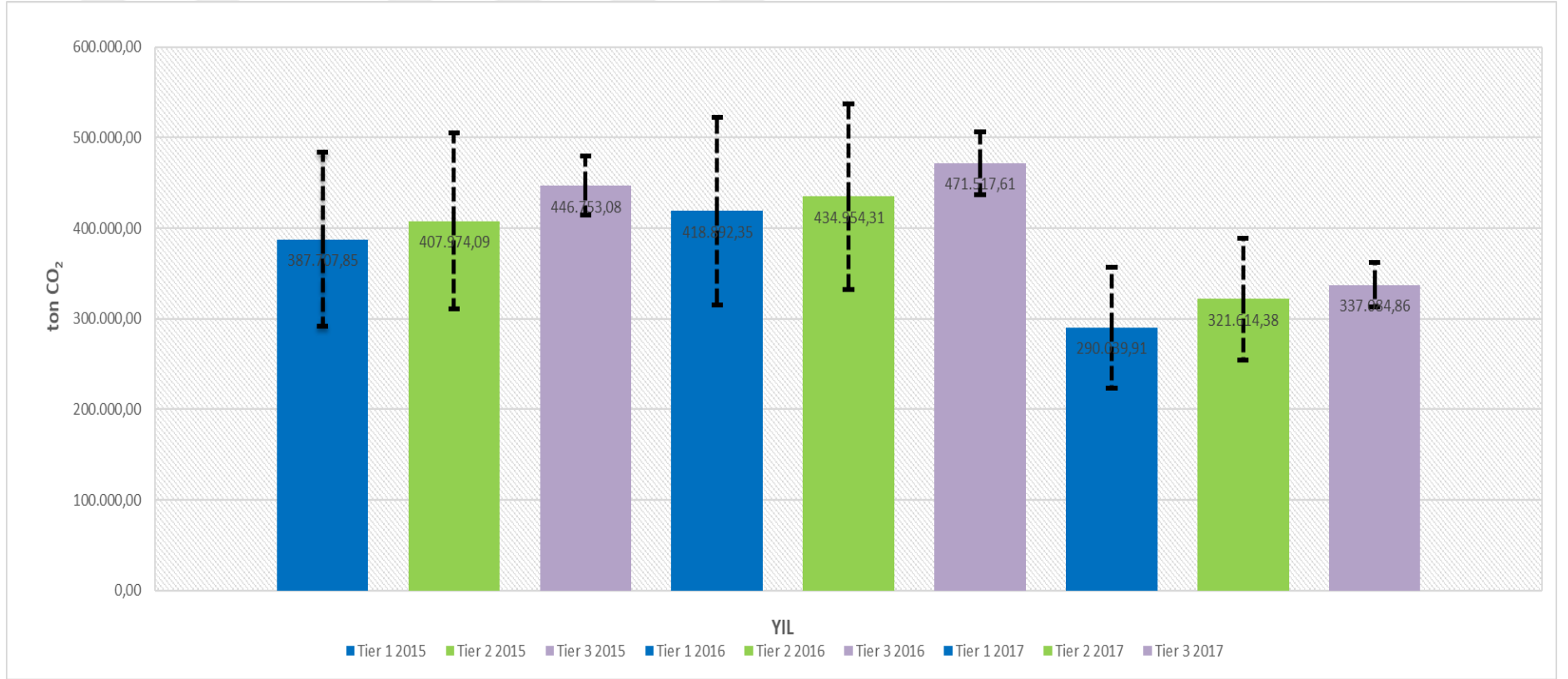
Yakıt Tipi	Yakıt Tüketimi (ton)	NKD (GJ/ton)	Yakıt Tüketimi (TJ)	Emisyon Faktörü (ton/TJ)	Emisyon (ton)	Yakıt Tüketimi belirsizlik	Emisyon Faktörü belirsizlik (%)	Belirsizlik (%)	Emisyon Belirsizlik (ton)
				CO ₂	CO ₂		CO ₂	CO ₂	CO ₂
Taş Kömürü	6.453	25,96	168	101	16.918	2,0%	7,0%	7,3%	1.231,67
Linyit	20.771	24,28	504	101	50.944	2,0%	7,0%	7,3%	3.708,74
P.Kok	57.704	33,91	1.957	97,5	190.800	2,0%	7,0%	7,3%	13.890,43
RDF	75.264	13,80	1.039	75	77.898	2,0%	7,0%	7,3%	5.671,08
Doğalgaz	164	35,17	6	56,1	324	2,0%	7,0%	7,3%	23,57
Dizel	65	41,8	3	74,1	201	2,0%	7,0%	7,3%	14,66
Toplam					337.084,86	Toplam Belirsizlik		7,3%	24.540,15



Şekil 4.3: Yakıt türlerinin Tier 3 yönteminde yıllara göre emisyon durumları

Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 ile yapılan emisyon hesaplamaları Çizelgeler ile paylaşılmıştır. Yıllara ve yöntemlere göre Şekil 4.4'te paylaşılan emisyonların belirsizlik durumlarında açıkça görüldüğü gibi Tier 1 ve Tier 2' de belirsizlikler yüksektir. Tier 3 hesaplama yönteminde belirsizliğin düşük olmasındaki en önemli etken tesise özgü verilerin kullanılmasıdır. Tier 1 ve Tier 2 yöntemlerinde belirsizlik % 20 - % 25 aralığında değişkenlik gösterirken, Tier 3 yönteminin belirsizliği %7 oranında olduğu görülmüştür. Tier 1 ve Tier 2 yöntemlerinde kabullerin fazla olması ve genelleştirilmiş verilerin kullanımı sebebi ile belirsizlikleri yüksek çıkmaktadır.

Türkiye'de çimento sektörü ana kategoride yer almasından dolayı, hesaplamalar için seçilmesi gereken yöntem Tier 3'tür.



Şekil 4.4: Yıllara ve yöntemlere göre yakıt emisyonların belirsizlik durumları

4.1.2. Proses Emisyonlarının Hesaplanması ve Sonuçları

Çimento üretiminde CO₂ oluşumunun en önemli nedenlerinden biri hammadde olan kalkerin (CaCO₃) ısı ile reaksiyona uğramasıdır. Bu işlem, çimentonun ara ürünü olan klinker üretimi esnasında gerçekleşmektedir. Bu nedenle entegre çimento tesislerinin emisyonları, sadece paketleme yapan çimento tesislerine göre daha yüksek olmaktadır. Klinker üretimi hangi tesiste yapılıyorsa, emisyon değerleri o tesisin emisyonları kapsamında değerlendirilmektedir. Tez için seçilmiş olan tesis entegre bir çimento tesisi olması nedeniyle, proses emisyonları hesaplanmıştır. Bu bölümde proses kaynaklı oluşan emisyonların hesaplamaları ve sonuçları paylaşılmıştır.

4.1.2.1. Tier 1: Çimento üretim verilerinin kullanılmasıyla klinker üretiminin hesaplanması

Tier 1 ile yapılan proses emisyon hesabı; klinker üretim verileri veya karbonat verilerine erişim sağlanamadığı durumlarda yapılan hesaplama yöntemidir. Bu yöntemde klinker ithalatı ve ihracatı verileri düzeltilerek, çimento üretim miktarlarına bağlı olarak hesaplama yapılmaktadır. Tesisten alınan Çizelge 3.2’de verilen çimento üretim verileri kullanılarak 2015, 2016 ve 2017 yılları için Tier 1 ile yapılan proses emisyon hesabının sonuçları Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10’da görüldüğü gibi emisyonların belirsizlikleri de bulunmuştur. Belirsizlik hesaplamaları için bölüm 3.5’te Çizelge 3.11’deki değerler kullanılmıştır.

4.1.2.2. Tier 2: Klinker üretim verilerinin kullanımı

Tier 2 yöntemi, klinker üretim verilerine dayanan bir hesaplama metotudur. Bölüm 3.2.2.2’de Çizelge 3.2’de paylaşılan veriler ile bölüm 3.5’te yer alan Çizelge 3.11’deki belirsizlik değerleri kullanılarak yapılan emisyonlar ve belirsizlikleri Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.10’da Tier 1 yöntemi sonuçları ve Çizelge 4.11’de ise Tier 2 yöntemi sonuçları paylaşılmıştır. Bu iki yöntemde de aynı sonuçların elde edildiği görülmektedir. Tesiste üretilen çimento ve klinker miktarları bilindiği için, Tier 1 de çimento içeriğindeki klinker oranı, bu veriler ile hesaplanmış olmasıdır. Ayrıca, pilot tesiste çimento üretiminde kullanılan fırın kapalı sistem olmasından ötürü CKD düzeltme faktörü 1 olmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.10: Yıllara göre Tier 1 yöntemiyle hesaplanmış prosese dayalı emisyon değerleri

YIL	Ccli Üretilen Klinker (ton)	Mci Üretilen Çimento (ton)	**C _{cl} (%)	Im (ton)	Ex (ton)	*EF _{clc} (ton CO ₂ /ton klinker)	CO ₂ Emisyon (ton)	Üretilen Çimento (ton) belirsizlik	EF _{clc} belirsizlik	Belirsizlik %	Emisyon belirsizlik (ton)
2015	1.350.624,00	1.569.436	0,86	0,0	0,0	0,52	702.324,5	2,5%	8%	8,38%	58.865,52
2016	1.405.817,00	1.608.985	0,87	0,0	0,0	0,52	731.024,8	2,5%	8%	8,38%	61.271,05
2017	1.034.573,00	1.158.474	0,89	0,0	0,0	0,52	537.978,0	2,5%	8%	8,38%	45.090,77

Çizelge 4.11: Yıllara göre Tier 2 yöntemiyle hesaplanmış prosese dayalı emisyon değerleri

YIL	Mcli Üretilen Klinker (ton)	*EF _{clc} (ton CO ₂ /ton klinker)	CF _{CKD}	CO ₂ Emisyon (ton)	Üretilen Klinker belirsizlik(ton)	EF _{clc} belirsizlik	CF _{CKD} belirsizlik	Belirsizlik %	Emisyon Belirsizlik (ton)
2015	1.350.624,00	0,52	1	702.324,5	2%	8%	1%	8,31%	58.339,45
2016	1.405.817,00	0,52	1	731.024,8	2%	8%	1%	8,31%	60.723,48
2017	1.034.573,00	0,52	1	537.978,0	2%	8%	1%	8,31%	44.687,81

4.1.2.3. Tier 3: Giren karbonat verilerinin kullanılması

Tier 3 yönteminde, çimento üretiminde kullanılan kalker v.b hammaddelerin içeriği, kullanılan fırın tipi, fırın çimento tozu, yakıt dışı karbon içerikli maddeler gibi parametreler önem taşımaktadır. Pilot tesis klinker üretiminde hammadde olarak kalker kullanılmaktadır. kullanılan kalkerin miktarı ve CaCO_3 içeriği hammadde kaynakları bölümündeki Çizelge 3.1’de verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan kalker miktarı, karbonat içeriği, moleküler ağırlığı ve emisyon faktörü verileri kullanılmıştır. Pilot tesisimizin sistemi kapalı sistem olduğu için fırına geri döndürülmeyen ve kalsinasyona uğramayan CKD yoktur. Buna ek olarak, fırın içerisine beslenen yakıt olmayan karbon içerikli maddelerde bulunmamaktadır. Sadece kalkerin pişmesi sırasında CaCO_3 ’ın ısı ile reaksiyona uğraması sonucu CO_2 oluşumu meydana gelmektedir.

Tier 3 yöntemi kullanılarak yapılan proses emisyon hesabının sonuçları Çizelge 4.12’de verilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere, emisyon hesabı kalker içeriğinin maksimum, minimum ve ortalama değerleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ancak toplam emisyonların verilmesi aşamasında ortalama olan değeri kullanılmıştır.

Proses emisyonu için belirsizlik hesabı ise, yine bölüm 3.5, Çizelge 3.11’deki verilen değerler kullanılarak yapılmış ve Çizelge 4.13’te verilmiştir.

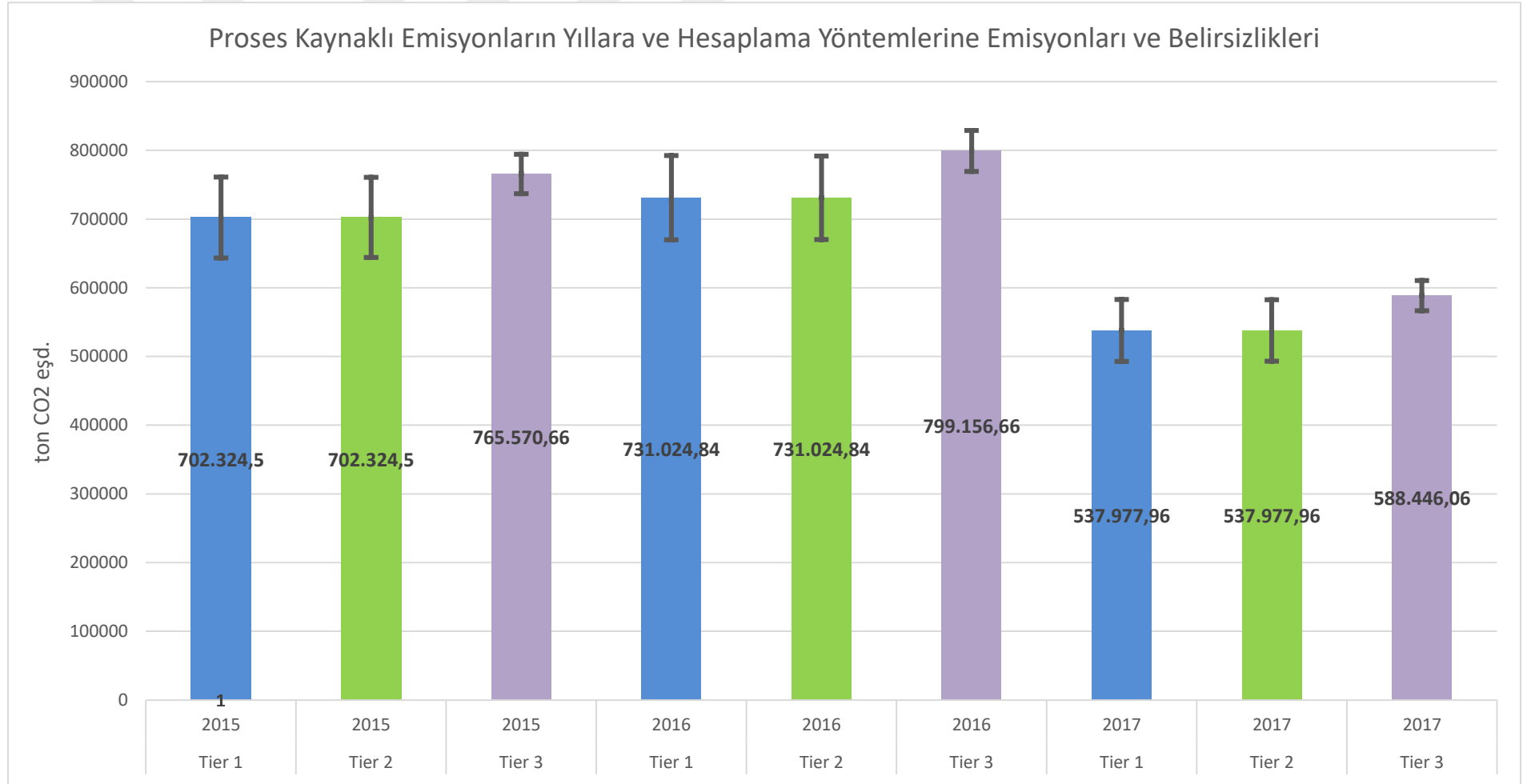
Çizelge 4.12: Yıllara göre Tier 3 yöntemiyle hesaplanmış prosese dayalı emisyon değerleri

YIL	Kullanılan Kalker (ton)	Kalkerin CaCO ₃ içeriği (%)			Moleküler ağırlığı (M _{CaCO₃} / M _{CO₃})	Mi			EF _i	F _i	CO ₂ Emisyon (ton)		
		min	max	ort		min	max	ort			min	max	ort
2015	2.087.483,00	45	55	50	1,668	1.566.973	1.915.189	1.741.081	0,43971	1	689.013,60	842.127,73	765.570,66
2016	2.179.062,00	45	55	50	1,668	1.635.717	1.999.209	1.817.463	0,43971	1	719.240,99	879.072,32	799.156,66
2017	1.604.517,00	45	55	50	1,668	1.204.433	1.472.085	1.338.259	0,43971	1	529.601,45	647.290,66	588.446,06

Çizelge 4.13: Tier 3 yöntemi ile hesaplanan proses emisyonu belirsizliği

CO ₂ Emisyon (ton)			Kalker belirsizliği (%)	Kalkerin CaCO ₃ içeriği belirsizliği (%)			EF _i belirsizlik (%)	Belirsizlik %			Emisyon belirsizlik (ton)		
min	max	ort		min	max	ort		min	max	ort	min	max	ort
689.013,60	842.127,73	765.570,66	3%	1%	3%	2%	1%	3,32%	4,36%	3,74%	22.852,00	36.707,50	28.645,03
719.240,99	879.072,32	799.156,66	3%	1%	3%	2%	1%	3,32%	4,36%	3,74%	23.854,53	38.317,87	29.901,70
529.601,45	647.290,66	588.446,06	3%	1%	3%	2%	1%	3,32%	4,36%	3,74%	17.564,89	28.214,75	22.017,64

Proses emisyonları için Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 yöntemi ile yapılan hesaplamalar ayrı ayrı sunulmuştur. Şekil 4.5'te tüm yöntemlerin yıllara göre emisyon durumları ve belirsizlikleri sunulmuştur. Şekil de mavi sütunlar Tier 1, yeşil sütunlar Tier 2 ve mor sütunlar Tier 3 yöntemini temsil etmektedir. Belirsizlik oranlarına bakıldığında, yakıt emisyonlarında olduğu gibi Tier 3 yöntemi ile yapılan proses emisyonlarının da belirsizlik payları diğer yöntemlere göre daha düşüktür. Tier 1 ve Tier 2 %8 civarında bir belirsizliğe sahip iken, Tier 3 de maksimum belirsizlik %3,7 olmaktadır. Belirsizliğin düşük çıkmasındaki en önemli husus ise, tesisin hesaplama da kullanılan verileri (CaCO_3 içeriği, kullanılan hammadde miktarı, elde edilen ürün miktarı gibi) kendi ölçümleriyle elde etmesidir. Tier 3 yönteminin verimli şekilde kullanılabilmesi için, tesislerde düzenli ölçümlerin ve parametre takiplerinin yapılması gerekmektedir. Veri takibi yapıldığı sürece emisyon hesaplarında en güvenli yol olan Tier 3 yöntemi rahat bir şekilde yapılabilir.



Şekil 4.5: Proses Kaynaklı Emisyonların Yıllara ve Hesaplama Yöntemlerine Emisyonları ve Belirsizlikleri (ton)

4.1.3. Toplam Emisyon Sonuçları (Yakıt+Proses)

Bu bölümde Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 yöntemleri kullanılarak yapılan yakıt ve proses emisyonları miktarları toplanarak, toplam emisyon elde edilmiştir. Yıllara göre toplam emisyonları ton CO₂ olacak şekilde Çizelge 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4.14: Tesisin baz alınan yıllardaki toplam emisyonları (ton)

YILLAR	Tier 1	Tier 2	Tier 3
2015	1.090.032,33	1.110.298,57	1.212.323,74
2016	1.149.917,19	1.165.979,15	1.270.674,27
2017	828.017,87	859.592,34	925.530,92

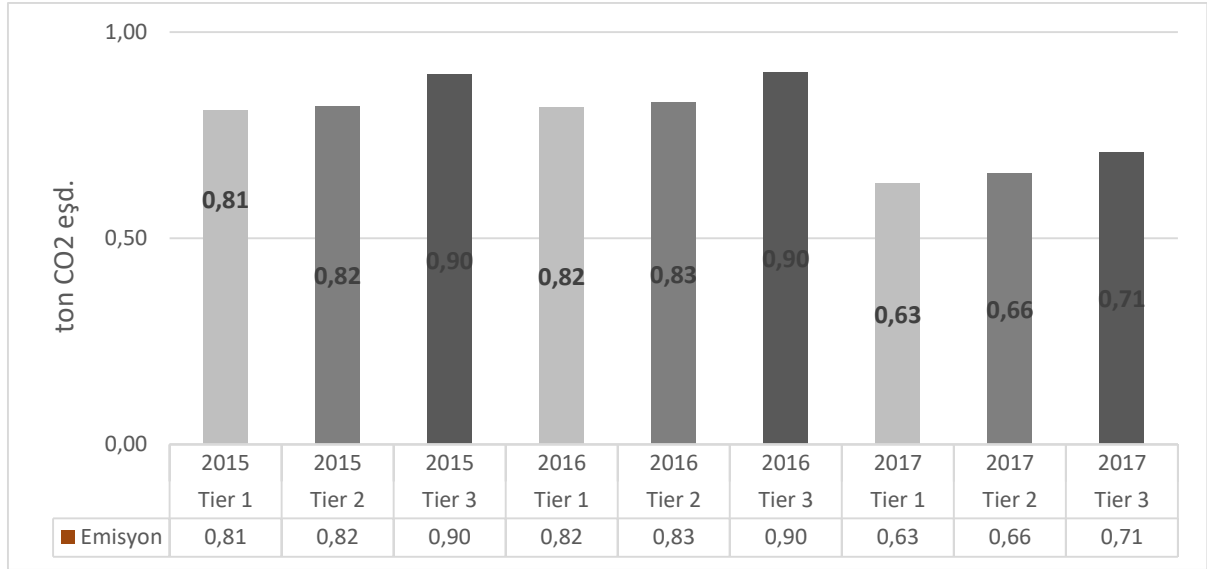
Toplam emisyon durumları kıyaslandığında, en yüksek emisyon değeri Tier 3 yöntemi ile yapılan hesaplamaların sonucu olduğu gözlemlenmektedir. Bunun sebepleri sıralanırsa; yakıt emisyonlarının NKD'lerinin IPCC'nin belirlemiş olduğu varsayılan değerlerden yüksek olması, proses emisyonlarının CaCO₃ içeriğine göre yapılması toplam emisyonların Tier 3 yönteminde yüksek çıkmasının temelini oluşturmaktadır.

Yıllara ve yöntemlere göre, tesiste üretilen birim ton klinker ve çimento başına düşen emisyon değerleri Çizelge 4.15'te paylaşılmıştır.

Çizelge 4.15: Birim ton çimento ve klinker üretimi başına düşen CO₂ emisyonu

	Birim ton klinker başına düşen emisyon (ton)			Birim ton çimento başına düşen emisyon (ton)		
YILLAR	Tier 1	Tier 2	Tier 3	Tier 1	Tier 2	Tier 3
2015	0,81	0,82	0,90	0,98	1,00	1,09
2016	0,82	0,83	0,90	0,98	0,99	1,08
2017	0,63	0,66	0,71	0,69	0,72	0,77

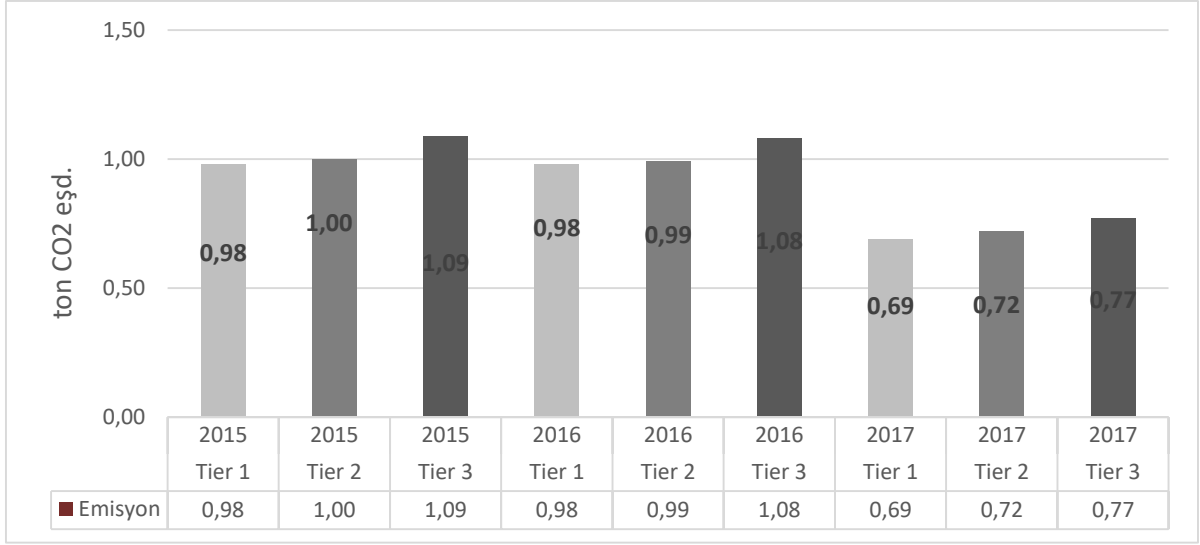
Yıllara ve yöntemlere birim ton klinker ve çimento başına düşen emisyon durumları sırasıyla Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.6: Yıllara ve yöntemlere göre birim ton başına klinker başına düşen emisyon durumları

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi birim ton klinker başına düşen emisyonların 2015 ve 2016 yıllarında benzerlik gösterirken, 2017 yılında bu iki yıla göre azalış eğilimindedir. Bu azalış, 2015 yılı ile 2016 yıllarında yakıt kaynağının büyük kısmının fosil yakıtlardan karşılanması ve fosil yakıt kaynaklarının ATY’ye göre daha yüksek emisyon faktörüne sahip olması olarak açıklanabilmektedir. 2015 yılına göre 2016 yılında ATY tüketim miktarlarında artış gözlenirken, petrokok tüketiminde azalış olmasına rağmen taş kömüründeki artış emisyon azaltımına engel oluşturmuştur. 2017 yılında hem taş kömürü hem de petrokok tüketimleri azalırken, ATY kullanım oranları önceki yıllara göre artarak, toplam yakıt tüketiminin %28,3’lük kısmını oluşturmuştur. Bu da 2017 yılında birim ton klinker başına düşen emisyonların azalmasına sebep olmuştur. Bunun yanı sıra 2017 yılında, üretim miktarlarının diğer iki yıla göre azalmış olması da emisyon azalmasının bir diğer sebebi olarak gösterilebilmektedir.

Tier 1 ve Tier 2 yöntemi kullanılarak yapılan emisyon hesabında tesisin klinker başına düşen emisyonu, bölüm 2.5.5’de paylaşılan Çizelge 2.17’de Türkiye geneli için 1990 – 2016 yılları arasında ki, birim ton klinker üretim başına düşene emisyonlar ile benzerlik göstermektedir. Bu benzerlik ise, Türkiye’de çimento sektörü kaynaklı sera gazı emisyonlarını hesaplamak için yöntem olarak Tier 1 ve Tier 2’yi seçmesi ile açıklanabilmektedir.



Şekil 4.7: Yıllara ve yöntemlere göre birim ton başına çimento başına düşen emisyon durumları

Şekil 4.7’de ise birim çimento başına düşen CO₂ emisyonları incelenmiştir. Tez kapsamında incelenen üç yıla bakıldığında, en yüksek çimento üretim miktarı 2017 yılına ait olmasına rağmen, en düşük sera gazı emisyonuna sahiptir. Çimento üretiminde, klinker üretim süreci proses kaynaklı emisyonları oluşturmaktadır. Çimento klinker içerisine katkı maddeleri ilave edilerek elde edilmektedir. Bu nedenle de çimento içeriğinde klinker oranı ne kadar azaltılırsa, birim çimento başına düşen emisyonlar o kadar azaltılabilecektir. Tesiste çimento üretim miktarları başına düşen emisyonların, klinker üretimi başına düşen emisyonlardan fazla olmasının nedeni çimento üretim miktarlarının seçilen yollarda klinkerden daha az olması olarak açıklanabilir. En düşük emisyonların 2017 yılında olması yakıt türü değişikliği ve üretim miktarlarındaki azalıştır.

4.1.4. Atık Emisyonlarının Hesaplanması ve Sonuçları

Pilot tesisin alternatif yakıt olarak (ATY) kullandığı atık miktarları bölüm 3.4’ de Çizelge 3.7’de verilmiştir. Çizelge 3.7’de 2014 yılında ATY olarak kullanılan atık miktarı da yer alması, 2014 yılında atılan ve biriken atık miktarının 2015 yılında atıklardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarına olan katkısından dolayıdır. Tesiste alternatif yakıt olarak kullanılan atıklar tesiste kullanılmayıp katı atık bertaraf tesislerine (depolama alanı) gönderilmesi durumunda, depolama alanlarında bu atıkların oluşturacağı CH₄ emisyonu hesaplanmıştır. Hesaplanan değer daha sonrasında CO₂ eşdeğerine çevrilerek, sonuçları Çizelge 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.16: Atıklardan kaynaklanacak olan CO₂ eşd. (ton)

	Toplam Atık Miktarı (Gg)	DOC	DOC _f	MCF	DDOC _m (Gg)	DDOC _{md} T	DDOC _{ma} T-1	k	DDOC _{ma} T	DDOC _m decompT	CH ₄ emisyonu (Gg)	CH ₄ emisyonu (ton)	CO ₂ emission (ton)
2014	43,3250	0,15201	0,5	0,6	1,975749975	1,975749975							
2015	46,0620	0,15201	0,5	0,6	2,100565386	2,100565386	1,975749975	0,09	3,906264902	0,170050459	0,11336697	113,3669724	3.174,28
2016	58,5030	0,15201	0,5	0,6	2,667912309	2,667912309	2,100565386	0,09	4,587684522	0,180793173	0,12052878	120,528782	3.374,81
2017	75,2640	0,15201	0,5	0,6	3,432264192	3,432264192	2,667912309	0,09	5,870552451	0,22962405	0,15308270	153,0827002	4.286,32
TOPLAM CO₂ eşd. (ton)													10.835,40

Tesisin kullanmakta olduğu atıklar, katı atık depolama alanlarına gönderilmesi durumunda Çizelge 4.16’da paylaşılan sonuca göre üç yıl içerisinde toplam 10.835,40 ton CO₂’in atmosfere salınmasına yol açacaktı. Atıklar alternatif yakıt olarak kullanılarak, bu emisyonların engellenmesinin yanı sıra, ATY kullanımı ile yenilenemez doğal kaynaklardan elde edilen fosil yakıt tüketimi de azaltılmıştır. Tesisin kullanmakta olduğu atıkların % 82’lik kısmının tehlikeli atık kategorisinde yer aldığı da göz önüne alındığında, uygulamanın çevre korumaya katkısının olduğu görülmektedir.

Tesisin yakıt tüketimin (TJ) 2015, 2016 ve 2017 yıllarında sırasıyla %14,32 , %17,9 ve %28,3’ünü ATY olduğu görülmektedir. Dolayısıyla üç yılda toplam 2609 TJ’lük fosil yakıt tasarrufu da sağlanmışır. Doğal kaynakların verimli kullanılmasına ek olarak; fosil yakıtların emisyon faktörleri ATY’ye göre daha yüksek olmasından dolayı oluşturdıkları emisyonlar da atığa göre daha fazla olmaktadır. Bu açıdan da alternatif yakıt olarak atık kullanımının çevresel yararı bulunmaktadır.

4.2. CSI Hesaplama Aracı İle Emisyonların Hesaplanması ve Sonuçları

Bu bölümde, CSI hesaplama aracı kullanılarak hesaplanan emisyonların, tesise özel çok fazla veri içermesinden dolayı sadece sonuçları paylaşılmıştır. Tesise özgü veriler de laboratuvar analizlerinin sonuçları, sürekli ölçümleri ve izlemeleri kapsamaktadır.

CSI hesaplama aracı ile yapılan hesaplamaların sonuçları Çizelge 4.17’de paylaşılmıştır. CSI modülü, tesis özgü verilerin en detaylı kullanıldığı yöntem olması sebebi ile doğruluk oranı daha yüksek olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.17: CSI yöntemi ile yapılan hesaplama sonuçları (ton)

YILLAR	YAKIT	PROSES	TOPLAM
2015	436.177,00	742.580,00	1.178.757,00
2016	462.335,00	741.098,00	1.203.433,00
2017	335.628,00	548.745,00	884.373,00

CSI sonuçları ile IPCC sonuçları karşılaştırıldığında, en yakın değerlerin Tier 3 de olduğu görülmüştür. Tier 3 ile CSI’nin benzerlik göstermesi, iki yönteminde tesise özgü veriler ile hesaplama yapması ile açıklanabilir. Özellikle yakıt emisyonlarında çok yakın değerler elde edilmiştir. Proses emisyonlarında fark ise; kalker içeriğindeki karbonat yüzdesinin Tier 3 hesaplama metodunda ortalama değerinin kullanılmasıdır.

4.3. Birlikte İşleme İle Emisyon Azaltımı Sonuçları

Birlikte atık işleme ile elde edilen CO₂ tasarrufu üç basamakta açıklanmıştır. Üç basamak için yapılan hesaplamaların sonuçları aşağıdaki gibidir:

1. basamakta tesiste kullanılan ATY yerine fosil yakıt tüketimine devam edilmesi kabulü yapılmıştır. Öncelikle tesisteki yakıt türlerinin, TJ cinsinden toplam yakıt tüketimine oranı bulunmuştur. Daha sonra ATY'nın toplam yakıt tüketimindeki payı, diğer fosil yakıtların oranları doğrultusunda paylaştırılmıştır. Elde edilen fosil yakıt tüketimleri üzerinden Tier 3 metodu kullanılarak, sera gazı emisyonları bulunmuştur. Yöntem olarak Tier 3 seçilmesinin sebebi ise, emisyon faktörü değerlerinde tesise özel olarak elde edilmiş olanın kullanılmasıdır. ATY yerine fosil yakıt tüketimine devam edilmesi durumunda üç yılda tesiste oluşacak olan yakıt kaynaklı emisyon hesabında Çizelge 3.12'de paylaşılan veriler kullanılarak yapılmıştır. Hesaplama detayları ve sonucu Çizelge 4.18'de verilmiştir.

Çizelge 4.18: Tesiste ATY kullanılmadığı ve yerine fosil yakıtlar ile devam edildiği durumda oluşacak emisyon (ton)

Yakıt Türü	Yakıt Tüketimi (TJ)			Emisyon Faktörü (ton/TJ)	Emisyon (ton)		
	2015	2016	2017		2015	2016	2017
Taş Kömürü	53,07	209,20	65,97	101,0	5.359,88	21.128,98	6.663,35
Linyit	124,64	112,63	198,66	101,0	12.588,26	11.375,59	20.064,32
P.Kok	487,51	567,82	770,74	97,5	47.532,10	55.361,99	75.147,26
Doğalgaz	2,89	4,91	2,27	56,00	161,96	275,16	127,27
Toplam (ton)					65.642,19	88.141,72	102.002,19
Üç yılın toplamı (ton)					255.786,11		

Tez için seçilmiş olan pilot tesisimizde mevcut durumdaki ATY tüketimi yerine fosil yakıtların tüketimine devam edilmiş olsaydı, üç yılda toplam 255.786,11 ton CO₂ salınımı meydana gelecekti. Tesis üç yılda ATY kullanımı sonucu, daha az (195.641,06 ton) CO₂ oluşumu meydana gelmiştir. ATY tüketimi kaynaklı emisyon sonucu 3. basamakta ayrıca verilmiştir. Atıkların, alternatif yakıt olarak değerlendirilmesi sonucu, hem daha az emisyon atmosfere salınmıştır hem de endüstriyel ve tehlikeli içerikli atıkların toprağa gitmesinin önüne geçilmiştir. Bu sayede toprağa gitmesi önlenen atık miktarı 179.829 ton'dur. Azaltılan

fosil yakıt miktarları ise Çizelge 4.19’da görüldüğü üzere üç yılda toplam; 12.644,95 ton taş kömürü, 17.951, 43 ton linyit, 53.845, 45 ton petrokok ve 288,57 ton doğalgaz olmuştur. Fosil yakıt miktarlarını elde etmek için, TJ cinsinden tüketilen fosil yakıtların, tesise özgü NKD’lerine oranlanmıştır.

Çizelge 4.19: Üç yılda azaltılan fosil yakıt miktarları (ton)

Yakıt Türü	Yakıt Tüketimi (TJ)			NKD (GJ/ton)	Azaltılan fosil yakıt miktarı (ton)			Üç yılda toplam (ton)
	2015	2016	2017		2015	2016	2017	
Taş Kömürü	53,07	209,20	65,97	25,96	2.044,37	8.059,04	2.541,54	12.644,95
Linyit	124,64	112,63	198,66	24,28	5.132,56	4.638,12	8.180,74	17.951,43
P.Kok	487,51	567,82	770,74	33,91	14.375,24	16.743,25	22.726,96	53.845,45
Doğalgaz	2,89	4,91	2,27	35,17	82,23	139,71	64,62	286,57

2. basamakta tesiste alternatif yakıt olarak kullanılan atıklar kullanılmazaydı, bu atıklar katı atık bertaraf tesislerine gönderilerek, bu alanlarda sera gazı emisyonu oluşumuna sebep olacaktı. Bu kapsamda atıkların yakılmayıp, katı atık depolama alanlarına gönderilmesi sonucunda oluşacak olan emisyonlar hesaplanmış ve sonuçta atıklardan kaynaklanacak olan emisyon 10.835,40 ton CO₂ olarak bulunmuştur. Bu basamak ile ilgili detaylar Çizelge 4.16’da verilmiş ve değerlendirmeleri bölüm 4.1.4 atık emisyonların hesaplanması bölümünde yapılmıştır.

3. basamak da ise, tesisin mevcut durumda kullanmış olduğu ATY sonucu üç yılda toplam ne kadar emisyon salınımı yaptığı Tier 3 yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama tesise özel NKD ve EF değerleri kullanılmış olup, sonuçları Çizelge 4.20’de paylaşılmıştır. Tesiste üç yılda ATY tüketimi sonucu 195.641,06 ton CO₂ oluşumu meydana gelmiştir.

Çizelge 4.20: ATY kullanımından kaynaklanan CO₂ emisyonu

Yıllar	ATY Tüketimi (ton)	Net Kalorifik Değer (GJ/ton)	Yakıt Tüketimi (GJ)	Yakıt Tüketimi (TJ)	Emisyon Faktörü (ton/TJ)	Emisyon (ton)
					CO ₂	CO ₂
2015	46.062,00	14,65	674.808,30	674,81	75,00	50.610,62
2016	58.503,00	15,30	895.095,90	895,10	75,00	67.132,19
2017	75.264,00	13,80	1.038.643,20	1.038,64	75,00	77.898,24
Toplam (ton)						195.641,06

Birlikte atık işleme 3 basamakta detaylı olarak anlatılmıştır. Bu işlem sonucu tesiste üç yılda yapılan toplam CO₂ tasarrufu 70.980,45 ton olduğu bulunmuştur.

CO₂ tasarrufu = (fosil yakıt kaynaklı SGE + Atık kaynaklı SGE) – ATY kaynaklı SGE

CO₂ tasarrufu = (255.786,11 + 10.835,40) - 195.641,06

CO₂ tasarrufu = 70.980,45 ton

Hesaplama yapılan üç yılda toplam 70.980,45 ton CO₂ tasarrufu sağladığı ve %26 oranında tesisin emisyonlarını azalttığı bulunmuştur. Birlikte işleme çevresel açıdan büyük önem taşımaktadır. Bu işlem sayesinde; yenilenemez doğal kaynak tüketimi ciddi oranlarda azaltılabileceği pilot tesis uygulamaları ile gözlemlenmiştir. Doğal kaynak tüketimi azaltılmasının yanı sıra hem katı atık depolama tesislerinde oluşacak olan emisyonlar engellenebilmekte hem de depolama alanlarının kullanılmasını azaltmaktadır. Günümüzde katı atık bertaraf alanları büyük hacimler kaplamaktadır. Alternatif yakıt olarak atık kullanımı ile katı atık depolama için ayrılan alanlar, başka şekilde değerlendirilebilecektir.

4.4. Türkiye Geneli Senaryolarının Sonuçları

Tez kapsamında seçilmiş olan tesisin uygulamakta olduğu CO₂ tasarrufu Türkiye geneline uyarlanmıştır. Hesaplama yapılan yıllar için Türkiye'nin çimento sektörünün kullanmış olduğu fosil yakıtlar üzerinden tahminlerde bulunulmuştur. Tesis için açıklanan üç basamak Türkiye için senaryolaştırılmıştır. Senaryo sonuçları tek tek açıklanmıştır.

4.4.1. Senaryo 1

Senaryo 1’de pilot tesisteki alternatif yakıt kullanım oranları, Türkiye genelindeki çimento üretim tesislerinde uygulanmış olsaydı ne kadar fosil yakıt ve bu yakıtlardan ne kadar emisyon azaltımı yapılabileceği açıklanmıştır.

İlk olarak bölüm 3.7 içerisinde paylaşılan Çizelge 3.14’te yıllara göre yakıt tüketimleri sıralanmış olan yakıt türlerinin, toplam tüketimdeki payları bulunmuştur. Ardından pilot tesisin 2015, 2016 ve 2017 yılları için sırayla %14,32, %17,9 ve %28,3 olan ATY tüketimi Türkiye geneli yakıt tüketimine uyarlanmıştır. Bulunan değer pilot tesis kadar alternatif yakıt kullanımı durumunda yıllara göre toplamda ne kadar fosil yakıt tüketiminin azaltılabileceğidir. Daha sonrasında yıllara göre bulunan toplam azaltılabilecek fosil yakıt tüketimi, Çizelge 4.21’de açık bir şekilde görüleceği şekilde yakıt türlerine toplam yakıttaki payı kadar olacak şekilde bölüştürülmüştür. Böylece hangi yakıttan ne oranda kazanç sağlanabileceği açıklanmıştır. Örnekle açıklarsak, 2015 yılında toplamda 240.533,90 TJ’lük bir yakıt tüketimi gerçekleşmiştir. Pilot tesis ise 2015 yılında %14,32’lik ATY tüketimi oranına sahiptir. Bu oran Türkiye’ye uyarlandığında 2015 yılında 34.444 TJ’lük bir yakıt tüketiminin azalması gözlemlenebilirdi.

En son olarak; yakıt türlerine göre bulunan Çizelge 4.21’de paylaşılmış olan azaltılabilecek yakıt tüketimleri, yakıtlara göre belirlenmiş (Türkiye için geçerli olan EF değerleri) olan emisyon faktörü ile çarpılması sonucu azaltılabilecek olan CO₂ emisyonu hesaplanmıştır. Hesaplamada kullanılan EF değerleri yakıt türlerine göre Çizelge 3.15’te verilmiştir. Emisyon faktörü değerleri CRF tablolarından elde edilmiş olup, 2017 yılı verileri yayınlanmadığı için, 2016 yılı verisi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.22’de paylaşılmıştır.

Çizelge 4.21: Azaltılabilecek yakıt tüketiminin yıllara ve yakıt türlerine göre dağılımı (TJ)

Yakıt Tipi	Yakıt Tüketimi (TJ)			Yakıtların toplam yakıt tüketimine oranı (%)			Azaltılabilecek Yakıt Tüketimi (TJ)		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017
Taş Kömürü	88.604,40	106.257,60	122.844	36,8%	38,2%	38,2%	12.688	19.020	34.765
Linyit	11.376,40	6.556,90	7.580	4,7%	2,4%	2,4%	1.629	1.174	2.145
Kok	0	564	652	0,0%	0,2%	0,2%	0	101	185
P.Kok	130.942,50	153.985,00	178.022	54,4%	55,4%	55,4%	18.751	27.563	50.380
Petrol	1.311,30	1.945,80	2.250	0,5%	0,7%	0,7%	188	348	637
Doğalgaz	8.299,20	8.769,60	10.139	3,5%	3,2%	3,2%	1.188	1.570	2.869
Toplam Yakıt Tüketimi (TJ)	240.533,80	278.078,90	321.487,02	100%	100%	100%	34.444	9.776,12	90.981,83
ATY kullanım oranı (pilot tesis)	14,32%	17,9%	28,3%						
Azaltılabilecek toplam YT	34.444,44	49.776,12	90.980,83						

Çizelge 4.22: Azaltılabilecek olan fosil yakıtların yıllara ve yakıt türlerine bağlı emisyonları

Yakıt Türü	Yakıt Tüketimi (TJ)			Emisyon Faktörü (kg/TJ)									Emisyon (Gg)								
				2015			2016			2017			2015			2016			2017		
	2015	2016	2017	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Taş Kömürü	12.688	19.020	34.765	95.020,00	10,00	1,50	93.380,00	10,00	1,50	93.380,00	10,00	1,50	1.205,63	0,13	0,02	1.776,10	0,19	0,03	3.246,35	0,35	0,05
Linyit	1.629	1.174	2.145	95.020,00	10,00	1,50	93.380,00	10,00	1,50	93.380,00	10,00	1,50	154,80	0,02	0,00	109,60	0,01	0,00	200,32	0,02	0,00
Kok	0	101	185	95.020,00	10,00	1,50	93.380,00	10,00	1,50	93.380,00	10,00	1,50	0,00	0,00	0,00	9,43	0,00	0,00	17,23	0,00	0,00
P.Kok	18.751	27.563	50.380	95.020,00	10,00	1,50	93.380,00	10,00	1,50	93.380,00	10,00	1,50	1.781,72	0,19	0,03	2.573,86	0,28	0,04	4.704,51	0,50	0,08
Petrol	188	348	637	97.010,00	3,00	0,60	96.740,00	2,99	0,60	96.740,00	2,99	0,60	18,22	0,00	0,00	33,69	0,00	0,00	61,59	0,00	0,00
Doğalgaz	1.188	1.570	2.869	55.090,00	1,00	0,10	56.040,00	1,00	0,10	56.040,00	1,00	0,10	65,47	0,00	0,00	87,97	0,00	0,00	160,79	0,00	0,00
Toplam (Gg)													3.225,83	0,33	0,05	4.590,65	0,48	0,07	8.390,79	0,88	0,13
Toplam (Gg)													3.248,34			4.623,24			8.450,37		
3 yıl Toplam (Gg)													16.321,96								

Çizelge 4.21'e göre sektörde enerji kaynağı olarak en yüksek paylara sahip taş kömürü ve petrokoktur. Petrokok yakıt tüketimlerinin %50'den fazlasını oluştururken, taş kömürü yaklaşık %38'ini oluşturmaktadır. Alternatif yakıt kullanımı ile bu iki fosil yakıtta önemli oranda azalma sağlanması mümkündür. Çizelge 4.22'de görüldüğü üzere, bu yakıtların emisyon faktörleri de yüksek olmasından dolayı, kullanımlarında azalma ile dolaylı olarak oluşabilecek emisyonlarda ciddi oranda azalma gözlenir. Azaltılabilecek yakıt tüketimlerinin üç yılda oluşturdukları emisyon toplamda 16.321,96 Gg CO₂ olarak hesaplanmıştır.

4.4.2. Senaryo 2

Senaryo 2'de Türkiye genelindeki çimento sektörünün, pilot tesis oranında ATY kullanımı durumunda depolama alanlarına gönderilmiş olan atıkların ne kadar azaltılabileceği ve bu alanlarda oluşan ne kadar sera gazı emisyonlarının engellenebileceği açıklanmıştır.

Atıklardan kaynaklanan emisyon hesabında; atık içerikleri, katı atık bertaraf tesisi özellikleri, atıkların bozunma süreleri gibi parametreler tesis ile aynı kabul edilerek yapılmıştır. Pilot tesis ATY kullanım oranları Türkiye'ye uyarlanarak, azaltılabilecek yakıt tüketimleri Çizelge 4.21'de elde edilmiştir. Atıklar, bu azaltılacak olan fosil yakıtlar yerine kullanılmıştır. Ancak atık emisyonlarının hesaplanabilmesi için, tüketimlerin Gg cinsinden olması gerekmektedir. Azaltılabilecek olan yakıt tüketimleri TJ cinsinden olduğu için, ilk olarak bu fosil yakıtların NKD değerleri kullanılarak, ATY olarak değerlendirilecek atık miktarları elde edilmiştir ve Çizelge 4.23'te verilmiştir.

Çizelge 4.23: ATY olarak değerlendirilecek atık miktarı (Gg)

Yakıt Tipi	Azaltılabilecek Yakıt Tüketimi (TJ)				NKD (TJ/Gg)	ATY olarak değerlendirilecek Atık Miktarı (Gg)			
	2014	2015	2016	2017		2014	2015	2016	2017
Taş Kömürü	10.389	12.688	19.020	34.765	28,20	368,41	449,9	674,5	1.232,8
Linyit	2.650	1.629	1.174	2.145	11,90	222,68	136,9	98,6	180,3
Kok	0	0	101	185	28,20	0,00	0,0	3,6	6,5
P.Kok	16.602	18.751	27.563	50.380	32,50	510,84	577,0	848,1	1.550,2
Petrol	140	188	348	637	42,30	3,30	4,4	8,2	15,1
Doğalgaz	448	1.188	1.570	2.869	48,00	9,33	24,8	32,7	59,8
TOPLAM						1.114,57	1.192,98	1.665,72	3.044,60

Çizelge 4.23'te elde edilen ATY olarak değerlendirilecek atıkların, normalde depolama alanlarına gönderilmesi sonucu oluşturdukları CH₄ emisyonları hesaplanmış ve sonuçları Çizelge 4.24'te paylaşılmıştır.

Çizelge 4.24: Katı atık bertaraf alanlarına gönderilen atıkların yıllara göre emisyon durumları (ton)

	Toplam Atık Miktarı (Gg)	DOC	DOC _f	MCF	DDOC _m (Gg)	DDOC _{md} T	DDOC _{ma} T-1	k	DDOC _{ma} T	DDOC _m decomp ^T	CH ₄ emisyon (Gg)	CH ₄ emisyonu (ton)	CO ₂ emisyonu (ton)
2014	1.114,5684	0,15201	0,5	0,6	50,82766275	50,82766275							
2015	1.192,9849	0,15201	0,5	0,6	54,40368948	54,40368948	50,82766275	0,09	100,8566755	4,374676688	2,91645113	2916,451125	81.660,63
2016	1.665,7203	0,15201	0,5	0,6	75,96184284	75,96184284	54,40368948	0,09	125,6830713	4,682461071	3,12164071	3121,640714	87.405,94
2017	3.044,6045	0,15201	0,5	0,6	138,8430988	138,8430988	75,96184284	0,09	208,2669958	6,537945778	4,35863052	4358,630519	122.041,65
TOPLAM													291.108,23

Sonuç olarak Türkiye genelinde bulunan çimento tesisleri, pilot tesisin tüketim oranı kadar ATY kullanmış olması durumunda üç yılda toplam 291.108,23 ton CO₂ eşd.'i atmosfere salımı engellenmesi mümkündür..

Atmosfere yapılan emisyonların engellenmesinin yanı sıra, üç yıl içerisinde toplamda 5.903,31 Gg atığın depolama alanlarına gönderilmesinin önlenabilir, dolayısıyla depolama alanı olarak kullanılan bölgeler başka şekillerde değerlendirilebilir.

4.4.3. Senaryo 3

Senaryo 3'te çimento sektörü genelinde, pilot tesis oranında ATY tüketimi yapılması durumunda oluşacak olan emisyonlar hesaplanmıştır. Hesaplarda Çizelge 4.23'te hesaplanarak paylaşılmış olan ATY olarak değerlendirilebilecek atık miktarları kullanılmıştır. Hesaplamalarda atıklar için gerekli olan NKD ve EF değerleri için tesisin verileri kullanılmıştır. Bu nedenle hesaplama yöntemi olarak Tier 3 seçilmiştir. Hesaplamalar ile ilgili detaylar ve sonuçları Çizelge 4.25'te verilmiştir.

Çizelge 4.25: ATY kullanımı olması durumunda oluşacak olan emisyon hesabı

Yıllar	ATY Tüketimi (ton)	Net Kalorifik Değer (GJ/ton)	Yakıt Tüketimi (GJ)	Yakıt Tüketimi (TJ)	Emisyon Faktörü (ton/TJ)	Emisyon (ton)
					CO ₂	CO ₂
2015	1.192.984,9	14,65	17.477.228,49	17.477,23	75,00	1.310.792,14
2016	1.665.720,3	15,30	25.485.520,59	25.485,52	75,00	1.911.414,04
2017	3.044.604,5	13,80	42.015.542,03	42.015,54	75,00	3.151.165,65
Toplam (ton)						6.373.371,83
Toplam (Gg)						6.373,37

Sektörde fosil yakıt tüketimi azaltılarak, alternatif yakıtlara geçilmesi durumunda, Türkiye genelinde fosil yakıt yerine atık kullanımı olması durumunda ATY kaynaklı üç yılda toplam 6.373,37 ton emisyon oluşumu gerçekleşecektir. Fosil yakıtların emisyon faktörü katsayılarının daha yüksek olması sebebiyle, kirleticilik oranları daha fazla olmaktadır. Bunun yanı sıra atıkların kalorifik değerlerinin, fosil yakıtlara kıyasla daha düşük olmasından dolayı depolama alanına gönderilecek olan atıkların büyük bir kısmının önüne geçilmesi mümkündür.

ATY kullanımı sonucu, 5.903,31 Gg fosil yakıttan tasarruf sağlanabilirdi. Doğal kaynakların verimli kullanımı açısından da ATY büyük önem taşıdığı görülmüştür.

Birlikte işleme ile emisyon azaltımını bu üç senaryo ile birleştirdiğimizde, ortaya üç yılda toplam Türkiye geneli çimento üretiminde ne kadar CO₂ tasarrufu yapılabileceği açıklanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ tasarrufu} = (16.321,96 + 291,11) - 6.373,37$$

$$\text{CO}_2 \text{ tasarrufu} = 10.239,69 \text{ Gg} = 10,23 \text{ Mt}$$

Tesisin uygulamakta olduğu alternatif yakıt kullanımı Türkiye' ye uyarlandığında, sadece üç yılda 10 Mt emisyon engellenmesi mümkün olacağı görülmüştür. Üç yılda sektörden kaynaklanan emisyonlarda % 61 oranında azaltımın mümkün olabileceği gözlemlenmiştir. Emisyon azaltımı dışında, katı atık depolama alanların azaltılabileceği ve ATY kullanımı ile ciddi oranda fosil yakıt kazancı sağlanabileceği de anlaşılmıştır.

5. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER

İklim değışikliğı günden güne önem kazanan ve insan faaliyetlerinin sebep olduğı sera etkisine sebep olan gazlarına yönelik önlem alınması gereken konulardan biridir. İklim değışikliğine sebep olan sera gazı emisyonlarının belirli bir seviye de tutulmaması sonucu, iklim sisteminin geri dönölmez boyutlara ulaşacağı araştırmalar ile açıklanmaktadır. Türkiye’ nin 2016 yılı toplam sera gazı emisyonları 496,10 Mt olarak UNFCC’ ye raporlanmıştır. Emisyonların büyük bir kısmını (% 72,8) enerji sektörü oluşturmaktadır. Endüstriyel işlemler ise % 12,8’ lik pay ile ikinci sırada yer almaktadır. Endüstriyel işlemler altında yer alan çimento sektörü ise ülke emisyonlarının % 7,2’ sini oluşturmaktadır. Emisyon payının yüksek olması sebebiyle çimento sektörü Türkiye için ana kategoride yer almaktadır. Bu nedenle sektör de emisyonların devamlı olarak izlenmesi ve yıllık olarak raporlama yapılması zorunluluğı bulunmaktadır. Çimento üretiminde CO₂ klinkerleşme sürecinde meydana gelmektedir. Karbonat içerikli hammaddelerin yüksek ısı ile reaksiyona girmesi sonucu CO₂ açığa çıkmaktadır. Bu nedenle entegre çimento fabrikalarında emisyon oluşumu daha yüksek olmaktadır.

Tez kapsamında, entegre bir pilot tesis seçilmiştir. Pilot tesisten alınan veriler doğrultusunda ilk olarak IPCC kılavuzunda yer alan Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 yöntemleriyle baz alınan 2015, 2016 ve 2017 yılları için sera gazı emisyonları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda yakıt ve proses emisyonları ayrı ayrı hesaplanmış daha sonrasında toplanarak toplam emisyon sonucuna ulaşılmıştır. Yöntemlerin belirsizliklerine bakıldığında en düşük hata payı Tier 3 yönteminde olduğu görölmüştür. Yakıt emisyonları için belirsizlik Tier 1 ve Tier 2’ de % 20 ile 24 arasında değışiklik gösterirken, Tier 3’ de % 7,3’ dir. Proses emisyonlarında ise, Tier 1 ve Tier 2’ de % 8 civarında iken, Tier 3 için % 3 civarında olduğu bulunmuştur. Belirsizlikler değerlendirildiğinde Tier 3’ ün en güvenilir yöntem olduğu anlaşılmıştır. Belirsizliklere ek olarak CSI hesaplama aracı ile yapılan emisyon sonuçları ile Tier 3’ ün benzerlik göstermesi de yine Tier 3 metodunun güvenilirliğini doğrulamaktadır. CSI daha önceden de bahsedildiğı gibi, tesise özel verilen girişı yapıldığında, sonucu alabildiğiniz bir hesaplama aracıdır. Tesise özel detaylı veri girişı sonucu emisyonlar modöl sonucu otomatik olarak elde edilmektedir. CSI aracını kullanabilmek için sürekli veri takibinin yapılmasının gerekliliğı görölmüştür.

Tez çalışması kapsamında seçilmiş olan tesis, Türkiye’de atık bertarafı konusunda öncü fabrikalardan biridir. Alternatif olarak kullanmakta olduğu atıklar ile fosil yakıt tüketimini azaltmıştır. Tesisin 2015, 2016 ve 2017 yıllarındaki ATY kullanım oranları sırasıyla %14,32, %17,9 ve %28,3’tür. Bu kullanım oranlarına hesaplama yapılan üç yılda toplam 70.890,45 ton CO₂ azaltımı gerçekleştirmiştir. Tesisin ATY kullanımı ile üç yılda emisyonlarını %26 azaltmıştır. Emisyon azaltımının yanı sıra hem 179.829 ton atığın depolama alanlarına gönderilmesini engellemiş hem de 84.728 ton fosil yakıt kazancı sağlamıştır. Alternatif yakıt kullanımı ile emisyon azaltımı pek çok ülkede yapılmaktadır. Avusturya 2014 yılında ATY kullanım oranını %75,5’e çıkarmıştır. Avusturya’ da ülke emisyonlarının yaklaşık %3’ünü oluşturan emisyonların, ATY kullanımı ile düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, 2012 yılında Avrupa Birliği’ndeki çoğu çimento fırını alternatif yakıt kullanımına uyarlanmış ve enerjisinin %34’ünü ATY’den sağlamaya başlamıştır. Yapılan uygulamalar ile ATY kullanımının ulusal emisyonların azaltımındaki payı olduğu görülmüştür. [60].

Çalışmanın son kısmında pilot tesisin ATY kullanım oranları, Türkiye geneli çimento sektörüne uyarlanmış ve hesaplama yapılan üç yılda 10 Mt emisyonun azaltılabileceği görülmüştür. Sera etkisine sebep olan gazların engellenmesine ek olarak, doğal kaynak kullanımında da 175.201 TJ’lük kazanç sağlanırken, 5.903 Gg atığın da toprağa gitmesinin engellenebileceği bulunmuştur. Mevcut durumda toplam ülke emisyonlarının %7,2 sini oluşturan sektör de; günümüzde alt yapı ve yol yapım çalışmaları, kentsel dönüşüm projeleri, üçüncü havaalanı ve Çanakkale boğaz köprüsü inşaatları gibi büyük çalışmaların devam ettiği düşünüldüğünde, çimento sektöründe önümüzdeki yıllarda kapasite artışı olabileceği öngörülmektedir. Çimento sektörü enerjiyi yoğun kullanan sektörlerin başında gelmesinden dolayı sera gazı emisyonlarının azaltılması ve doğal kaynak tüketiminin sınırlı tutulabilmesi açısından alternatif yakıt kullanımı büyük önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra, Türkiye’ nin nüfusu artışı yüksek olan bir ülke olması göz önüne alındığında mevcut durumdaki atıkların gelecekte daha da fazla olacağı ve katı atık bertarafları için daha fazla alanın kullanımı söz konusu olacaktır. Atık kullanımı katı atık depolama alanları açısından da kazanç sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] United Nations, *United Nations Framework Convention on Climate Change*, United Nations, **1992**.
- [2] T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, *İklim Değişikliği ve Türkiye*, Ankara, **2012**.
- [3] Yeni Bir Dünya İçin Kimya, Sera Etkisinin Etkileri, <https://yenibirdunyaicinkimya.wordpress.com/%20cozum-yollari/> (Mayıs, **2018**).
- [4] United Nations, *Kyoto Protocol to The United Nations Framework Convention on Climate Change*, Kyoto, Japan, **1998**.
- [5] United States Environmental Protection Agency, *Understanding Global Warming Potentials*, <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>, (Nisan, **2018**).
- [6] IPCC Working Group I Contribution to AR5, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, IPCC, Bern, Switzerland, **2016**.
- [7] Yapraklı, S., Bayramoğlu, T., Türkiye’de Enerji Kullanımı ve İklim Değişikliği: 1990-2030 Dönemine İlişkin Tanımsal Bir Uygulama, *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, no. 19/2, pp. 430-453, **2017**.
- [8] Mauna Loa Observatory, *CO2.Earth/daily CO2 concentration*, Mauna Loa Observatory | Atmospheric CO2 Concentrations, <https://www.co2.earth/daily-co2>. (Ağustos, **2018**).
- [9] Darby, M., *Five Ways 2°C Global Warming is Worse Than 1,5 °C*, <http://www.climatechangenews.com/2016/04/21/five-ways-2c-global-warming-is-worse-than-1-5c/>, (Ağustos, **2018**).
- [10] United States Environmental Protection Agency, *Global Emissions by Gas*, <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>, (Nisan, **2018**).

- [11] Durmuş, A., İklim Değişikliği ve 21. Yüzyıl Kalkınma Perspektifi, *Kalkınmada Anahtar Verimlilik*, 341, 4-9, **2017**.
- [12] Karakaya, E., Özçağ, M., *Sürdürülebilir Kalkınma ve İklim Değişikliği: Uygulanabilecek İktisadi Araçlarının Analizi*, Kırgızistan-Türkiye Manas Üniversitesi, I.Maliye Konferansı, Geçiş Ekonomilerinde Mali Politikalar, Bişkek, **2004**.
- [13] Republic Of Turkey, *INDCs as communicated by Parties*, <http://www4.unfccc.int/submissions/indc/Submission%20Pages/submissions.aspx> (Nisan, **2018**).
- [14] Intergovernmental Panel on Climate Change, *IPCC Factsheet: What is the IPCC?*, http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_what_ipcc.pdf, (Nisan, **2018**).
- [15] Türkeş, M., Şen, Ö.L., Kurnaz, L., Madra, Ö., Şahin, Ü., *İklim Değişikliğinde Son Gelişmeler: IPCC 2013 Raporu*, İstanbul Politikalar Merkezi, İstanbul, **2013**.
- [16] Intergovernmental Panel of Climate Change, *The IPCC and The Sixth Assessment Cycle*, https://www.ipcc.ch/pdf/ar6_material/AC6_brochure_en.pdf. (Nisan, **2018**).
- [17] World Business Council for Sustainable Development, *Cement Sustainability Initiative*, <https://www.wbcsdcement.org/index.php/about-csi>, (Nisan, **2018**).
- [18] World Business Council for Sustainable Development, *Cement Sustainability Initiative Our Members*, <https://www.wbcsdcement.org/index.php/about-csi/our-members>, (Nisan, **2018**).
- [19] World Business Council for Sustainable Development, *CO₂ Accounting and Reporting*, <https://www.wbcsdcement.org/index.php/key-issues/climate-protection/co-accounting-and-reporting-standard-for-the-cement-industry>, (Ağustos, **2018**).
- [20] Turkish Statistical Institute, *Turkish Greenhouse Gas Inventory 1990-2016*, Ankara, **2018**.

- [21] United Nations Framework Convention on Climate Change, *GHG Profiles - Annex I*, http://di.unfccc.int/ghg_profile_annex1 (Ağustos, **2018**).
- [22] Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı, *TR63 Bölgesi Çimento Sektör Raporu 2015*, **2015**.
- [23] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, *Çimento Üretiminin Tarihçesi*, <http://www.tcma.org.tr/index.php?%20page=icerikgoster&menuID=53>, (Nisan, **2018**).
- [24] Sanayi ve Verimlilik Genel Müdürlüğü, *Çimento Sektör Raporu (2018)*, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Ankara, **2018**.
- [25] CEMBUREAU The European Cement Association , *Activity Report 2017*, Brussels, **2018**.
- [26] ÇİMSA, *ÇİMSA 2017 Entegre Faaliyet Raporu*, **2018**.
- [27] Türkiye Sınai Kalkınma Bankası A.Ş., *Sektörel Görünüm: İnşaat, Çimento ve Seramik Mayıs 2018*, **2018**.
- [28] İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı Çevre Projeleri Grubu, TÜBİTAK MAM Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü, *İklim Değişikliği ve Çimento Sektörü*, T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Ankara, **2014**.
- [29] İhracat Genel Müdürlüğü - Kimya Ürünleri ve Özel İhracat Daire Başkanlığı, *Çimento Sektörü*, T.C. Ekonomi Bakanlığı, Ankara, **2016**.
- [30] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, *Türkiye'deki Çimento Fabrikaları Haritası*, <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&cntID=204>, (Ağustos, **2018**)
- [31] B. Çevik, *Çimento Sektörü*, Türkiye İş Bankası - İktisadi Araştırmalar Bölümü, **2016**.
- [32] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, *Kapasite 2017*, <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=42>, (Ağustos, **2018**).

- [33] ÇİMSA, *ÇİMSA 2016 Entegre Faaliyet Raporu*, **2017**.
- [34] Y. Engin, *2017 Türkiye Çimento İstatistikleri*,» <http://www.betonvecimento.com/sektorel/2017-turkiye-cimento-istatistikleri>, (Ağustos, **2018**).
- [35] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, *Çimento Nasıl Üretilir?*, <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=54>. (Nisan, **2018**).
- [36] Frauke Schorcht, F., Kourti, I., Scalet, B.M., Roudier, S., Sancho, L.D., *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide*, Joint Research Centre of the European Commission, Spain, **2013**..
- [37] İş Teftiş Kurulu Başkanlığı, *Çimento Fabrikalarında İş Sağlığı ve Güvenliği Denetim Projesi Genel Değerlendirme Raporu*, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara, **2006**.
- [38] Yıldız, N., Klinker Üretimi, *Madencilik Türkiye*, 48, 94 - 98, **2015**.
- [39] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, *Çimento Tipleri Nelerdir*, <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=54>., (Nisan, **2018**).
- [40] Gibbs, J.M., Soyka, P., Conneely, D., CO₂ Emissions From Cement Production, *Background Papers IPCC Expert Meeting on Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, Institute for Global Environmental Strategies, Japan, **2002**..
- [41] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, *Enerji Denge Tabloları*, <http://www.eigm.gov.tr/tr-TR/Denge-Tabloları/Denge-Tabloları>, (Ağustos, **2018**).
- [42] Avrupa Komisyonu, *Çevre Kirliliğinin Entegre bir Biçimde Önlenmesi ve Kontrolü (IPPC) Çimento ve Kireç İmalat Sanayiinde Mevcut En İyi Teknikler ile ilgili Referans Dokümanı*, **2011**.

- [43] Regional Activity Centre for Sustainable Consumption and Production, *Med Clean No. 132 Alternative Fuels and Raw Materials*, <http://www.cprac.org/en/media/medclean?page=2>, (Ağustos, **2018**).
- [44] Regional Activity Centre for Sustainable Consumption and Production, *Med Clean No.141 Use of Sewage Sludge as an Alternative Fuel for Clinker Production*, <http://www.cprac.org/en/media/medclean?page=1>, (Ağustos, **2018**).
- [45] Bulut, H., Nuh Çimento Sanayi A.Ş. Sürdürülebilir Üretim Uygulamaları, *Kalkınmada Anahtar Verimlilik*, 293, 30-31, Mayıs **2013**.
- [46] IPCC, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>. (Nisan, **2018**).
- [47] Gómez, D.R., Watterson, J.D., Americano, B.B., Ha, C., Marland, G., Matsika, E., Namayanga, L.N., Elasha, B.O., Saka, J.D.K., Treanton, K., Chapter 2: Stationary Combustion, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2 Energy*, 2.11 - 2.41, **2007**.
- [48] Garg, A., Kazunari, K., Pulles, T., Chapter 1: Introduction, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2 Energy*, 1.18 - 1.19, **2006**.
- [49] WBCSD Cement Sustainability Initiative (CSI), *List of Constants and Default CO₂ emission factors*, http://www.cement-co2-protocol.org/v3/Content/Internet_Manual/constants.htm, (Ağustos **2018**).
- [50] Sugözü, İ., Mutlu, İ., Atık Taşıt Lastikleri ve Değerlendirme Yöntemleri, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1, 35-46, **2009**.
- [51] Turkish Statistical Institute, *Common Reporting Format (CRF)*, Turkey, Ankara, **2018**.
- [52] Hanle, L., Maldonado, P., Onuma, E., Tichy, M., Oss, H.G., Chapter 2: Mineral Industry Emissions, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 3: Industrial Processes and Product Use*, 2.8-2.19, **2006**.

- [53] Cement Sustainability Initiative (CSI), *CO₂ and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry*, **2011**.
- [54] Pipatti, R., Svardal, P., Alves, J.W.S., Gao, Q., Cabrera, C.L., Mareckova, K., Oonk, H., Scheehle, E., Sharma, C., Smith, A., Yamada, M., Chapter 3: Solid Waste Disposal, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5: Waste*, 3.8-3.23, **2007**.
- [55] Pipatti, R., Sharma, C., Yamada, M., Alves, J.W.S., Gao, Q., Guendehou, G.H.S., Koch, M., Cabrera, C.L., Mareckova, K., Oonk, H., Scheehle, E., Smith, A., Svardal, P., Vieira, S.M.M, Chapter:2 Waste Generation, Composition and Management Data, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5: Waste*, 2.8-2.16, **2006**.
- [56] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, *Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ*, **2014**.
- [57] Frey, C., Penman, J., Hanle, L., Monni, S., Ogle, S., Chapter 3: Uncertainties, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 1: General Guidance and Reporting*, 3.3- 3.63, **2006**.
- [58] Parsons, D., Chatterton, J., Clements-Croome, D., Elmualim, A., Darby, H., Yearly, T., Wilson, I., Ishiyama, E. *Carbon Brainprint: Guidance for the calculation of carbon brainprints of higher education institution activities*, Cranfield University, Cranfield, Bedford, **2011**.
- [59] CEMBUREAU, *Sustainable Cement Production*., Belgium, **2009**.
- [60] T. Schwarz, «Refuse Derived Fuels in The Cement Industry-Potentials in Indonesia to Curb Greenhouse Gas Emission,» 2016.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Ayşe Ebru ORHAN

Doğum Yeri : Keçiören / ANKARA

Medeni Hali : Bekar

E-posta : ebrorhan@gmail.com

Adresi : Birlik Mah. 396. Sok. Sarp Apt. 13/5 Çankaya/ANKARA

Eğitim

Lisans : Uludağ Üniversitesi / Çevre Mühendisliği

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : 60 (YDS)

İş Deneyimi

- **03/2016 – halen : Mey Alkollü İçkiler San. Ve Tic. A.Ş.**
Şarköy Şarap Fabrikası - İSG ve Çevre Mühendisi
- **08/2011 – 09/2011: AK-KİM KİMYA SANAYİ VE TİCARET A.Ş.**
Yönetim Sistemleri Bölümü (stajyer)
- **07/2011 – 08/2011: Bosch Rexroth Otomasyon Sanayi Ve Ticaret A.Ş.**
HSE (Health, Safety & Environment) Bölümü (stajyer)
- **01/2011 – 02/2011: İLLER BANKASI A.Ş.**
Proje Geliştirme Bölümü (stajyer)

Deneyimi Alanları

-

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçeler

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/~~DOKTORA~~ TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

..... Cevre Mühendisliği ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 12/09/2018

Tez Başlığı / Konusu: Cimento Üretiminden Kaynaklanan Isıl Gazı Emisyonlarının
Hesaplanması

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 137 sayfalık kısmına ilişkin, 11/09/2018 tarihinde ~~çalışmam~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 6 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar ~~hariç~~/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

12/09/2018
Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Ayşe Ebru ORHAN
Öğrenci No: 114121296
Anabilim Dalı: Cevre Mühendisliği
Programı: Cevre Mühendisliği
Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Güler Güllü

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

Güler Güllü