

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK  
İÇİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ**

**SİMGE ÇANKAYA**

**KOCAELİ 2018**

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

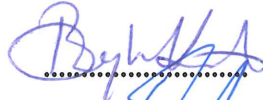



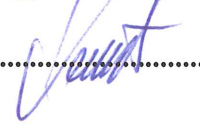
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ÇEVRESEL  
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK İÇİN YAŞAM DÖNGÜSÜ  
DEĞERLENDİRMESİ

SİMGE ÇANKAYA

Doç. Dr. Beyhan PEKEY  
Danışman, Kocaeli Üniversitesi  
Prof. Dr. Aykan KARADEMİR  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi  
Doç. Dr. Burcu ONAT  
Jüri Üyesi, İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa  
Doç. Dr. Selami DEMİR  
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi  
Dr. Öğretim Üyesi Demet ARSLANBAŞ  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 09.07.2018

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Son yıllarda, sanayileşme ve kentleşmedeki artışa paralel olarak, Dünya’da ve Türkiye’de çimento üretimi artış eğilimindedir. G-20 ülkeleri arasında, Türkiye çimento üretiminde 5. Sırada yer almaktadır. Bu nedenle, enerji ve hammaddenin yoğun olarak tüketildiği ve yüksek miktarda emisyon salımlarının meydana geldiği çimento üretiminin çevresel etkilerinin yaşam döngüsü yaklaşımı ile kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, üretime bağlı oluşan en önemli çevresel etkilerin tanımlanması ve mevcut en iyi teknolojilerin uygulanması, çevresel sürdürülebilirlik için hayati önem taşımaktadır.

Bu tez konusunun fikir sahibi olan, tezimin her aşamasında, bilgi ve birikimiyle bana yol gösteren, güleryüzlülüğünü, sabrını ve akademik yönünü örnek aldığım çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Beyhan PEKEY’e,

Tez çalışmalarım sürecinde değerli bilgi ve birikimleri ile bana destek olan Sayın Prof. Dr. Aykan KARADEMİR’e ve Sayın Doç. Dr. Burcu ONAT’a,

Saha çalışmaları ve veri temini kısmında desteklerini esirgemeyen Nuh Çimento Sürdürülebilirlik ve Çevre Yöneticisi Sayın Yasin YİĞİT’e, Çevre ve Atık Yönetimi Mühendisi Sayın Ümit Emre ÜN’e,

Gerek tez çalışmalarım gerekse iş hayatımda karşılaştığım tüm zorluklarda, ilgisi ve desteğiyle bana moral veren eski iş arkadaşım Sayın Utkan ÖZDEMİR’e ve sevgili eşi Gonca ÖZDEMİR’e,

Desteğini ve sabrını hiç eksik etmeyen ikinci babam, kayınpederim Sadettin ÇANKAYA’ya; desteğiyle bana her zaman güç veren eşim Selçuk ÇANKAYA’ya, varlığıyla ve güleryüzüyle mutluluk kaynağım olan kızım Eylül ÇANKAYA’ya,

Hayatta bu aşamaya gelmemde en büyük katkıya sahip olan, bana her zaman inanan, güvenen, destekleyen annem Aysel TANER ve babam Erdan TANER’e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Haziran – 2018

Simge ÇANKAYA

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
GİRİŞ .....	1
1. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRME VE ÇİMENTO ÜRETİMİ.....	4
1.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirme (YDD) Tanımı ve İlkeleri .....	4
1.1.1. Amaç ve kapsam tanımı .....	6
1.1.2. Envanter analizi.....	7
1.1.3. Etki değerlendirme .....	8
1.1.4. Yorumlama.....	13
1.2. Çimento Sektörü ve Çimento Üretim Prosesi .....	13
1.2.1. Dünyada ve Türkiye’de çimento sektörü .....	14
1.2.2. Çimento üretim süreci .....	19
1.2.3. Çimento üretiminde oluşan emisyonlar.....	26
1.2.4. Çimento sektöründe enerji kullanımı .....	30
1.2.5. Çimento üretiminde alternatif hammadde ve yakıt kullanımı.....	32
1.3. Konu ile İlgili Çalışmalar .....	38
2. MALZEME VE YÖNTEM.....	47
2.1. Kuruluşa ait Çimento Üretim Prosesi.....	47
2.1.1. Hammadde hazırlama.....	47
2.1.2. Farin öğütme .....	48
2.1.3. Klinker üretimi .....	49
2.1.4. Çimento üretimi.....	49
2.1.5. Paketleme .....	50
2.1.6. Sürdürülebilirlik faaliyetleri .....	50
2.2. Çimento Üretiminde Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Uygulaması .....	53
2.2.1. Amaç, kapsam ve fonksiyonel birim.....	53
2.2.2. Yaşam döngüsü envanter analizi.....	53
2.2.3. Yaşam döngüsü etki değerlendirme .....	58
2.2.4. Yorum.....	60
2.3. Veri Kalitesi .....	61
2.3.1. Hassasiyet analizleri .....	61
2.3.2. Belirsizlik analizleri .....	61
2.4. Alternatif Senaryoların Oluşturulması .....	62
3. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	64
3.1. Klinker Üretiminde Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme Sonuçları.....	64
3.1.1. 2007 yılı.....	64
3.1.2. 2013 yılı.....	67
3.1.3. 2013 yılı (WHR olmadan).....	70
3.1.4. Karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırılması ve katkı analizleri.....	72

3.1.5. Zarar değerlendirmesi (son nokta etkilerinin) sonuçlarının karşılaştırılması .....	78
3.1.6. Alternatif senaryoların karşılaştırılması .....	79
3.2. Çimento Üretiminin Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme Sonuçları .....	89
3.2.1. 2007 yılı.....	89
3.2.2. 2013 yılı.....	93
3.2.3. 2007 ve 2013 yıllarındaki imento üretiminin çevresel etkilerinin karşılaştırılması .....	98
3.3. Belirsizlik Analizleri .....	101
3.3.1. AHY ve GHY belirsizlik analizleri .....	101
3.3.2. Senaryolar için belirsizlik analizi sonuçları .....	104
3.4. Sonuçların Literatürdeki Benzer alışmalarla Karşılaştırılması.....	106
3.4.1. İklim değişikliği açısından karşılaştırma.....	106
3.4.2. Diğer etkiler açısından karşılaştırma.....	112
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	114
KAYNAKLAR .....	119
EKLER.....	130
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	136
ÖZGEÇMİŞ .....	137

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Yaşam döngüsü değerlendirmesinin aşamaları.....	5
Şekil 1.2.	Örnek bir sistem sınırının gösterilmesi.....	6
Şekil 1.3.	Emisyonlar ve etki kategorileri arasındaki ilişki.....	11
Şekil 1.4.	Türkiye’de klinker ve çimento üretiminin yıllara göre değişimi.....	15
Şekil 1.5.	Çimento üretimi projeksiyonları.....	16
Şekil 1.6.	2015 yılında, dünya çapında en fazla CO <sub>2</sub> emisyonu salımı yapan ülkeler.....	17
Şekil 1.7.	Türkiye’deki CO <sub>2</sub> emisyonlarının kaynak profilleri.....	18
Şekil 1.8.	Türkiye’de CO <sub>2</sub> emisyonlarının yıllara göre değişimleri.....	18
Şekil 1.9.	Çimento üretim prosesi.....	22
Şekil 1.10.	Ön ısıtıcılı ve ön kalsinasyonlu çimento fırını.....	23
Şekil 1.11.	Çimento türleri.....	25
Şekil 1.12.	Çimento üretimi aşamalarının elektrik enerji ve termal enerji tüketimlerdeki payları.....	31
Şekil 1.13.	Atıkların çimento fırınında beraber yakılmasının avantajları.....	35
Şekil 1.14.	Farklı ülkelerde çimento üretiminde alternatif yakıt kullanımları.....	38
Şekil 2.1.	Hammaddenin kırıcıya getirilmesi ve homojene stok holleri.....	48
Şekil 2.2.	Farin değirmeni ve farin silosu.....	48
Şekil 2.3.	Fabrikada klinker üretimi, klinker soğutma ve çimento üretimi.....	49
Şekil 2.4.	Aritma çamuru kurutma tesisi.....	51
Şekil 2.5.	Atık ısı geri kazanım (WHR) tesisi.....	52
Şekil 2.6.	Çalışmanın sistem sınırları.....	54
Şekil 2.7.	IMPACT 2002+ metodundaki orta nokta ve zarar kategorilerinin birbiri ile ilişkisi şeması.....	59
Şekil 3.1.	GHY durumu için karakterizasyon sonuçları.....	64
Şekil 3.2.	GHY durumu için zarar değerlendirmesi sonuçları.....	66
Şekil 3.3.	GHY durumu için eko puan grafiği.....	66
Şekil 3.4.	AHY durumu için karakterizasyon sonuçları.....	67
Şekil 3.5.	AHY durumu için zarar değerlendirmesi sonuçları.....	69
Şekil 3.6.	AHY durum için oluşturulan eko puan grafiği.....	70
Şekil 3.7.	WHR tesisinin olmadığı durum ile WHR tesisinin olduğu durumun karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	71
Şekil 3.8.	Kanserojen olmayanlar için proses katkıları.....	73
Şekil 3.9.	Kanserojenler için proses katkıları.....	73
Şekil 3.10.	GHY (a) ve AHY (b) durumunda arazi kullanımını etkileyen prosesler.....	74
Şekil 3.11.	2007 ve 2013 yıllarında, maden çıkarma kategorisine katkısı olan parametreler.....	76
Şekil 3.12.	AHY-GHY normalizasyon-midpointe göre.....	76
Şekil 3.13.	Küresel ısınma (a), solunabilir inorganikler (b) ve yenilenemeyen enerji (c) kategorilerini etkileyen parametreler.....	77

Şekil 3.14. 2007 ve 2013 yılı için son nokta değerlerine ait sonuçlar.....	78
Şekil 3.15. Mevcut durum (2013) ve %15 alternatif yakıt ikamesi ile oluşturulan senaryoların etkilerinin karşılaştırılması .....	80
Şekil 3.16. Mevcut durum (AHY) ve Senaryo 1-4 için zarar değerlendirmesi sonuçları .....	83
Şekil 3.17. Mevcut durum (AHY) ve Senaryo 1-4 için eko puan grafiği .....	85
Şekil 3.18. Alternatif senaryoların (Senaryo 1-8) karakterizasyon sonuçları .....	86
Şekil 3.19. Alternatif senaryolarda elektrik tüketimlerine göre oluşan çevresel etkiler.....	87
Şekil 3.20. %15 ve %30 ikame durumları için senaryoların eko puanlarının karşılaştırılması .....	87
Şekil 3.21. Tüm senaryoların çevresel etkilerinin eko puan cinsinden gösterilmesi .....	89
Şekil 3.22. 2007 yılı için farklı çimento türlerinin karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırılması .....	91
Şekil 3.23. 2007 yılındaki durum için orta nokta etkileri temelinde eko puan grafiği .....	92
Şekil 3.24. 2007 yılındaki durum için son nokta etkileri temelinde eko puan grafiği .....	92
Şekil 3.25. 2013 yılı için farklı çimento türlerinin karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırılması .....	94
Şekil 3.26. CEM IV tipi çimentoda iyonize radyasyonu etkileyenler.....	95
Şekil 3.27. CEM IV tipi çimentoda arazi kullanımını etkileyenler.....	95
Şekil 3.28. 2013 yılındaki durum için orta nokta etkileri temelinde eko puan grafiği .....	96
Şekil 3.29. 2013 yılındaki durum için son nokta etkileri temelinde eko puan grafiği .....	97
Şekil 3.30. Farklı çimento tiplerinin son nokta etkilerinin yıllar bazında karşılaştırılması .....	101
Şekil 3.31. AHY ve GHY için belirsizlik analizi karakterizasyon sonuçları.....	102
Şekil 3.32. AHY ve GHY için belirsizlik analizi zarar değerlendirmesi sonuçları .....	103
Şekil 3.33. AHY ve GHY senaryolarının tüm çevresel etkilerinin belirsizlik analizi sonuçları.....	104
Şekil 3.34. Senaryo 6 ve Senaryo 7 için belirsizlik analizi karakterizasyon sonuçları .....	105
Şekil 3.35. Senaryo 6 ve Senaryo 7 için belirsizlik analizi zarar değerlendirmesi sonuçları .....	105
Şekil 3.36. Senaryo 6 ve Senaryo 7'nin tüm çevresel etkilerinin belirsizlik analizi sonuçları.....	106

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1.	YDD çalışmalarında sıkça kullanılan etki kategorileri.....	9
Tablo 1.2.	Küresel ısınma üzerinde etkili olan gazların atmosferde kalma süreleri ve eşdeğerlik faktörleri.....	11
Tablo 1.3.	Dünyada çimento üreten ülkeler (G20 ülkeleri) (milyon ton) .....	14
Tablo 1.4.	Dünya çapındaki büyük sabit (stationary) CO <sub>2</sub> kaynaklarının proses veya endüstriyel aktivitelere göre profili .....	17
Tablo 1.5.	Çimento üretiminde kullanılan hammadde kaynakları.....	19
Tablo 1.6.	Klinker üretiminde gerçekleşen bazı reaksiyonlar.....	24
Tablo 1.7.	Türkiye’de çimento fırınlarından oluşan emisyon değerleri.....	30
Tablo 1.8.	Klinker üretim prosesinde spesifik termal enerji tüketimi.....	31
Tablo 1.9.	Kuru ve yaş proseslerde spesifik elektrik enerjisi tüketimleri.....	32
Tablo 1.10.	Çimento üretiminde kullanılan alternatif hammaddeler ve kaynakları ..	33
Tablo 1.11.	Çimento üretiminde sıkça kullanılan yakıtların enerji içeriği ve CO <sub>2</sub> emisyon faktörleri.....	33
Tablo 1.12.	Farklı alternatif yakıtların karşılaştırması.....	37
Tablo 2.1.	Çamur kurutma tesisi için atık kabul kriterleri .....	52
Tablo 2.2.	Bir ton klinker üretimi için girdi ve çıktılar.....	55
Tablo 2.3.	Bir ton kuru çamur için gerekli girdi ve çıktılar .....	56
Tablo 2.4.	Bir ton klinker için kullanılan alternatif hammaddelerin ikame değerleri.....	57
Tablo 2.5.	Üretilen çimento türleri için kullanılan klinker ve katkı maddesi oranları .....	58
Tablo 2.6.	IMPACT 2002+ metodunda kullanılan karakterizasyon faktörlerinin kaynakları, referans maddeler ve zarar birimleri .....	59
Tablo 2.7.	IMPACT 2002+ etki değerlendirme metodu için kullanılan normalizasyon faktörleri .....	60
Tablo 2.8.	Tez çalışması kapsamında oluşturulan alternatif senaryolar .....	63
Tablo 3.1.	WHR tesisinin olmadığı durum ile WHR tesisinin olduğu durumun zarar değerlendirmesi sonuçlarının karşılaştırılması.....	71
Tablo 3.2.	Orta nokta etki kategorisi karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	72
Tablo 3.3.	Dört farklı çimento tipi için belirlenen çevresel etkiler .....	99
Tablo 3.4.	Literatürde yapılan çalışmalar sonucunda hesaplanan küresel ısınma potansiyelleri (kg.CO <sub>2</sub> -eşd/t.ürün) .....	107
Tablo 3.5.	Diğer etkiler açısından karşılaştırma .....	113



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

EI	: Toplam çevresel etki göstergesi
k	: Etki kategorisi
N	: Normalize edilmiş gösterge
s	: Kimyasal
S	: Karakterizasyon aşamasında hesaplanan kategori göstergesi
R	: Referans değer
$V_k$	: Etki kategorisi için ağırlıklandırma faktörü

### Kısaltmalar

AHY	: Alternatif Hammadde ve Yakıt
ATY	: Atıktan Türetilmiş Yakıt
CML	: Center for Environmental Studies (Çevresel Çalışmalar Merkezi)
DALY	: Disability-adjusted Life Years (İşlev Kaybına Uyarlanmış Yaşam Yılı)
DS	: Dry Sludge (kurutulmuş arıtma çamuru)
EDIP	: Environmental Design of Industrial Products (Endüstriyel Ürünlerin Çevresel Dizayını)
ELU	: Environmental Load Unit (Çevresel Yük Birimi)
EPS	: Environmental Priority Strategies (Çevresel Öncelik Stratejileri)
GHY	: Geleneksel Hammadde ve Yakıt
IEA	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli)
KM	: Katı Madde
MJ	: Megajul
MSW	: Municipal Solid Waste (Kentsel katı atık)
NEX Olması)	: Normalised Extinction of Species (Türlerin Normalleştirilmiş Yok Olması)
ÖTL	: Ömrünü Tamamlamış Lastik
PAF	: Potentially Affected Fraction (Potansiyel Olarak Etkilenen Kısım)
PDF	: Potentially Disappeared Fraction (Potansiyel Olarak Kaybolan Kısım)
PKÇ	: Petrol Kuyusu Çimentosu
TÇMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
YDD	: Yaşam Döngüsü Değerlendirme
WHR	: Waste Heat Recovery (Atık Isı Geri Kazanımı)
USLCI	: United States Life Cycle Inventory Database (Amerika Birleşik Devletleri Yaşam Döngüsü Envanteri Veri Tabanı)

## ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK İÇİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

### ÖZET

Günümüzde hızla gelişen sanayileşme ve kentleşmeye bağlı olarak artış gösteren, yoğun enerji ve hammadde kullanımını gerektiren bir sektör olan çimento üretiminin, iklim değişikliği, ekosistem kalitesi, insan sağlığı ve doğal kaynak kaynaklar üzerindeki olumsuz etkilerinin en düşük seviyeye düşürülmesi ve iyileştirici önlemlerin alınabilmesi için, olası çevresel etkilerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment - LCA), bu çevresel etkileri hammaddenin elde edilmesinden, ürün/hizmet oluşumu, kullanımı ve nihai bertarafına kadar oldukça geniş bir kapsamda belirlemeye, belirlenen etkilerin boyutlarına göre azaltım hedeflerini tespit etmeye ve olumsuz çevre etkilerini en aza indirmeye olanak tanıyan bir metottur. Bu çalışmada, geleneksel hammadde ve yakıtlarla üretimin gerçekleştirildiği 2007 yılı ve alternatif hammadde ve yakıtlarla üretimin gerçekleştirildiği 2013 yılı için çimento üretiminin yaşam döngüsü, ISO 14040 ve ISO 14044 standartları kapsamında, karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. SimaPro 8.0.4 yazılımı ile gerçekleştirilen YDD çalışmasının kapsamı “beşikten kapıya” olarak belirlenmiş; fonksiyonel birim ise 1 ton klinker ve 1 ton çimento olarak seçilmiştir. Etki değerlendirme metodu olarak IMPACT 2002+ kullanılmıştır. Çalışma sonucunda 2013 yılındaki 1 ton klinker üretimi sonucu oluşan tüm çevresel etkilerin, 2007 yılındaki duruma göre yaklaşık %12 azaldığı tespit edilmiştir. Sonuçlar zarar değerlendirme açısından ele alındığında; iklim değişikliği, insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynak kullanımı kategorilerindeki azalmalar sırasıyla; %1,4, %27, %10 ve %11 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, farklı alternatif yakıt ikame oranları içeren 8 senaryo oluşturulmuş ve oluşturulan senaryolar arasında, en çevre dostu senaryolar, %30 ikame oranında atık yağ kullanılan Senaryo 7 ve %30 ikame oranında atıktan türetilmiş yakıt (ATY) kullanılan Senaryo 6 olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alternatif Hammadde ve Yakıt, Çevresel Etki, Çimento, Klinker, Yaşam Döngüsü Değerlendirme.

# **LIFE CYCLE ASSESSMENT OF CEMENT PRODUCTION FOR ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY**

## **ABSTRACT**

Recently, a considerable increase has been occurred in cement manufacturing, which is a highly intensive energy and resource consuming and carbon emission industry, in parallel with industrialization and urbanization. In order to minimize the adverse effects on the climate change, ecosystem quality, human health and resource of cement production, it is rather important to assess the potential environmental impacts of cement production process. Life cycle assessment (LCA) is a method that a “cradle to grave” systematic approach beginning with the gathering of raw materials from the earth to create the product and ends at the point when all materials are returned to earth. In this study, comparative LCA of cement production with conventional raw material and fuel (2007) and alternative raw material and fuel (2013) usage were performed in accordance with ISO 14040 and ISO 14044 standards. The scope of the study was determined as “cradle to gate” and the functional unit was selected as 1 ton clinker and 1 ton cement. SimaPro 8.0.4 software was used for LCA. Life cycle impact assessment was carried out with IMPACT 2002+ method. As a result of the study, overall environmental impacts reduced approximately 12% in 2013 scenario using alternative raw materials and fuels. According to damage assessment; the effects on climate change, human health, ecosystem quality and resources decreased 1,4%, 27%, 10% and 11%; respectively. Additionally, eight different scenarios was constituted and the most environmental-friendly scenarios are determined as Scenario 7 (30% substitution of waste oil) and Scenario 6 (30% substitution of refused derive fuel-RDF).

**Keywords:** Alternative Raw Material and Fuel, Environmental Impact, Cement, Clinker, Life Cycle Assessment.

## GİRİŞ

1960'lı yıllardan itibaren sanayileşmenin artmasına paralel olarak enerji ve hammadde kullanımındaki sınırlamaların da artmasıyla, enerji tüketimine ve gelecekte kaynak kullanımına yönelik çalışmalara başlanmıştır. Bu çalışmalarla birlikte, sürdürülebilir kalkınma ve çevre bağlantısı önem kazanmıştır. Çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında önemli bir rolü olan yaşam döngüsü değerlendirmesi, proses, ürün veya hizmetlerin, doğal kaynaklardan üretilmesinden nihai bertarafına kadar birbirini takip eden tüm süreçler boyunca, çevresel etkilerini belirlemek için uygulanan bir yöntemdir.

Çimento, yapı sektöründe kullanılan temel malzemelerden biridir ve temel olarak, doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcı malzeme olarak tanımlanmaktadır (URL-1). Çimento üretimi, büyük miktarlarda ham madde ve enerji tüketimini, önemli miktarlarda katkı maddesi ve yakıt (kömür, petrol, doğal gaz, fuel oil, biyoyakıt...vb) kullanımını gerektiren, oldukça karmaşık bir prosestir. Çimento üretimi sırasında havaya, toprağa ve suya birçok kirletici salımı gerçekleşmekle birlikte, ana emisyonlar çimento fırınlarından kaynaklanan atmosferik emisyonlardır (Valderrama ve diğ., 2012). Literatürde yer alan bilgilere göre, küresel antropojenik CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %5'i, çimento üretiminden kaynaklanmaktadır (Worrell ve diğ., 2011). Uluslararası Enerji Ajansı'nın raporuna göre, 1 ton çimento üretimine bağlı olarak ortalama 0,83 ton CO<sub>2</sub> oluşmaktadır. Ayrıca, çimento üretimi dünya çapında toplam endüstriyel enerji kullanımının yaklaşık %12-15'inden sorumlu olduğu belirtilmektedir (Aranda-Usón ve diğ., 2012). Karbondioksit emisyonlarına ek olarak, kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>), azot oksitler NO<sub>x</sub>), partikül madde (PM), uçucu organik bileşikler (UOB), karbon monoksit (CO), amonyak (NH<sub>3</sub>), dioksin/furanlar (PCDD/PCDF) ve çeşitli ağır metaller de, çimento üretimine bağlı olarak oluşabilecek kirleticilerdir (Chen ve diğ., 2010). Günümüzde hızla gelişen sanayileşme ve kentleşmeye bağlı olarak artış gösteren çimento üretimi, kontrol edilmediği takdirde önemli çevre sorunlarına yol açabilecek bir prosestir. Bu nedenle

çimento üretiminin her bir aşamasında (ham madde ve doğal kaynak kullanımı, klinker üretimi, taşıma ve nakliye, bakım-onarım, geri kazanım, yeniden kullanım,...vb), su, hava ve toprak üzerinde oluşabilecek çevresel etkilerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi, çimento sektöründe alternatif teknolojilerin geliştirilerek daha temiz üretimin benimsenmesi ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından önemli bir adımdır. Çimento üretiminin sürdürülebilirliğini içeren enerji verimliliği, kirleticilerin azaltılması (özellikle CO<sub>2</sub> emisyonlarının), atık ısı geri kazanımı, alternatif hammadde ve/veya yakıt kullanımı gibi süreçlerin etkileri yaşam döngüsü değerlendirmesi yaklaşımı ile detaylı bir şekilde belirlenebilmektedir. Son yıllarda birçok araştırmacı çimento veya klinker üretiminden kaynaklanan çevresel etkileri belirlemek için yaşam döngüsü değerlendirme yöntemini kullanmışlardır (Boesch ve diğ., 2009; Huntzinger ve Eatmon, 2009; Strazza ve diğ., 2011; Li ve diğ., 2015). Bunlara ek olarak birçok araştırmacı ise yeşil çimento üretimi ile ilgili bilimsel çalışmalar gerçekleştirmiştir (Benhelal ve diğ., 2012; Imbabi ve diğ., 2012; Amrina ve Vilsı, 2015).

Bu çalışmada, ülkemizde ana faaliyeti çimento üretimi olan ve bu üretimi gerçekleştirirken gerekli termal enerjinin bir kısmını alternatif yakıtlarla sağlayan bir işletmede, ISO 14040 (Çevre Yönetimi – Hayat Boyu Değerlendirme – İlkeler ve Çerçeve) ve ISO 14044 (Çevre Yönetimi – Hayat Boyu Değerlendirme – Gereklere ve Kılavuz) standartları kapsamında, SimaPro yazılımı kullanılarak çimento üretiminin yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, öncelikle yaşam döngüsü değerlendirmesinin ilk basamağını oluşturan amaç ve kapsamlar tanımlanmış, fonksiyonel birimler ve sistem sınırları belirlenmiştir. Gerçekleştirilen tez çalışmasının amacı, hammaddenin ve geleneksel yakıtların yerine kısmi olarak alternatif yakıt (atık) kullanımına olanak sağlayan çimento üretim sürecinin çevresel etkilerinin değerlendirilerek yönetilmesidir. Bu değerlendirmeyi yapabilmek için global bakış açısıyla sistematik bir analiz yapmak gereklidir. Çalışmanın kapsamı, hammaddenin doğadan temini aşamasından başlayarak; doğadan temin edilen hammaddenin fabrikaya nakliyesini, üretim süreçlerini, elektrik tüketimlerini kapsayan “beşikten kapıya” yaklaşımı olarak belirlenmiş; fonksiyonel birim olarak ise 1 ton klinker ve 1 ton çimento seçilmiştir. Ardından, bir önceki aşamada belirlenmiş olan amaçlar ve sistem sınırları dikkate alınarak, çimento üretiminin

envanter analizi gerçekleştirilmiştir. ISO 14040 standardının üçüncü safhasını oluşturan etki değerlendirmesi aşamasında, envanter analizi aşamasında belirlenen parametrelerin olası çevresel etkileri SimaPro yazılımında IMPACT 2002+ metodu ile hesaplanmış ve 15 etki kategorisi (kanserojenler, kanserojen olmayanlar, solunabilir inorganikler, iyonize radyasyon, ozon tükenmesi, solunabilir organikler, sucul ve karasal ekotoksisite, karasal asidifikasyon/nütrifikasyon, arazi kullanımı, sucul ve karasal ötrofikasyon, küresel ısınma, yenilenemeyen enerji ve maden çıkarma) temelinde değerlendirilmiştir. Standardın son safhasını oluşturan yorum aşamasında ise, envanter analizi ve etki değerlendirmesi aşamalarındaki bulgular birlikte değerlendirilerek, standardın ilk aşaması olan ve temelini oluşturan amaç ve kapsam tanımları ile ilişkili sonuçlar ortaya konmuştur. Temel uygulama amacı ürünleri çeşitli nedenlerden dolayı karşılaştırma (satın alma veya endüstriyel olarak...vb) olan yaşam döngüsü değerlendirmesi, bu çalışmada, öncelikle atık yakma işleminin uygulandığı (2013 yılı) ve uygulanmadığı (2007 yılı) 2 farklı durum için, çimento üretiminin çevresel etkilerinin ortaya konması amacıyla gerçekleştirilmiş; ardından farklı atık ikame oranları ile çeşitli senaryolar oluşturularak, çevresel etkilerin minimuma indirildiği durum tespit edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, iki durum arasındaki karşılaştırmaların ve karar analizinin daha sağlıklı yapılabilmesi adına, 2007 - 2013 yıllarındaki durum ve gerçeğe uyarlanması düşünülen senaryolar için belirsizlik analizleri gerçekleştirilmiştir.

## 1. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRME VE ÇİMENTO ÜRETİMİ

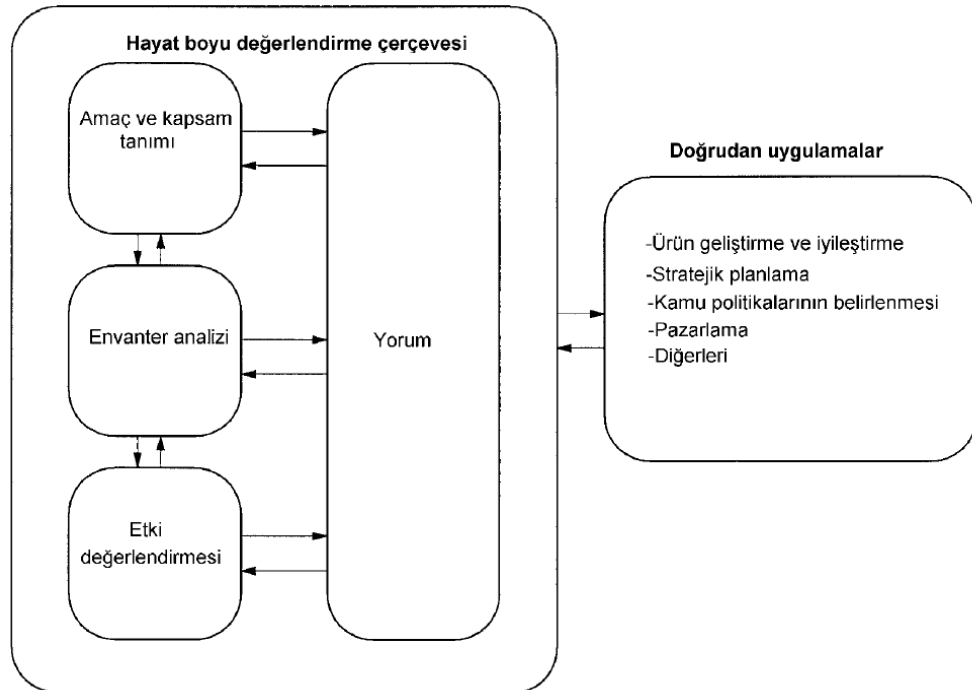
### 1.1.Yaşam Döngüsü Değerlendirme (YDD) Tanımı ve İlkeleri

Günümüzde iklim değişikliği, ozon tahribatı, ekolojik toksisite vb. konularda, çevresel farkındalığın artmasıyla, halk, doğal kaynakların tahribatı ve çevresel bozulma konularıyla ilgilenmeye; ürün/hizmet ortaya koyan işletmeler de faaliyetlerinin çevreyi nasıl etkilediğini değerlendirmeye başlamışlardır. Bu kapsamda, temiz üretimin sağlanması için gerekli olan temiz prosesler ilgi çekmektedir. Birçok işletme, çevresel etkilerini en aza indirmek için araştırmalar yapmaktadır (Curran, 2006). Bu araştırmalarla birlikte çeşitli sistemlerin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi ve karşılaştırılması için çeşitli araçlar ve yöntemler geliştirilmiştir. Bunlara örnek olarak, Yaşam Döngüsü Değerlendirme (Life cycle assessment - LCA), Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi (Sustainability Assessment), Stratejik Risk Analizi (Strategic Environmental Assessment - SEA), Çevresel Etki Değerlendirme (Environmental Impact Assessment - EIA), Çevresel Risk Değerlendirme (Environmental Risk Assessment - ERA), Entegre Etki Değerlendirme (Integrated Impact Assessment), Maliyet – Fayda analizi (CostBenefit Analysis - CBA), Malzeme Akış Analizi (Material Flow Analysis - MFA), Ekolojik Ayak İzi (Ecological Footprint), Karbon Ayak İzi (Carbon Footprint) gibi yöntemler verilebilir (Finnveden ve diğ., 2009).

Bu yöntemler arasında, bir ürün veya hizmetin üretilmesinde sürdürülebilirliğin sağlanması için, bütünsel analitik bir yaklaşım olan Yaşam Döngüsü Değerlendirme (YDD) önemle tavsiye edilmektedir (Valderrama ve diğ., 2013; Güereca ve diğ., 2015). YDD, bir ürünün üretimi için kullanılan hammaddelerin temininden, kullanımı, kullanım ömrü sonunda işlenmesi, geri dönüşümü ve nihai bertafına kadar hayatı boyunca (beşikten mezara), çevresel boyutlarını ve olası çevresel etkilerini (kaynakların kullanımı ve salınımların çevresel sonuçları gibi) inceleyen bir araçtır (ISO, 2006a).

YDD, çevresel etkileri belirleyerek alternatif proseslerin çevresel performanslarını karşılaştırmak (Valderrama ve diğ., 2013), toplam enerji tüketimini yorumlamak, enerji kazanımlarını ve emisyon azaltım tekniklerini belirlemek ve karar vericileri politikalar ve enerji verimliliği yatırımları hakkında bilgilendirmek amacıyla kapsamlı olarak kullanılan bir metottur (Hossain ve diğ., 2017). Bu kavram, sadece ürünün üretimi aşamasında gerekli prosesleri değil; hammaddenin temini, işlenmesi, nakliyesi, inşası (upstream), üretilen ürünün kullanılması ve kullanım ömrünü tamamladıktan sonraki nihai bertarafını (downstream) içeren prosesleri de dikkate alması açısından klasik yaklaşımdan farklıdır (Loijos, 2011; Yiğit, 2013). YDD aracı ile ürün/hizmetlerin üretimi, kullanılması ve kullanım ömrünü tamamladıktan sonraki bertaraf yöntemlerinin tüm aşamalarındaki çevresel yüklerin analizi gerçekleştirilmektedir. Çevresel yükler, doğal kaynakların tahribatı, enerji tüketimi, ve kara, su ve hava üzerindeki emisyonları kapsayan çevre üzerindeki tüm etki çeşitlerini içermektedir (Georgiopolou ve diğ., 2018).

ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına göre, yaşam döngüsü değerlendirme 4 aşamadan oluşmaktadır: Amaç ve kapsam tanımı; envanter analizi; etki değerlendirmesi ve yorum (ISO 2006a; ISO 2006b) (Şekil 1.1).



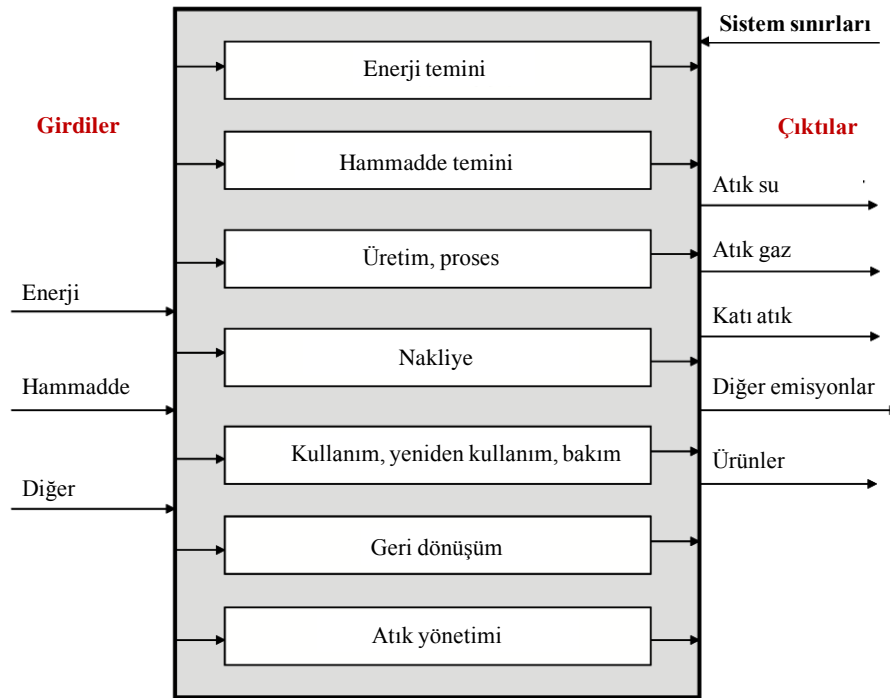
Şekil 1.1. Yaşam döngüsü değerlendirmesinin aşamaları



### 1.1.1. Amaç ve kapsam tanımı

ISO 14040 standardında temel olarak 4 aşamadan oluştuğu belirtilen yaşam döngüsü değerlendirmesinin ilk aşamasında, yaşam döngüsü değerlendirmesinin amacı ve kapsamı açıkça tanımlanmaktadır. Bu aşama, herhangi bir veri toplama veya sonuç hesaplamayı içermez. Amaç tanımı, çalışmanın gerçekleştirilmesinin sebeplerini, çalışma sonuçlarının ulaştırılması istenen hedef kitleyi içermektedir (ISO, 2006a).

Kapsam tanımlamada, sistem sınırları ve fonksiyonel birim gibi temel seçimler gerçekleştirilmektedir. Fonksiyonel birim, ürünün tanımlanan fonksiyonlarının (performans özellikleri) sayısını belirtir (ISO, 2006a). Bir fonksiyonel birimin temel amacı, YDD sonuçlarının karşılaştırılabilirliğinin sağlanması için gerekli olan girdilerle ve çıktılarla ilgili bir referans oluşturmak olduğundan (ISO, 2006a), fiziksel miktardan ziyade ürünün fonksiyonu ile ilgili olmalıdır (Hoogmartens ve diğ., 2014). Sistem sınırı, YDD çalışmasına hangi birim süreçlerin dahil edilmesi gerektiğini belirtir. Şekil 1.2’de örnek bir sistem sınırı gösterilmektedir.



Şekil 1.2.Örnek bir sistem sınırının gösterilmesi

Sistem sınırının seçimi, çalışmanın amacıyla uyumlu olmalıdır ve çalışmaya hangi birim süreçlerin dahil edileceğine, bu süreçlerin hangi seviyeye kadar çalışılacağına dair karar verilmelidir (ISO 14044). Literatürde, yaşam döngüsü değerlendirmesi

çalışmasının kapsamını belirleyen çeşitli yaklaşımlar vardır: beşikten mezara, beşikten kapıya, kapıdan kapıya vb. “Beşikten mezara” yaklaşımı, hammaddenin temini aşamasından başlayıp, ürünün üretimi, kullanımı ve kullanım sonrası nihai bertarafına kadar olan tüm süreci kapsayan tam bir yaşam döngüsü değerlendirme çalışması iken; “beşikten kapıya” yaklaşımı ise hammadde temini sürecinden başlayarak, ürünün üretimi ve fabrikadan çıkışına (kullanıcıya ulaştırılmadan önceki aşaması) kadar olan süreci kapsayan kısmi bir yaşam döngüsü değerlendirme çalışmasıdır (Van Den Heede ve De Belie, 2012). Bazı durumlarda, tam bir yaşam döngüsü değerlendirmesi (beşikten mezara) mümkün olmayabilir ve çalışmalar “beşikten kapıya” yaklaşımıyla gerçekleştirilebilir (Josa ve diğ., 2007; Chen ve diğ., 2010).

### **1.1.2. Envanter analizi**

Kapsamı çeşitli yaklaşımlara göre belirlenen (beşikten mezara, beşikten kapıya..vb) yaşam döngüsü değerlendirmesinde, en önemli aşamalardan biri, çeşitli veri tabanlarından yararlanılarak oluşturulacak olan güvenilir bir envanter çalışmasıdır. Envanter analizi, veri kalitesi ve ulaşılabilirliği nedeniyle yaşam döngüsü değerlendirmesi yaklaşımının en kritik süreci olarak tanımlanabilir (Çankaya ve Pekey, 2015). Envanter analizi aşamasında, ürünün tüm yaşam döngüsü süreçleri boyunca girdi ve çıktıları tanımlanmakta; enerji ve hammadde akışları, havaya, suya ve toprağa olan emisyonlar ve diğer atıklar belirlenmektedir (Tuna Taygun, 2005). Envanter analizi dört alt kategoriye ayrılmaktadır: Proses akış şemalarının oluşturulması, veri toplanması, seçilen fonksiyonel birime ilişkin verilerin derlenmesi, enerji ve malzeme dengesinin geliştirilmesi (Zbicinski ve diğ., 2006).

Tek bir çıktı veren veya düzenli bir ham madde girdi ve çıktısına bağlı olarak üretim yapan çok az sayıda sanayi süreci vardır. Sanayi süreçlerinin çoğu birden fazla ürün imal eder ve bunlar ara ürünleri ve atılan ürünleri ham madde olarak geri dönüştürerek kullanır. Birden fazla ürün ve geri dönüştürme sistemleri içeren sistemler dikkate alındığında, tahsisat prosedürlerinin (allocation) gerekli olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. ISO 14040 standardına göre tahsisat, bir sürecin veya bir ürün sisteminin girdi veya çıktı akışlarının, çalışılan ürün sistemi ile bir veya birden fazla diğer ürün sistemleri arasında paylaşılması olarak tanımlanmaktadır (ISO,

2006a). Tahsisat prosedürünün çeşitli metotları vardır; ekonomik, enerji içerikli, kütle..gibi (Sharma, 2017).

### **1.1.3. Etki değerlendirme**

Yaşam döngüsü etki değerlendirme aşamasında, envanter analizi sonuçları kullanılarak muhtemel çevresel etkilerin öneminin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. ISO 14040 standardına göre etki değerlendirme, zorunlu (kategori tanımlama, sınıflandırma, karakterizasyon) ve isteğe bağlı (normalizasyon, gruplandırma, ağırlıklandırma) aşamalardan oluşmaktadır. İlk aşamada, etki kategorileri, kategori göstergeleri ve karakterizasyon modelleri seçilmektedir (ISO, 2006a). YDD çalışmalarında genel olarak kullanılan etki kategorileri ve açıklamaları Tablo 1.1’de verilmiştir.

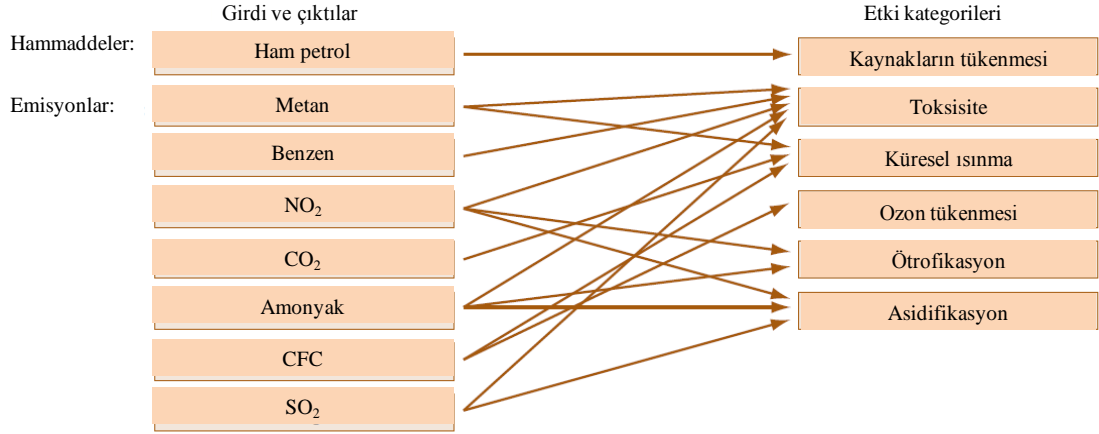
Sınıflandırma aşamasında, envanter analizi aşamasında belirlenen her bir çevre boyutu etki kategorileri ile ilişkilendirilmekte ve tüm emisyonlar çevre üzerindeki etkilerine göre sınıflara ayrılmaktadır (Çankaya ve Pekey, 2015). Emisyonlar ve etki kategorileri arasındaki ilişki Şekil 1.3’de verilmiştir. Yani, sera gazı etkisine ya da ozon tabakası tahribatına katkısı olan kimyasallar 2 sınıfa bölünmekte; azot oksitler (NO<sub>x</sub>) gibi emisyonlar ise aynı anda sucul toksisite, asit yağmurları, ötrofikasyon gibi çeşitli sınıflar ile ilgili olmaktadır.

Tablo 1.1. YDD çalışmalarında sıkça kullanılan etki kategorileri

Etki kategorisi	Envanter verilerine örnekler (sınıflandırma)	Olası karakterizasyon faktörü /Referans bileşik (Hakyemez, 2016)	Etki kategorisinin açıklaması
<b>Küresel ısınma</b>	CO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CFCs, HCFCs, Metil bromür (CH <sub>3</sub> Br)	Küresel ısınma potansiyeli / kg CO <sub>2</sub> into air-eq	Sera gazı etkisi olarak da adlandırılan, küresel ısınma alt atmosferdeki sıcaklığın artışı olarak tanımlanmaktadır. Genellikle küresel ısınma CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> ve N <sub>2</sub> O gazı emisyonları ve bazı türdeki CFC'lerin tüketiminden kaynaklanmaktadır (Al-Jaf, 2014). Sera gazlarının küresel ısınma potansiyelleri CO <sub>2</sub> -eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (Heidi ve diğ., 2005).
<b>Stratosferik ozon tüketimi</b>	CFCs, HCFCs, Halon Metil bromür (CH <sub>3</sub> Br)	Ozon tüketimi Potansiyeli / kg CFC-11 into air-eq	Ozon tüketimi, insan aktivitelerine bağlı olarak ozon tabakasındaki incelme anlamına gelmektedir. Bunun sonucu olarak, yüksek oranda UV-B radyasyonu atmosfere girerek, insan sağlığı ve ekosistem üzerinde zarara neden olmaktadır. Ozon tüketimi etkisi kg CFC-11-eşdeğeri olarak ölçülmektedir ve ozon tüketimini en çok etkileyenler CFC, HCFC emisyonları ve diğer halojenlerdir (Sharma, 2017; Al-Jaf, 2014).
<b>Asidifikasyon</b>	SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , HCl, HF, NH <sub>4</sub> , HNO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S	Asidifikasyon potansiyeli / kg SO <sub>2</sub> into air-eq	Asidifikasyona neden olan kirleticilerin (SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> ) ekosistemler, yüzey suları, toprak ve biyolojik organizmalar üzerinde birçok etkisi vardır. Bu bileşikler, aside dönüşerek çevrede birikmektedir. Asidifikasyon etkisi bölgesel olarak kabul edilmekte (Stranddorf ve diğ., 2005) ve kg SO <sub>2</sub> -eşdeğeri olarak ölçülmektedir. Nakliye ve enerji sektörleri, asidifikasyona neden olan kirleticilerin temel kaynağıdır (Sharma, 2017). Asidifikasyonun karasal ekosistem üzerindeki etkisi çam ormanlarında, sucul ekosistemler üzerindeki etkisi ise asit göllerinde ortaya çıkar. (Al-Jaf, 2014).
<b>Ötrofikasyon</b>	PO <sub>4</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , Nitratlar, NH <sub>4</sub>	Ötrofikasyon potansiyeli / kg PO <sub>4</sub> 3- into water - eq	Ötrofikasyon, sucul ekosistemlerindeki plankton ve alglerin artmasıyla birlikte nütrientlerin zenginleşmesi olarak tanımlanmaktadır. Azot ve fosfor, ötrofikasyona neden olan temel bileşenlerdir (Al-Jaf, 2014). Ötrofikasyon potansiyeli kg PO <sub>4</sub> -eşdeğeri olarak ölçülmektedir (Sharma, 2017).

Tablo 1.1. (Devam) YDD çalışmalarında sıkça kullanılan etki kategorileri

<b>Fotokimyasal ozon oluşumu</b>	Metan olmayan HC'lar	Fotokimyasal oksidan oluşturma potansiyeli	Smog olarak da adlandırılmaktadır ve uçucu organik bileşiklerin NO <sub>x</sub> varlığında güneş ışığı etkisiyle ayrışmasından kaynaklanmaktadır (Al-Jaf, 2014). Fotokimyasal sis potansiyeli kg etilen (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) eşdeğeri olarak ölçülmekle birlikte, en çok NO <sub>x</sub> , UOB, CH <sub>4</sub> ve CO emisyonları ile ilişkilidir (Sharma, 2017).
<b>Karasal toksisite</b>	Kemirgenlere olan öldürücü konsantrasyonu raporlanmış zehirli kimyasallar	LC <sub>50</sub> / kg Triethylene glycol into soil-eq	Ekotoksisite, çevre için zehirli olan tüm bileşikleri içerir. Ötrofikasyon gibi, karasal ve sucul ekosistemler üzerinde etkileri görülmektedir. Ağır metaller ve bazı organik bileşiklerin, ekotoksisite üzerinde etkiler vardır. (Al-Jaf, 2014).
<b>Sucul toksisite</b>	Balıklara olan öldürücü konsantrasyonu raporlanmış zehirli kimyasallar	LC <sub>50</sub> / kg Triethylene glycol into water <sub>eq</sub>	
<b>Arazi kullanımı</b>	Diğer arazi değişiklikleri veya düzenli bir depolama sahasının kullanılma miktarı	Arazi durumu / m <sup>2</sup> Organic arable land-eq y	Arazi kullanımı etkisi arazi dönüşümü (ekosistem karakteristikleri değiştiğinden) ve arazi işgalinden (ekosistem kalitesi doğal duruma kıyasla farklı seviyede bulunduğundan) ileri gelmektedir. Dolayısıyla, biyoçeşitlilik azalarak ekosistem kalitesi değişmektedir (Chaudhary ve diğ., 2016).



Şekil 1.3. Emisyonlar ve etki kategorileri arasındaki ilişki (Zbicinski ve diğ., 2006)

Karakterizasyon aşamasında, her bir etki kategorisi ile ilişkili olan tüm çevresel boyutların etkileri birbiri ile karşılaştırılmaktadır. Örneğin, CO<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> gazının küresel ısınma üzerindeki olası etkileri modellenmektedir. Bu işlem, “karakterizasyon (eşdeğerlik) faktörleri” kullanılarak yapılmaktadır (Zbicinski ve diğ. 2006). Tablo 1.2’de örnek olarak, küresel ısınma üzerinde etkili olan gazların eşdeğerlik faktörleri verilmiştir.

Tablo 1.2. Küresel ısınma üzerinde etkili olan gazların atmosferde kalma süreleri ve eşdeğerlik faktörleri (IPCC, 2014)

Bileşik	Atmosferde kalma süresi (yıl)	Küresel ısınma potansiyeli Eşdeğerlik faktörü (100 yıl)
Metan	12,4	28
CO <sub>2</sub>	-	1
N <sub>2</sub> O	121	265
CF <sub>4</sub>	50000	6630
HFC-152a	1,5	138

Karakterizasyon her bir etki kategorisi için etki değerlendirme sonuçlarının doğrudan karşılaştırılmasına olanak sağlar. Yani, karakterizasyon faktörleri farklı envanter girdilerini doğrudan karşılaştırılabilen etki göstergelerine (indikatörlerine) çevirir. Örneğin, bir sistemde oluşan bütün sera gazları, bunlara ait envanter sonuçlarının CO<sub>2</sub> karakterizasyon faktörleriyle çarpılması ile CO<sub>2</sub> eşdeğeri cinsinden ifade edilebilir. Daha sonra aynı birime (CO<sub>2</sub> eşdeğeri) dönüştürülmüş olan etki göstergeleri toplanarak var olan toplam küresel ısınma potansiyeli hesaplanır (Demirer, 2017). Kategori göstergelerinin hesaplanması için kullanılan formül Denklem (1.1)’de verilmiştir (Pennington ve diğ., 2004):

$$\text{Kategori Göstergesi} = \sum_s \text{Karakterizasyon Faktörü} \times \text{Emisyon Envanteri} \quad (1.1)$$

Burada s ile gösterilen kimyasaldır.

Karakterizasyon aşaması sonrası elde edilen sonuçlar, her biri farklı birimlerde (CO<sub>2</sub>eq., SO<sub>2</sub>eq., CFC-11eq, vb.) sunulduğundan dolayı karşılaştırılmamaktadır. Bu nedenle, etki kategorilerinin birbirleri ile karşılaştırılmasına olanak veren normalizasyon işlemi uygulanmaktadır (Zbicinski ve diğ., 2006). Normalizasyon aşamasında, her bir etki kategorisinin sonuçları referans bir rakama bölünerek ve ağırlıklandırma aşamasında en önemli olası etkiler vurgulanarak, ürün/hizmet ortaya konarken en göze çarpan etkiler belirlenmeye çalışılmaktadır (Curran, 2006; Josa ve diğ., 2007). Normalizasyon işlemi Denklem (2.1)'deki formül kullanılarak yapılmaktadır (Pennington ve diğ., 2004):

$$N_k = S_k / R_k \quad (1.2)$$

Burada; k ile gösterilen etki kategorisi, N ile gösterilen normalize edilmiş gösterge, S ile gösterilen karakterizasyon aşamasında hesaplanan kategori göstergesi, R ile gösterilen ise referans değerdir.

Ağırlıklandırma işlemi ise lineer ağırlıklandırma faktörleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Denklem 1.3 veya Denklem 1.4):

$$EI = \sum V_k N_k \quad (1.3)$$

$$EI = \sum V_k S_k \quad (1.4)$$

Burada EI ile gösterilen toplam çevresel etki göstergesi, V<sub>k</sub> ile gösterilen etki kategorisi için ağırlıklandırma faktörü ve S ile gösterilen karakterizasyon aşamasında hesaplanan kategori göstergesidir (Pennington ve diğ., 2004).

Etki kategorilerinin, kategori göstergelerinin ve karakterizasyon (nitelendirme) modellerinin seçimi, sonuçların belgelenmesi ve yorumlanmasında önem taşımaktadır. Bu noktada, etki değerlendirme metotları öne çıkmaktadır (Carlson ve diğ., 2003). Literatürde, yaşam döngüsü etki değerlendirme için kullanılan metotlar temel olarak 2 başlık altında incelenmektedir: Problem odaklı metotlar (CML 2002, EDIP vb.) ve zarar odaklı metotlar (Eco-indicator 99, EPS, IMPACT 2002+ vb.)

(Josa ve diğ., 2007; Chen ve diğ., 2010; Van De Heede ve De Belie, 2012). Problem odaklı metotlar, etkileri, iklim değişikliği, asidifikasyon, insan zehirlenmesi gibi orta nokta etkilerine dönüştürmektedir. Zarar odaklı metotlar ise, asidifikasyon, ötrofikasyon, iklim değişikliği gibi orta nokta etkilerinin; insan sağlığı, ekosistem sağlığı veya kaynak kullanımı üzerindeki etkilere göre her bir çevresel temanın zararını modelleyerek etki değerlendirmesi gerçekleştirmektedir (Çankaya ve Pekey, 2015). Bu metotlar ile ilgili detaylı bilgiler Ek –A’da verilmiştir.

#### **1.1.4. Yorumlama**

Yorumlama, ISO 14040 standardına göre YDD’nin son aşamasını oluşturmaktadır. Bu aşamada araştırmacı, önemli çevresel boyutları, çevresel boyutlar üzerindeki önemli katkıları ve sistemdeki önemli birim prosesleri belirlemeye çalışmaktadır. Örneğin, etki değerlendirmesi sonucunda küresel ısınma potansiyeli göstergesi yüksek çıktıysa, araştırmacı envanter analizi sonuçlarını değerlendirmeye alarak, hangi çıktıların ve hangi proseslerin buna neden olduğunu belirlemeye çalışmaktadır. Kısacası bu aşamada, kalite kontrol çalışmasının bir formu olarak değerlendirilebilir (Young ve diğ., 2002).

ISO 14040 standardına göre yorumlama aşaması, çalışmanın amaç ve kapsamına uygun olarak, YDD sonuçlarının, kolay anlaşılabilir, tam ve tutarlı bir şekilde ortaya konulmasını amaçlar.

#### **1.2. Çimento Sektörü ve Çimento Üretim Prosesi**

Çimento, yapı sektöründe kullanılan temel malzemelerden biridir ve günümüzde sürekli gelişen yapı/ınşaat sektörüne bağlı olarak, çimento ihtiyacında da önemli bir artış söz konusudur. Çimento, temel olarak, kalsiyum, alüminyum, silisyum ve demir oksitleri içeren kalker, kiln, marn ve demir cevheri gibi hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen farin adlı karışımın, sinterleşme sıcaklığına gelinceye kadar pişirilip, elde edilen klinkerin alçı taşı ve çeşitli katkı maddeleriyle öğütülmesi sonucu oluşan hidrolik bağlayıcı bir malzemedir (Özdöl, 2004; URL-1).



### 1.2.1. Dünyada ve Türkiye’de çimento sektörü

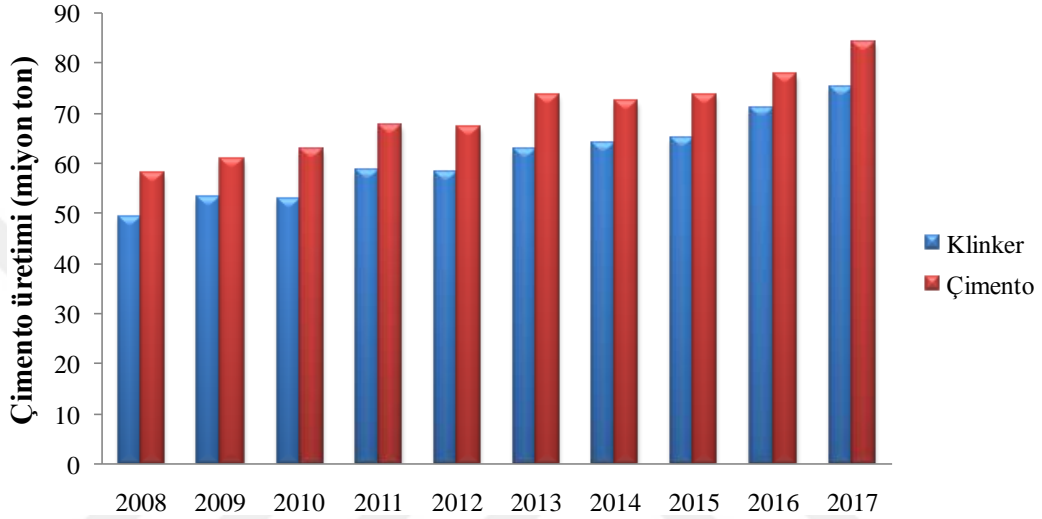
Çimento üretimi, büyük miktarlarda ham madde ve enerji tüketimini, önemli miktarlarda katkı maddesi ve yakıt (kömür, petrol, doğal gaz, fuel oil, biyoyakıt vb.) kullanımını gerektiren, oldukça kompleks bir prostestir. Çimento üretimi sırasında havaya, toprağa ve suya birçok kirletici salınımı gerçekleşmekle birlikte, ana emisyonlar çimento fırınlarından kaynaklanan atmosferik emisyonlardır (Valderrama ve diğ., 2012). Literatürde yer alan bilgilere göre, küresel antropojenik CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %5-7’si, toplam sera gazı emisyonlarının ise yaklaşık %3’ü çimento üretiminden kaynaklanmaktadır (IPCC, 2005; Ali ve diğ., 2011; Galvez-Martos ve Schoenberger, 2014).

2007 ile 2015 yılları arasında G20 ülkelerinde çimento üretimi miktarları (milyon ton) ve bu yıllar arasındaki değişim yüzdeleri Tablo 1.3’de verilmiştir. Genel olarak, çimento ihtiyacının yoğunluğu gelişmiş ülkelerde azalmakta iken; gelişmekte olan ülkelerde artış göstermektedir (Stafford ve diğ., 2016a). Bahsedilen yıllarda, Çin’in toplam çimento üretimindeki payı oldukça yüksektir (%65). 2015 yılında, Çin G20 ülkeleri arasındaki çimento üretiminin %67’sinden sorumlu iken; Türkiye için bu oran %2’dir. 2007 ile 2015 yılları arasındaki toplam çimento üretimleri bazında değerlendirildiğinde, Türkiye G20 ülkeleri arasında 5. Sıradadır.

Tablo 1.3. Dünyada çimento üreten ülkeler (G20 ülkeleri) (milyon ton) (CEMBUREAU, 2016)

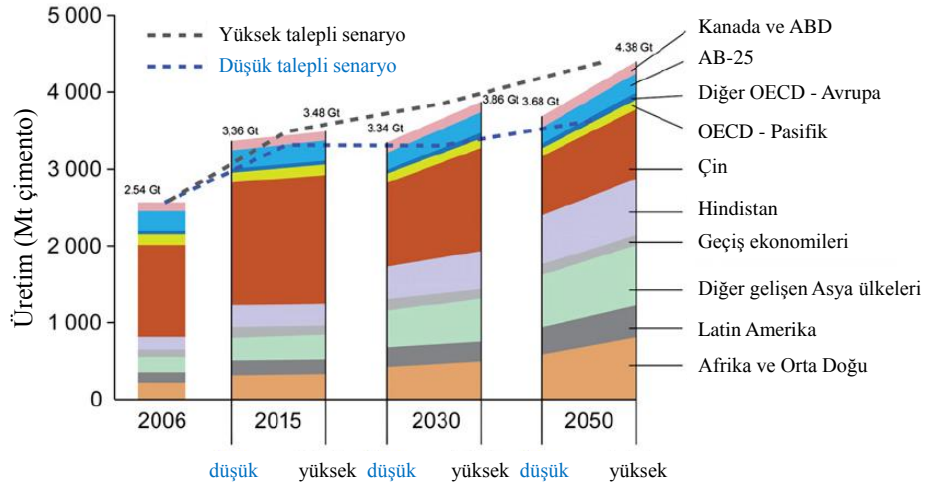
Ülke	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Değişim (%)
<b>Çin</b>	1361,2	1388,4	1644,0	1881,9	2063,2	2137,0	2420,0	2480,0	2350,0	72,64
<b>Hindistan</b>	170,5	185,0	205,0	220,0	240,0	270,0	280,0	260,0	270,0	58,36
<b>EU28</b>	269,1	250,8	209,0	192,1	191,6	172,6	166,6	166,8	167,2	-37,87
<b>ABD</b>	95,5	86,3	63,9	65,2	68,6	74,9	77,4	83,2	83,4	-12,67
<b>Brezilya</b>	45,9	51,6	51,7	59,1	63,0	68,8	70,0	72,0	72,0	56,86
<b>Türkiye</b>	49,3	51,4	54,0	62,7	63,4	63,9	72,7	71,2	72,8	<b>47,67</b>
<b>Rusya</b>	59,9	53,5	44,3	50,4	56,1	53,0	72,0	68,4	69,0	15,19
<b>Endonezya</b>	35,0	38,5	36,9	39,5	45,2	32,0	56,0	65,0	65,0	85,71
<b>G.Kore</b>	52,2	51,7	50,1	47,4	48,2	48,0	47,3	63,2	63,0	20,69
<b>Japonya</b>	71,4	67,6	59,6	56,6	56,4	51,3	57,4	53,8	55,0	-22,97
<b>Arabistan</b>	30,3	37,4	37,8	42,5	48,0	50,0	57,0	55,0	55,0	81,52
<b>Meksika</b>	38,8	37,1	35,1	34,5	35,4	35,4	34,6	35,0	35,0	-9,79
<b>Almanya</b>	33,4	33,6	30,4	29,9	33,5	32,4	31,5	32,1	31,1	-6,89
<b>İtalya</b>	47,5	43,0	36,3	34,4	33,1	26,2	23,1	24,0	20,8	-56,21
<b>Fransa</b>	22,1	21,2	18,1	18,0	19,4	18,0	17,5	16,4	15,6	-29,41
<b>G. Afrika</b>	13,7	13,4	11,8	10,9	11,2	13,8	14,9	13,8	14,0	2,19
<b>Kanada</b>	15,1	13,7	11,0	12,4	12,0	12,5	12,1	12,8	12,5	-17,22
<b>Arjantin</b>	9,6	9,7	9,4	10,4	11,6	10,7	11,9	11,8	12,2	27,08
<b>İngiltere</b>	12,6	10,5	7,8	7,9	8,5	7,9	8,5	9,3	9,6	-23,81
<b>Avustralya</b>	9,2	9,4	9,2	8,3	8,6	8,8	8,6	9,0	9,1	-1,09
<b>Toplam</b>	<b>2442,3</b>	<b>2453,8</b>	<b>2625,4</b>	<b>2884,1</b>	<b>3117</b>	<b>3187,2</b>	<b>3539,1</b>	<b>3602,8</b>	<b>3482,3</b>	<b>2442,3</b>

Türkiye’de, 52 adet entegre çimento fabrikası ve 20 adet çimento öğütme-paketleme tesisi bulunmaktadır (URL-2). 2017 yılında klinker üretim kapasitesi 83 milyon ton, çimento üretim kapasitesi ise 135 milyon tondur. 2008 ile 2017 yılları arasında Türkiye’de üretilen klinker ve çimento miktarları (milyon ton) Şekil 1.4’de gösterilmektedir. Belirtilen 10 yılda klinker üretimi %52; çimento üretimi ise %46 artmıştır.



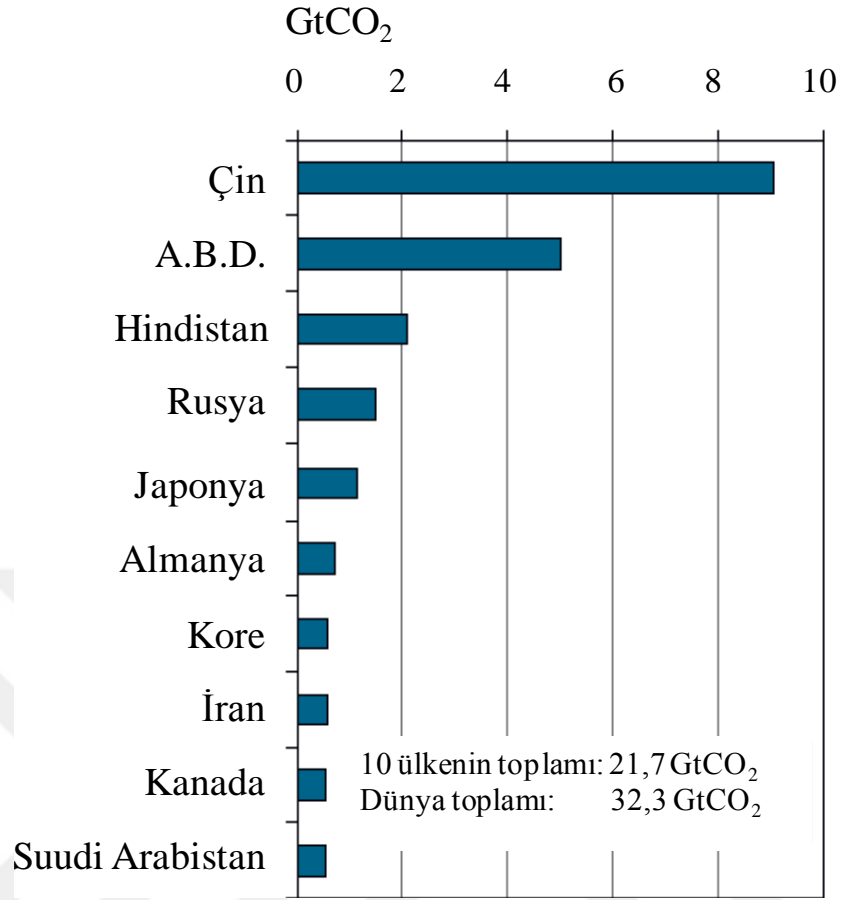
Şekil 1.4. Türkiye’de klinker ve çimento üretiminin yıllara göre değişimi (URL-8)

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yayınlanan bir raporda, 2030 ve 2050 yıllarına ait çimento üretimi projeksiyonları verilmiştir. 2006 yılında 3,7 Mt olan çimento üretiminin, 2050 yılında 4,4 Mt olarak; yılda %0,8-1,2 büyüyeceği öne sürülmüştür. Bu büyümenin en önemli kısmını Çin, Hindistan ve Asya ve Avrupa’daki diğer gelişmekte olan ülkelerin oluşturacağı belirtilmiştir (Gürsel, 2014; URL-3) (Şekil 1.5). Çimento üretimindeki bu artışın beraberinde enerji kullanımı ve CO<sub>2</sub> emisyonlarında önemli artışı meydana getireceği açıktır (Gürsel, 2014).



Şekil 1.5. Çimento üretimi projeksiyonları (URL-3)

Literatürde, çimento sektörünün, dünyada, antropojenik kaynaklı karbon dioksit emisyonlarının %5-7'sinden sorumlu olduğu belirtildiğinden (Galvez-Martos ve Schoenberger, 2014); çimento sektörünün çevresel etkilerinin araştırıldığı çalışmalarda, yıllar bazındaki CO<sub>2</sub> emisyonu miktar ve değişimlerinin incelenmesi önem taşımaktadır. 1972-2011 yılları arasında, küresel CO<sub>2</sub> emisyonları 14,8 GtCO<sub>2</sub>'den 31,3 GtCO<sub>2</sub>'e yükselmiştir (Gürsel, 2014). 2015 yılında ise bu değer 32,3 GtCO<sub>2</sub> olarak belirtilmiştir (IEA, 2017). Bu değer yaklaşık üçte biri Çin'den kaynaklanırken; Çin'i sırasıyla Amerika Birleşik Devletleri ve Hindistan takip etmektedir (Şekil 1.6).



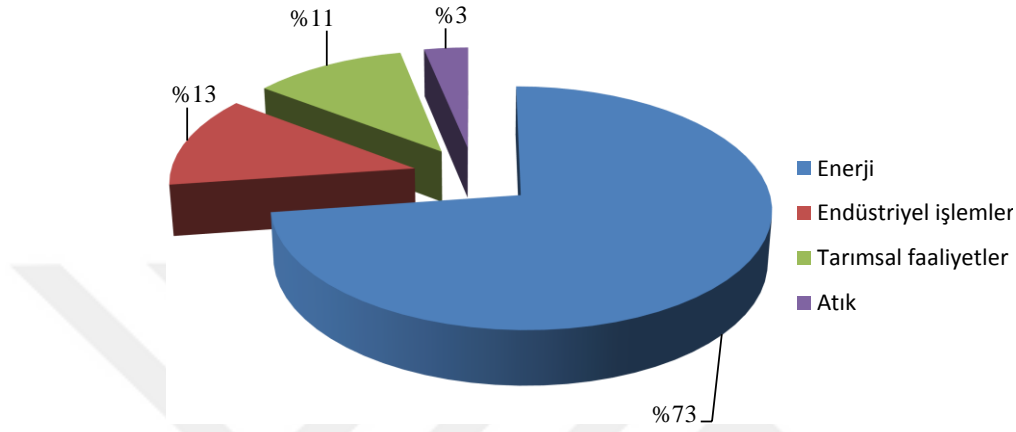
Şekil 1.6. 2015 yılında, dünya çapında en fazla CO<sub>2</sub> emisyonu salımı yapan ülkeler (IEA, 2017)

CO<sub>2</sub> emisyonlarına neden olan sektörler araştırıldığında ise, en yüksek CO<sub>2</sub> emisyonlarının enerji üretiminden kaynaklandığı dikkat çekmektedir (yaklaşık %78). (Tablo 1.4).

Tablo 1.4. Dünya çapındaki büyük sabit (stationary) CO<sub>2</sub> kaynaklarının proses veya endüstriyel aktivitelere göre profili (IPCC, 2005)

Proses	Kaynak sayısı	Emisyon (MtCO <sub>2</sub> /yıl)
<b>Fosil yakıtlar</b>		
Enerji	4942	10539
Çimento üretimi	1175	932
Rafineri	638	798
Demir ve çelik endüstrisi	269	646
Petrokimya endüstrisi	470	379
Petrol ve gaz endüstrisi	Uygulanamaz	50
Diğer kaynaklar	90	33
<b>Biyokütle</b>		
Biyoetanol ve biyoenerji	303	91
<b>Toplam</b>	<b>7887</b>	<b>13466</b>

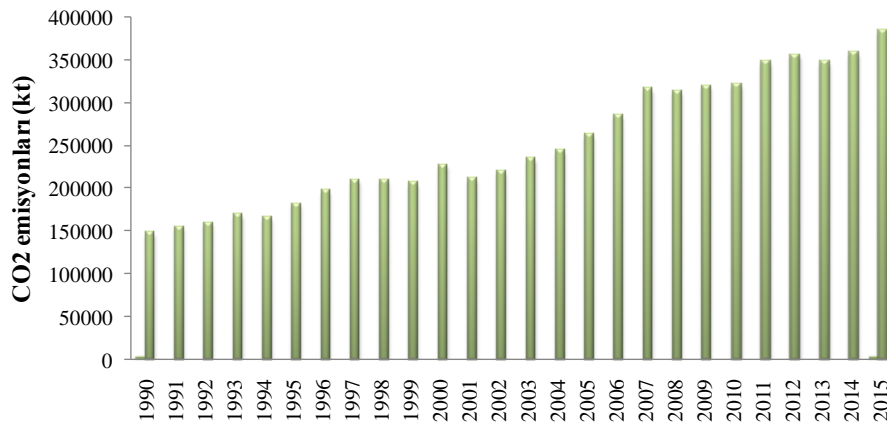
Türkiye’de oluşan sera gazı emisyonlarının sektörlere göre profilleri Şekil 1.7’de verilmekle birlikte, toplam sera gazlarının %81’ini CO<sub>2</sub> emisyonları oluşturmaktadır. Dünya genelindeki profile benzer şekilde, enerji üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonları oldukça yüksek orandadır (%73). Bunu sırasıyla, endüstriyel işlemler ve tarımsal faaliyetler takip etmektedir.



Şekil 1.7. Türkiye’deki sera gazı emisyonlarının kaynak profilleri (TÜİK, 2016)

2016 yılında, çimento üretimini de içeren mineral ürünlerin üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonları ise toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarının %10’unu oluşturmaktadır (TÜİK, 2016).

Türkiye’de baz yıl olan 1990 ve 2015 yıllarında CO<sub>2</sub> emisyonu miktarları ve değişimleri Şekil 1.8’de verilmektedir. OECD Avrupa ülkeleri arasında yer alan Türkiye, 1990-2015 yılları arasında CO<sub>2</sub> emisyonlarında %158’lik artışla dikkat çekmekle birlikte, küresel CO<sub>2</sub> emisyonu salımındaki payı %1,2’dir (URL-4).



Şekil 1.8. Türkiye’de CO<sub>2</sub> emisyonlarının yıllara göre değişimleri (URL-4)

### 1.2.2. Çimento üretim prosesi

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

Çimento üretiminde kullanılan hammaddeler en genel şekliyle, kalker bileşeni ve kil bileşenidir (Özdöl, 2004). Çimento üretiminde kullanılan kalker, kil ve diğer hammadde kaynakları Tablo 1.5’de verilmektedir. (Akkapeddi, 2008; Schneider ve diğ., 2011)

Entegre bir çimento fabrikasında çimento üretimi genel olarak 6 aşamadan oluşmaktadır: hammaddelerin ocaktan çıkarılması, hammadde hazırlama, farin üretimi, klinker üretimi, çimento öğütme ve paketleme. Çimento üretimi aşamaları Şekil 1.9’da verilmiştir.

Tablo 1.5. Çimento üretiminde kullanılan hammadde kaynakları

Grup	Hammadde
Ca	*Kalker, *marn, *aragonik kireçtaşı, *kalsit, Diğerleri: kireç çamuru, sulu kireç çamuru, köpük beton granülü, alkali atıklar, deniz kabuğu, mermer,
Si	*Kum, *kil, *marn, *killi şist Diğerleri: kullanılmış döküm kumu, çamur,
Si-Al	Kil Bentonite/kaolinit
Fe	*Demir cevheri, *kil, *haddehane pulu (demir oksit katmanı), killi şist Kontamine olmuş cevher, pirit külü, demir oksit/uçucu kül karışımları, çelik fabrikalarından çıkan tozlar, cevher yıkama.
Si-Al-Ca	Granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül, tras, bitümlü şist, kağıt artıkları, yakma prosesi külleri, petrolle kirlenmiş toprak..vb.
Al	*Al cevheri artıkları, *kil, *uçucu kül, *killi şist, metal endüstrisinden çıkan Al içerikli maddeler (Alüminyum hidroksit..vb), boksit, cevher yıkama.
S	Doğal alçıtaşı, doğal anhidrit, baca gazı kükürtünün giderilmesinden kaynaklanan alçıtaşı

\*: En yaygın kullanılan kaynak.

### **1.2.2.1. Madencilik faaliyetleri**

Çimento üretiminde hammaddeler kalsiyum oksit, silisyum oksit, alüminyum oksit ve demir oksitleri içeren minerallerin karışımlarıdır (EEA, 2016). Kalker, çimento üretimi için gerekli olan kalsiyum karbonatın ( $\text{CaCO}_3$ ) en uygun kaynağıdır (Caruso, 2006). Kalker, alçı, marn ve kili içeren temel hammaddeler, genellikle patlayıcı maddeler yardımı ile doğadan temin edilmektedir (Bilgin ve Koç, 2013). Çoğu zaman çimento fabrikaları, kalker, marn gibi temel hammaddelerin temin edildiği madenlere yakın konumdadır (EEA, 2016). Çimento üretiminde düşük miktarlarda kullanılan demir cevheri, boksit, killi şist, kil ve kum gibi malzemelere, ilave mineral içeriği temin etmek amacıyla ihtiyaç duyulmaktadır (URL-5).

### **1.2.2.2. Hammadde hazırlama**

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

Bir ton klinker üretmek için ortalama 1,5 – 1,6 ton hammadde gerekmektedir (GTZ/Holcim, 2006; EEA, 2016; Georgiopolou ve diğ., 2018).

### **1.2.2.3. Farin üretimi**

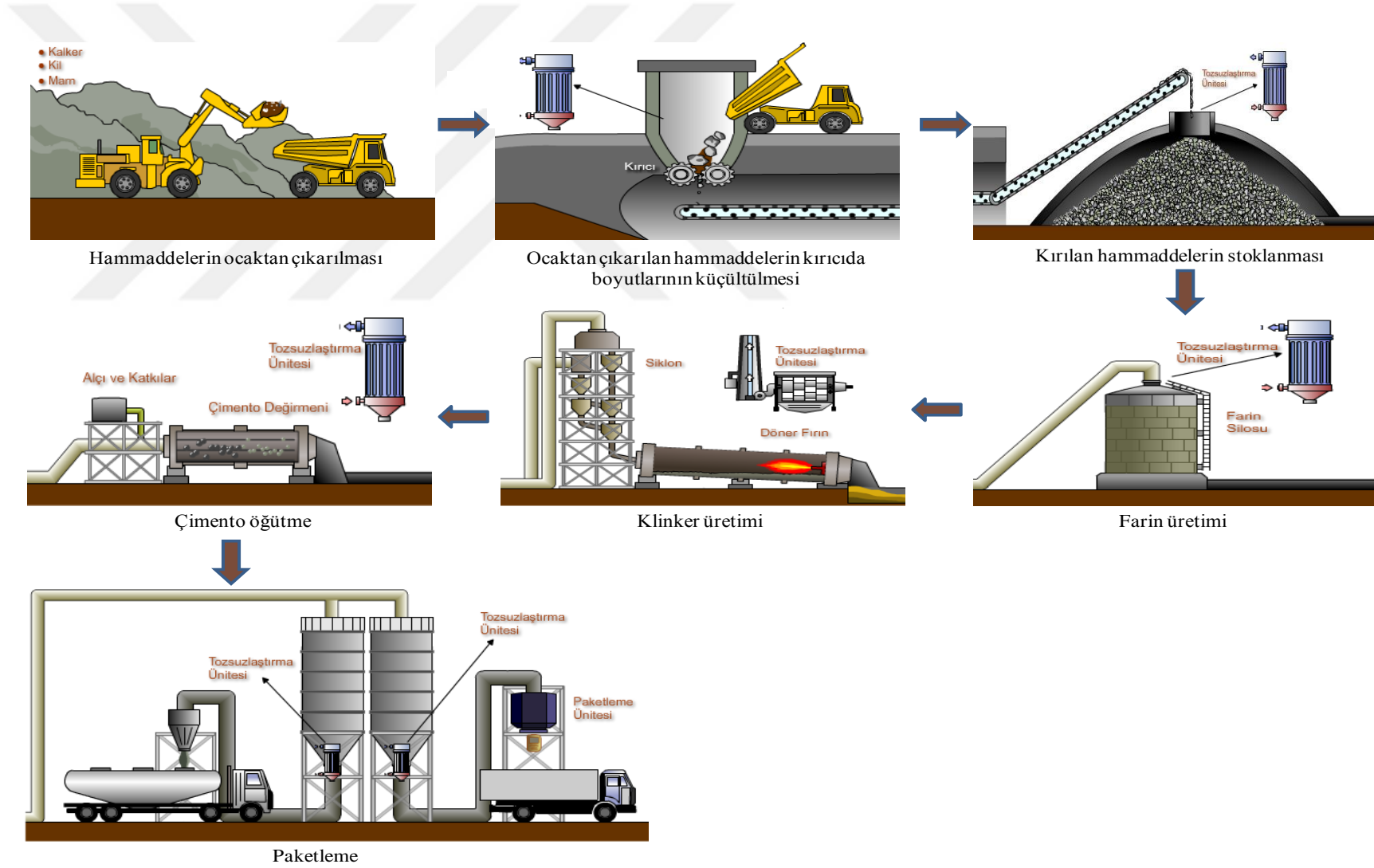
Bantlı konveyör gibi taşıyıcılar yardımıyla stoktan alınan hammaddeler farin değirmenlerinde belirli oranlarda karıştırılıp öğütülerek, hammadde karışımı olarak da adlandırılan farin üretilmektedir (Yeğinobalı, 2003; Bilgin ve Koç, 2013). Hammadde öğütmenin amacı uygun kimyasal oranlarda bir hammadde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

Koç, 2013). Öğütme, düşey değirmenlerde veya yatay bilyalı değirmenlerde gerçekleşir (Yeğinoğlu, 2003).

Kireç (CaO) daha ziyade kalker veya marn gibi kalsiyum karbonat içeren kayalardan ortama girer. Silis (SiO<sub>2</sub>) için ise başlıca kaynak kildir. Alüminyum (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de genellikle kilden elde edilirler veya ilaveten katılırlar. Farin fırında pişerken bu oksitler önce serbest hale gelirler ve sonra, sıcaklık yükseldikçe aralarında yeni bileşikler oluştururlar. Burada kireç miktarının yeterli olması ve hammaddelerin gereken oranlarda birleştirilmesi önem kazanır (Yeğinoğlu, 2003).



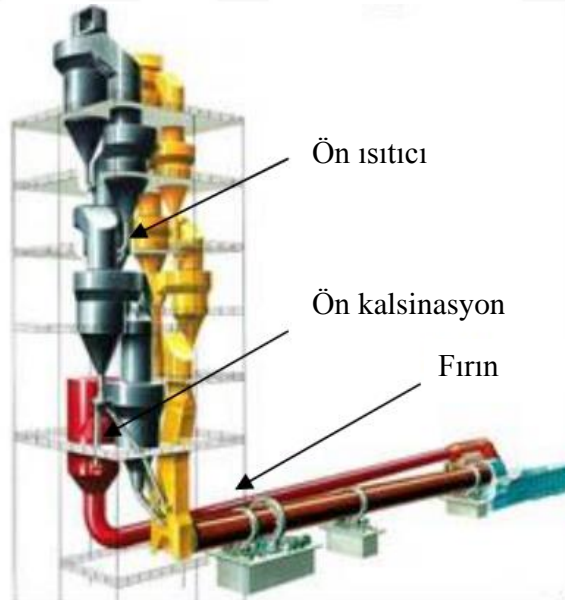




Şekil 1.9. Çimento üretim prosesi (URL-1)

#### 1.2.2.4. Klinker üretimi

Klinker üretimi, yoğun enerji kullanımı, emisyon oluşumu, ürün kalitesi ve maliyeti açısından çimento üretim prosesinin en önemli aşamasıdır (EEA, 2016). Bu aşama, ön ısıtıcı kulede ve fırında gerçekleşmektedir. Ön ısıtıcı kule, ısıyı fırından hammaddelere aktaran bir dizi karşıt akımlı siklonlardan oluşmaktadır. Yeni teknoloji ön ısıtıcılar, ön kalsinasyon olarak adlandırılan yakıt yanma odası içeren bir bölüme sahiptir (Şekil 1.10). Bu aşamada, hammaddelerin kalsinasyonu başlamakta ve CO<sub>2</sub> oluşmaktadır (Caruso, 2006). Hammadde karışımı olarak da adlandırılan farin, kalsiyum oksit ve diğer elementlerle reaksiyona girerek 1400-1450 °C sıcaklıkta kalsiyum silikat ve alüminatlar oluşturmak için fırına beslenmekte ve klinker adı verilen ara ürün oluşmaktadır (Stajanča ve Eštokova, 2012; Bilgin ve Koç, 2013;). Klinkerde, kalsiyum, silisyum, alüminyum ve demir elementleri belirli oranlarda bulunmaktadır. Tüm bu hammaddeler yakıtla birlikte karıştırılarak tipik klinker kompozisyonunu oluşturmaktadır: CaO= 65 ± 3%, SiO<sub>2</sub>= 21 ± 2%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>= 5 ± 1,5%, and FeO<sub>3</sub> = 3 ± 1% (Caruso, 2006). Oluşan klinker, klinker stok holünde stoklanmaktadır (Bilgin ve Koç, 2013).



Şekil 1.10. Ön ısıtıcı ve ön kalsinasyonlu çimento fırını (Caruso, 2006)

Klinker üretiminin (kurutma ve ön ısıtma harici) kimyasal/mineralojik reaksiyonları için teorik termal enerji ihtiyacı 1700 MJ/t.klinker'dir. Fiili termal enerji ihtiyacı ise farklı fırın sistemleri ve boyutlarına göre değişmekle birlikte yaklaşık 3000 – 6500

MJ/t.klinker'dir (BAT, 2010; EEA, 2016). Çimento fırınlarında klinker oluşumu için gerekli olan yüksek sıcaklıklara ulaşabilmek için çeşitli enerji kaynakları kullanılmaktadır; fosil yakıtlar, kömür, fuel oil, petrokok, doğalgaz, dizel, alternatif yakıtlar (atık veya biyokütle vb.) gibi. Dolayısıyla, klinker üretiminde kalkerin parçalanması nedeniyle oluşan CO<sub>2</sub> emisyonları kadar fosil yakıt kullanımından oluşan CO<sub>2</sub> emisyonları da önem taşımaktadır (Stafford ve diğ., 2016a). Çimento üretimi prosesindeki CO<sub>2</sub> emisyonlarının genellikle %60'ı kalkerin parçalanmasından kaynaklanırken; kalan kısmı ise yakıt yanmasından kaynaklanmaktadır (WBCSD ve IEA, 2009).

Çimento üretim prosesinin temel kimyası, kalsiyum karbonatın 900 °C'de parçalanması ile kalsiyum oksit (CaO) ayrılarak CO<sub>2</sub>'nin serbest kalması ile başlar. Bu işlem, kalsinasyon olarak adlandırılır. Kalsiyum oksit daha sonra yüksek sıcaklıkta (1400 –1500 °C) silisyum, alüminyum ve demir cevheri ile reaksiyon vererek sıvı faz veya çamur oluşmaktadır. Son olarak, sülfatlar gibi uçucu bileşiklerin buharlaşması ile birlikte klinker meydana gelmektedir. Klinker, alçı taşı ve diğer katkı maddeleri ile karıştırılarak, çimento üretilmektedir. (Rahman ve diğ., 2015; Sharma ve Orr, 2016; EEA, 2016).

Klinker bileşiminin %90'ından fazlasını karma oksit formundaki dört ana bileşen oluşturur: C<sub>4</sub>AF, C<sub>3</sub>A, C<sub>2</sub>S (belit) ve C<sub>3</sub>S (alit). Klinker üretiminin gerçekleştiği döner fırın içerisinde oluşan kimyasal reaksiyonlar Tablo 1.6'da özetlenmiştir (Kaplan, 2018).

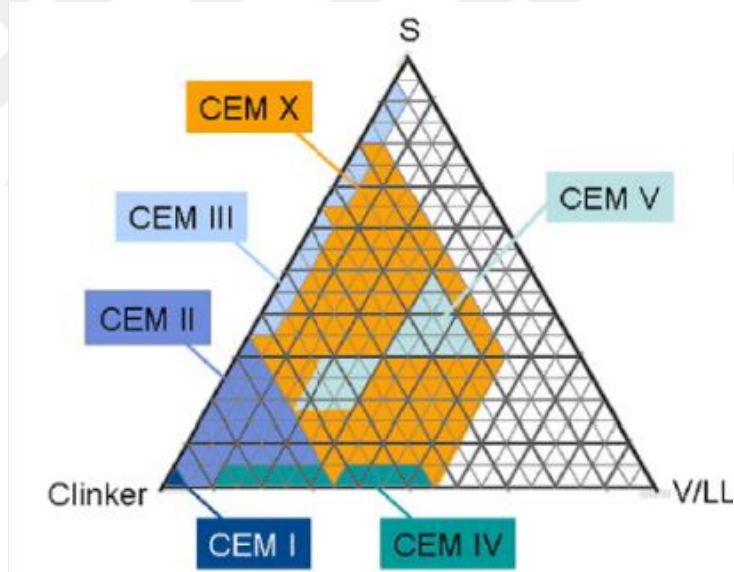
Tablo 1.6. Klinker üretiminde gerçekleşen bazı reaksiyonlar (Kaplan, 2018)

Reaksiyon adı	Etki	Reaksiyon bölgesi	Kimyasal reaksiyon	Sıcaklık (°C)
MgCO <sub>3</sub> ayrışması	Ayrışma Kalsinasyon	Ön ısıtma Fırın	$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$	550 – 960
CaCO <sub>3</sub> ayrışması	Ayrışma Kalsinasyon	Ön ısıtma Fırın	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$	550 – 960
β-C <sub>2</sub> S oluşumu	Geçiş	Fırın	$2CaO + SiO_2 \rightarrow \beta-Ca_2SiO_4$	600 - 1300
C <sub>4</sub> AF oluşumu	Geçiş	Fırın	$4CaO + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \rightarrow Ca_4Al_2Fe_3O_{10}$	1200 - 1280
C <sub>3</sub> A oluşumu	Geçiş	Fırın	$3CaO + Al_2O_3 \rightarrow Ca_3Al_2O_6$	1200 - 1280
C <sub>3</sub> S oluşumu	Yanma Sinterleşme	Fırın	$\beta-Ca_2SiO_4 + CaO \rightarrow Ca_3SiO_5$	> 1280
Erimiş faz oluşumu	Yanma Sinterleşme	Fırın	$Klinker_{katı} \rightarrow Klinker_{sıvı}$	> 1280
Klinkerin katılaşması	Soğuma	Fırın soğutucu	$Klinker_{katı} \rightarrow Klinker_{sıvı}$	150 - 200

### 1.2.2.5. Çimento öğütme

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

Çimento standardında 27 ayrı tip çimento vardır (TS EN 197-1). Bu çimentolar 5 genel grupta (CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V) toplanırlar ve üç dayanım sınıfına (32,5-42,5-52,5) ayrılırlar. Bunlara ek olarak sülfata dayanıklı çimentolar, kalsiyum alüminatlı çimentolar, düşük ısıli çimentolar gibi özel çimentolar da bulunmaktadır (URL-9). Çimento tipleri Şekil 1.11’de gösterilmektedir.



Şekil 1.11. Çimento türleri (Schneider ve diğ., 2011)

Klinkerin sadece kalsiyum sülfat ve minör bileşen olarak ağırlıkça en fazla %0-5 arası mineral katkı ile öğütülmesi sonucunda Portland Çimentosu olarak adlandırılan CEM I tipi çimento elde edilir. CEM II tipi çimentoda ise, mineral katkı miktarı %6-35 arasındadır. Katkı türüne bağlı olarak bu gruptaki çimentolar Portland Cürufu, Portland Puzolanlı gibi isimler de almaktadır. CEM III tipi olarak adlandırılan çimento grubunda, yüksek fırın cürufu çimentolar bulunur. Katkı miktarı %36-95

arasındadır. CEM IV grubunda, puzolanik çimentolar yer alır. Bu çimentolarda cüruf veya kalker katkı maddesi olarak kullanılmaz. Katkı madde oranı puzolan ve uçucu kül katkıları ile birlikte %11-55 arasında değişmektedir. CEM V tipi çimentolar, kompoze çimentolardır. Bu tip çimentolara, cüruf (%18-50), puzolan ve uçucu kül (%18-50) miktarı belirlenen sınırlar içerisinde değiştirilerek birlikte katılır, miktarları klinker oranı %20-64 arasında kalacak şekilde ayarlanır (URL-9).

CEM I tip çimento %59'a yaklaşan kullanım oranı ile iç pazarda en yüksek oranda kullanılan çimentodur (Tablo 5). 33,7 Mt'a ulaşan iç tüketimi ağırlıklı olarak (%90) 42,5 dayanımdadır. CEM I tip çimentoları 21,2 Mt tüketim ile CEM II tip çimentolar takip etmiştir. CEM IV tip çimentoların kullanımı 6,1 Mt olarak gerçekleşmiştir. Cüruf katkılı CEM III ve CEM V tipi çimentoların toplam kullanımı ise 2 Mt'a ulaşmıştır. (URL-9).

#### **1.2.2.6. Paketleme**

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

#### **1.2.3. Çimento üretiminde oluşan emisyonlar**

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

Çimento üretiminden oluşan temel emisyonlar, fırın sistemlerinden havaya verilen emisyonlardır. Salımlar, hammadde ve yakıtların fiziksel ve kimyasal reaksiyonları sonucu oluşmaktadır. Çimento fırını bacalarından çıkan gazların temel bileşenleri,

yanma havasından kaynaklanan azot,  $\text{CaCO}_3$ 'ün kalsinasyonu ve yakıt yanmasından kaynaklanan  $\text{CO}_2$ , yanma proseslerinden ve hammaddelerden kaynaklanan su buharı ve fazla oksijendir (BAT, 2013). Avrupa Birliği tarafından yayınlanan Mevcut En İyi Teknikler Referans dökümanında, çimento üretim prosesinde oluşan kirleticiler şu şekilde sıralanmıştır (BAT, 2010; EEA, 2016): azot oksitler ( $\text{NO}_x$ ), kükürt oksitler ( $\text{SO}_2$ ) ve diğer sülfürlü bileşikler, toz, uçucu organik bileşikler (UOB), dioksin ve furanlar, metaller ve bileşikleri, hidrojen florür (HF), hidrojen klorür (HCl), karbon monoksit (CO), amonyak ( $\text{NH}_3$ ) (Mishra ve Siddiqui 2014; EEA, 2016; GTZ/Holcim, 2006; Georgiopoulou ve diğ., 2018).

Listede adı geçmeyen  $\text{CO}_2$ 'ün çimento üretimi ile ilgisi olduğu kabul edilmektedir (BAT, 2013). IPCC'ye göre, çimento üretim prosesinden oluşan  $\text{CO}_2$ , küresel  $\text{CO}_2$  emisyonlarının enerji dışı endüstriyel proseslerinin en önemli kaynağıdır (URL-6). Küresel antropojenik  $\text{CO}_2$  emisyonlarının yaklaşık %5-7'si, çimento üretiminden kaynaklanmaktadır (IPCC, 2005; Ali ve diğ., 2011; Galvez-Martos ve Schoenberger, 2014). Genellikle,  $\text{CO}_2$  emisyonlarının önemli bir kısmı (%60-70) hammadde olarak kullanılan kalsiyum karbonatın kalsiyum oksite dönüşmesi olan kalsinasyon olarak adlandırılan kimyasal reaksiyonlardan; diğer kısmı (yaklaşık %30-40'ı) fırın için gerekli olan sıcaklığın sağlanması için yakıtların yanmasından kaynaklanmaktadır. Yaklaşık %10'luk kısım ise, elektrik kullanımı ve nakliye işlemlerine bağlı olarak oluşmaktadır (URL-7; Ali ve diğ., 2011).  $\text{CO}_2$  emisyonları genellikle üretim prosesi ve kullanılan yakıt türüne bağlıdır. Örneğin, tipik bir 5 aşamalı ön ısıtıcı ön kalsinasyonlu ve yakıt olarak %100 petrokok kullanan bir fırında, kimyasal reaksiyonlar nedeniyle oluşan  $\text{CO}_2$  emisyonu yaklaşık 0,53 t/klinker iken; yakıt tüketimine bağlı oluşan  $\text{CO}_2$  emisyonu ise yaklaşık 0,31 t/klinkerdir (Georgiopoulou ve diğ., 2018).  $\text{CO}_2$  emisyonlarının azaltılması ve kontrolü için önerilen teknikler: katkılı çimentoların üretimi, enerji verimliliğini artırıcı proseslerin tercih edilmesi (kuru, ön ısıtıcı, ön kalsinasyonlu sistem gibi), doğal gaz, fuel oil, atık yakıtlar gibi yakıtların tercih edilmesi, organik madde içeriği düşük hammaddelerin tercih edilmesi olarak belirtilebilir (IFC, 2007).

Karbon monoksitin (CO) ise sera gazı emisyonları üzerindeki katkısı oldukça düşüktür (toplam salınan gazların %0,5-1'inden azı). Bu emisyonlar genellikle hammaddelerin organik madde içeriği ile ilgilidir (IFC, 2007).

Azot oksitler yanma prosesinde, yanma havasında azotun oksidasyonu (termal  $\text{NO}_x$ ) veya yakıttaki azot bileşiklerinin oksidasyonu (yakıt  $\text{NO}_x$ ) ile oluşurlar. Termal  $\text{NO}_x$  1200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda oluşmaktadır. Çimento fırınlarındaki çok yüksek sıcaklıklardan dolayı, termal  $\text{NO}_x$  baskındır. Azot oksitlerin yaklaşık %95'ini azot monoksit ( $\text{NO}$ ) oluştururken; %5'ini azot dioksit ( $\text{NO}_2$ ) oluşturur (EEA, 2016).

Çimento fabrikalarında oluşan  $\text{SO}_2$  emisyonları, temel olarak toplam kükürt bileşikleri girdisine ve kullanılan prosesin tipine bağlı olmakla birlikte, kükürt içeren hammaddelerin oksidasyonu ve kükürt içeren yakıtların yanması sonucu oluşur (URL-9; Mishra ve Siddiqui, 2014). Hammadde döner fırında 370 – 420 °C sıcaklıkta oksitlenerek  $\text{SO}_2$  ve  $\text{SO}_3$  oluşturur.  $\text{SO}_2$ , klinker içindeki kalsiyum sülfatın termal dekompozisyonu ile oluşur.  $\text{SO}_3$  ise anhidrit olarak bulunur ve kolayca  $\text{SO}_2$  ve  $\text{O}_2$ 'ye ayrıştır (Mishra ve Siddiqui, 2014).

Bu kükürt oksitleri, fırının çıkışındaki düşük sıcaklıktan  $\text{SO}_2$  olarak ortama verilir. Hammaddelerin içinde sülfat olarak bulunan kükürt sadece yüksek sıcaklıklarda bileşenlerine ayrıştır ve fırını neredeyse tamamen klinker ile terk eder. Fırın içindeki kükürt, yakıtlarla birlikte  $\text{SO}_2$ 'ye oksitlenir ve sinterleme bölgesinin, kalsinasyon bölgesinin ve ön ısıtıcının alt kademesinin güçlü alkali doğası gereği önemli miktarda  $\text{SO}_2$  emisyonuna sebep olmaz. (URL-9; EEA, 2016).

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

Çimento fırınları, güçlü alkalın atmosferi ve yüksek alev sıcaklığı (2000 °C) nedeniyle, yüksek kalorifik değerli atık yakıtların (kullanılmış solventler, atık yağlar, kullanılmış araç lastikleri, atık plastikler, poliklorlu bifeniller, organoklorlu pestisitler ve diğer klorlu malzemeleri içeren organik kimyasal atıklar gibi)

kullanılmasına imkan vermektedir. Eğer uygun işletme ve kontrolleri sağlanmazsa, atık yakıtların kullanılması, uçucu organik bileşik (UOB), poliklorlu dibenzo oksinler (PCDDs) ve dibenzo furanlar (PCDFs), hidrojen florür (HF), hidrojen klorür (HCl) ve toksik metaller ile onların bileşikleri gibi emisyonların oluşumuna neden olabilir (IFC, 2007).

Hammadde karışımı ısıtıldıkça, hammadde içinde bulunan kirleticiler (organik maddeler gibi) buharlaşıyorsa; fırın prosesinin girişinde (ön ısıtıcı, prekalsinasyon) uçucu organik bileşikler (UOB), CO ve NH<sub>3</sub> oluşabilmektedir (EEA, 2016). Ayrıca, amonyak emisyonları, NO<sub>x</sub> azaltımında ikincil teknikler (seçici katalitik olmayan indirgeme – SNCR gibi) kullanılması durumunda da oluşabilmektedir (BAT, 2013).

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

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

Klorür ve florürler, çimento fırınına hammaddeler veya yakıtlar ile girmektedir. Büyük bir kısmı ince hammadde partikülleri ile tutularak, klinker ile birlikte fırını terk etmekte iken; küçük bir kısmı ise toz partikülleri üzerinde adsorbe olarak fırını



terk etmektedir (EEA, 2016). Tablo 1.7’de, Türkiye’de çimento fırınlarından oluşan emisyon verilerine ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 1.7. Türkiye’de çimento fırınlarından oluşan emisyon değerleri (BAT, 2013)

Kirlenici adı	mg/Nm <sup>3</sup>	kg/t.klinker	t/yıl
NO <sub>x</sub> (NO <sub>2</sub> )	145 - 2040	0,33 – 4,67	334 – 4670
SO <sub>2</sub>	4837’ye kadar	11,12’ye kadar	11125’e kadar
Toz	0,27 - 227	0,00062 – 0,5221	0,62 – 522
CO	200 - 2000	0,46 – 4,6	460 - 11500
CO <sub>2</sub>	-	yaklaşık 672 g/t.çimento	1,5456 milyon
TOK/UOB	1 - 60	0,0023 – 0,138	2,17 - 267
HF	0,009 – 1,0	0,021 – 2,3 g/t	0,21 - 23
HCl	0,02 – 20,0	0,046 – 46 g/t	0,046 – 46 g/t
PCDD/F	0,000012 – 0,27 Ng I-TEQ/Nm <sup>3</sup>	0,0276 – 627 ng/t	0,0000276 – 0,627 g/yıl
Metaller			
Civa	0 – 0,03	0 – 69 mg/t	0 – 1311 kg/yıl
∑ (Cd, Tl)	0 – 0,68	0 – 1564 mg/t	0 – 1564 kg/yıl
∑ (As, Sb, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	0 – 4,0	0 – 9200 mg/t	0 – 9200 kg/yıl

#### 1.2.4. Çimento sektöründe enerji kullanımı

Çimento üretimi, yüksek enerji (termal ve elektrik) ihtiyacı olan bir prosestir. Proseste, termal enerji en çok yanma esnasında kullanılırken; elektrik enerjisi ise en çok çimento öğütmede kullanılmaktadır (Rahman ve diğ., 2015). Üretim girdilerine ve proses işleyişine bağlı olarak, 1 ton klinker üretimi için 3000 MJ ile 6500 MJ'dan daha fazla termal enerji kullanılabilir (URL-9). Bu aşamada, kullanılan üretim teknikleri (kuru proses, yaş proses, yarı yaş proses, yarı kuru proses gibi) önem taşımaktadır (Rahman ve diğ., 2015). Örneğin, Amerika’da 1990’lı yıllarda kuru proses üretime geçilmesiyle birlikte, 1970’li yıllardaki enerji tüketimine oranla %25’lerde azalma sağlanmıştır. Tablo 1.8’de ise, fırın proseslerine göre, spesifik termal enerji tüketimindeki değişimler verilmektedir.

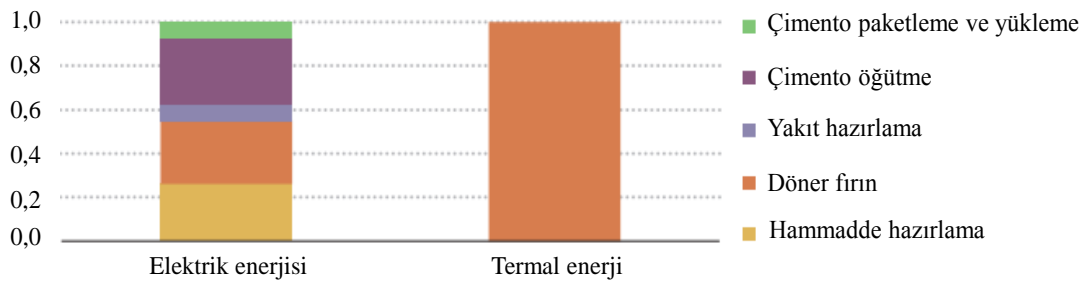
Günümüzde, klinker üretimi için mevcut en iyi teknik çok aşamalı ön ısıtıcı ve ön kalsinasyonlu kuru proses fırınlardır. Modern çimento fabrikalarında enerji tüketimi 3000 – 3300 MJ/t.klinker iken; ıslak proses fırınlarda bu değer 6000 MJ/t.klinker’e ulaşmaktadır (GTZ/Holcim, 2006).

Tablo 1.8. Klinker üretim prosesinde spesifik termal enerji tüketimi (Ali ve diğ., 2011)

Fırın prosesi	Termal enerji tüketimi (GJ/t.klinker)
Yaş proses	5,86 – 6,28
Uzun kuru proses	4,60
Bir aşamalı siklon ön ısıtıcı	4,18
İki aşamalı siklon ön ısıtıcı	3,77
Üç aşamalı siklon ön ısıtıcı	3,55
Dört aşamalı siklon ön ısıtıcı ve kalsinasyonlu	3,14
Beş aşamalı siklon ön ısıtıcı, kalsinasyonlu yüksek verimli soğutucu	3,01
Altı aşamalı siklon ön ısıtıcı, kalsinasyonlu yüksek verimli soğutucu	< 2,93

Tablo 1.8’den de görüldüğü gibi farklı aşamalı ön ısıtıcı sistemler, enerji tüketimini önemli miktarda azaltmaktadır. Klinkerin ön ısıtılmasında ise, çeşitli kaynaklardan edinilen atık ısılar kullanılmaktadır (Ali ve diğ., 2011). Literatürde yapılmış bir çalışmaya göre, kalsinasyonlu döner fırın kullanıldığında, enerji tüketimindeki düşüşün %8-11’e ulaştığı belirlenmiştir (Mikulcic ve diğ., 2016).

Çimento üretimi prosesinde enerji tüketimi, elektrik enerjisi açısından ele alındığında, elektrik enerjisinin en çok çimento (%38) ve klinker üretimi (%22) aşamalarında kullanıldığı dikkat çekmektedir (WBCSD, 2014). Hammaddelerin madenden çıkarılması aşaması toplam elektrik enerjisi tüketiminin %5’ini, hammadde öğütme aşaması %24’ünü, hammadde hazırlama aşaması %6’sını, nakliye-paketleme-yükleme aşaması ise %5’ini oluşturmaktadır (WBCSD, 2014). Şekil 1.12’de, çimento üretimi proseslerinin elektrik enerji ve termal enerji tüketimindeki payları gösterilmektedir.



Şekil 1.12. Çimento üretimi aşamalarının elektrik enerji ve termal enerji tüketimindeki payları

Termal enerjiye ek olarak, 1 ton çimentonun üretilmesi için büyük kısmı hammadde ve ürün değirmenleri, egzoz fanları ve konveyör bantlarında olmak üzere 80 kWh ile 130 kWh arası elektrik enerjisi kullanılmaktadır (URL-10). Modern bir çimento fabrikasında tipik elektrik enerjisi tüketimi 110 – 120 kWh/t.çimento'dur (Rahman ve diğ., 2015). Tablo 1.9'da, çimento üretimi aşamalarının elektrik enerjisi ihtiyacı, kuru ve yaş çimento prosesleri için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kuru prosesin, yaş proses ile karşılaştırıldığında daha verimli olduğu gözlenmektedir. Yaş proseste, nem içeriği olan yaş çimento harcının, neminin giderilmesi için ekstra enerji ihtiyacı olmaktadır. Kuru prosesler, yaş proseslere oranla, %13 daha az elektrik enerjisi ve %28 daha az yakıt tüketimine sahiptir (Ali ve diğ., 2011)

Tablo 1.9. Kuru ve yaş proseslerde spesifik elektrik enerjisi tüketimleri (Ali ve diğ., 2011)

Üretim aşaması	Elektrik enerjisi tüketimi (kWh/t)	
	Kuru sistem	Yaş sistem
<b>Hammadde hazırlama ve kırma</b>	4	3
<b>Harmanlama</b>	44	10
<b>Fan ve soğutucular</b>	23	25
<b>Toz toplayıcılar</b>	6	8
<b>Çimento değirmeni</b>	45	45
<b>Nakliye</b>	8	58
<b>Toplam elektrik ihtiyacı (kWh/t)</b>	130	149
<b>Fırınlarda yanan yakıt (lt/t)</b>	112,5	156

## 1.2.5. Çimento üretiminde alternatif hammadde ve yakıt kullanımı

### 1.2.5.1. Alternatif hammadde kullanımı

Alternatif yakıtlar çimento prosesinde sadece alternatif enerji kaynağı olarak değil, hammadde kaynağı olarak da kullanılmaktadır (Akkapeddi, 2008). Organik kısım yanarak proseste ihtiyaç duyulan enerjiyi üretmekte; mineral kısım ise proseste entegre olup hammadde olarak katkı sağlamaktadır (Caruso, 2006). Örneğin, yüksek silisyum içeriği (%78-90) nedeniyle pirinç çeltiği külleri; demir içeriği nedeniyle ise lastiklerin çelik bantları, alternatif hammadde olarak kullanılmaktadır (Akkapeddi, 2008). Tablo 1.10'da, çimento üretiminde alternatif hammadde olarak kullanılan atıklar, endüstriyel kaynakları ve ikame edildiği çimento temel hammaddeleri verilmektedir (GTZ/Holcim, 2006).

Tablo 1.10. Çimento üretiminde kullanılan alternatif hammaddeler ve kaynakları

Temel hammadde	Alternatif hammadde (atık)	Endüstriyel kaynak
<b>Kil minerali (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	Kaplama artıkları Alüminyum çamuru	Dökümhaneler Alüminyum endüstrisi
<b>Kalker (CaCO<sub>3</sub>)</b>	Endüstriyel kireç (atık kalker) Kireç çamuru	Nötrolizasyon prosesi Arıtma tesisi
<b>Silikatlar (SiO<sub>2</sub>)</b>	Dökümhane kumu Kirlenmiş toprak	Dökümhaneler Toprak remediasyonu
<b>Demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	Pirit külü Mekanik çamur Kırmızı çamur	Metal yüzey kaplama Metal endüstrisi Endüstriyel atıksu arıtımı
<b>Si-Al-Ca-Fe</b>	Uçucu kül Kırma kum	Yakma tesisi Dökümhaneler
<b>Sülfür</b>	Desülfürizasyon sonucu oluşan alçı taşı Kimyasal alçı taşı	Yakma Nötrolizasyon prosesi
<b>Klor</b>	CaF <sub>2</sub> (Kalsiyum florür) filtre çamuru	Alüminyum endüstrisi

#### 1.2.5.2. Alternatif yakıt kullanımı ve beraber yakma faaliyetleri

Bazı ülkelerde, çimento endüstrisi sektörü toplam enerji kullanımının %12-15'ini oluşturmaktadır (Ali ve diğ., 2011). Çimento fırınları, klinker üretimi için gerekli yüksek sıcaklığın sağlanmasında çok çeşitli enerji kaynakları kullanmaktadır. Bunlar arasında en yaygın olanları; kömür, fuel oil ve petrokoktur. Çimento üretiminde en sık kullanılan yakıtlar ve enerji içerikleri Tablo 1.11'de verilmiştir (Caruso, 2006).

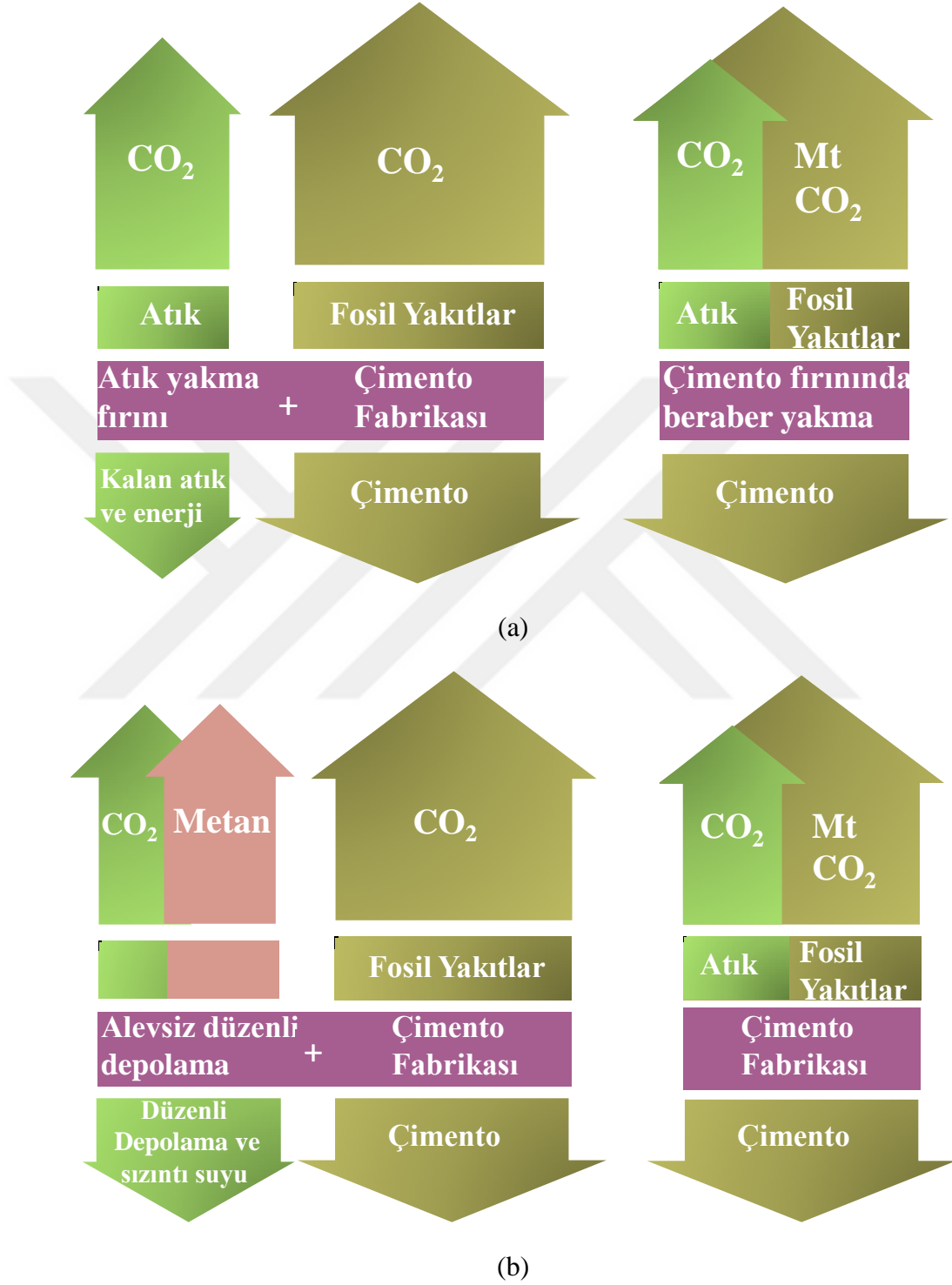
Tablo 1.11. Çimento üretiminde sıkça kullanılan yakıtların enerji içeriği ve CO<sub>2</sub> emisyon faktörleri

Yakıt	Enerji içeriği (MJ/kg)	CO <sub>2</sub> emisyon faktörü (kg/MJ)
Kömür	32	0,103
Fuel oil	40	0,077
Doğal gaz	36	0,056
Petrokok	34	0,073 – 0,095

Son yıllarda, doğal gaz ve alternatif yakıtlar çimento üretiminde kullanım alanı bulmaktadır ve bu yakıtların kullanımı çevre için olduğu kadar çimento üreticileri için de büyük önem taşımaktadır (Rahman ve diğ., 2015). Beraber yakma, atıkların üretim proseslerinde enerji ve/veya ürün geri kazanımı amacıyla kullanımı ve ikame yolu ile fosil yakıtların ve/veya hammaddelerin kullanımının azaltılması olarak tanımlanmaktadır (UNEP, 2011). Yüksek CO<sub>2</sub> salımına neden olan çimento üretimi, dünya çapında hızlı bir şekilde artmaya devam ettiğinden, CO<sub>2</sub> emisyonları da

gittikçe artmaktadır (Ali ve diğ., 2011; Galvez-Martos ve Schoenberger, 2014). Proseste, çok çeşitli alternatif yakıtlar kullanılmaktadır. Atık yağlar (yağlama yağları dahil), plastikler, ömrünü tamamlamış lastikler, arıtma çamurları, solventler, boya atıkları, atık kağıtlar, toksik olmayan metallerin katı atık bileşikleri, çimento fabrikalarında kullanılan alternatif yakıtlardandır (Rahman ve diğ., 2015; Lamas ve diğ., 2013). Kentsel katı atıklar (MSW), heterojen kompozisyonları nedeniyle kompleks ve çok değişken yakıtları oluşturmaktadır. Fiziksel ve kimyasal özellikleri eksiksiz bir şekilde belirlenememekle birlikte, bulunabilirliği ve ulaşılabilirliği sayesinde çimento üretiminde en çok tercih edilen alternatif yakıtlardandır (Rahman ve diğ., 2015). İşlenmemiş kentsel atıklar, yüksek nem içeriği, düşük kalorifik değer, çok farklı boyutlarda partiküller ve yüksek kül içeriğine sahiptir. Bu nedenle, işlenmemiş kentsel atıkların yakıt olarak kullanılması zordur. Kentsel katı atıklar, mekanik (MT) veya mekanik-biyolojik işlemlerle (MBT) ayrılarak, atıktan türetilmiş yakıt elde edilmektedir (Hasanbeigi ve diğ., 2012). Atıktan türetilmiş yakıt (ATY; refused derived fuel - RDF) ise kentsel katı atıkların homojen kısmını oluşturmakta ve yüksek kalorifik değeri, düşük nem içeriği, depolama ve taşıma esnasındaki kolaylığı ve daha az kirletici salımı nedeniyle, çimento üreticileri tarafından alternatif yakıt olarak tercih edilmektedir (Rahman ve diğ., 2015; Hasanbeigi ve diğ., 2012). Ayrıca gelişmiş ülkelerde, kentsel katı atıklar düzenli depolamayı azaltmak amacıyla da yakılarak bertaraf edilmektedir. Literatürde, atıkların atık yakma tesislerinde ve çimento fırınlarında beraber yakma işlemlerinin etkilerinin karşılaştırıldığı çok sayıda çalışma bulunmaktadır (CEMBUREAU, 1999; Vos ve diğ., 2007; CEMBUREAU, 2009; Helftewes ve diğ., 2012; Abuşoğlu ve diğ., 2017). Bu çalışmaların çoğunda, atıkların çimento fırınlarında yakılmasının daha avantajlı olduğu savunulmaktadır. CO<sub>2</sub> emisyonlarındaki azalmayı sağlamasına ek olarak, düzenli depolama alanlarını ve bu alanlardaki metan emisyonlarını azaltması beraber yakmanın avantajları arasındadır (Akkapedi, 2008; Hasanbeigi ve diğ., 2012). Düzenli depolama alanlarındaki emisyonların yaklaşık %60'ını, küresel ısınma potansiyeli CO<sub>2</sub>'in 21 katı olan, metan oluşturmaktadır. Şekil 1.13'de atıkların çimento fırınında birlikte işlenmesinin (co-processing), atık yakma tesisleri ve düzenli depolamaya oranla üstünlüğü grafik şeklinde gösterilmektedir. Çimento sanayiinde fosil yakıtlar yerine atık kullanılması mutlak emisyonları azaltmakla

birlikte (Şekil 1.13a), düzenli depolama alanındaki metan emisyonlarını da önlemektedir (Şekil 1.13b).



Şekil 1.13. Atıkların çimento fırınında beraber yakılmasının mutlak emisyonlar (a) ve düzenli depolama alanında metan oluşumu açısından (b) avantajları (CEMBUREAU, 2009'dan uyarlandı).

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

Atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamurun bertarafı önemli bir atık yönetimi problemi olarak değerlendirilmektedir (Chatziaras ve diğ., 2016). Çimento fabrikaları, arıtma çamurlarını kalorifik enerji potansiyellerinden dolayı bir alternatif yakıt kaynağı olarak kullanabilmektedir (Chatziaras ve diğ., 2016; Hasanbeigi ve diğ., 2012). Alternatif yakıt olarak kullanılan arıtma çamurlarının kalorifik değeri 16 - 17 MJ/kg'dur. Fakat arıtma çamurlarının kalorifik değerleri, atıksu karakteristiğine bağlı olarak değişim göstermektedir. Ayrıca, kuru proses ile çimento üretiminde arıtma çamurlarının, fırına verilmeden önce kurutulması gerektiğinden, bu prosesin maliyeti önem taşımaktadır. Kurutulmuş arıtma çamuru, pnömomatik veya mekanik olarak prosese verilmektedir. (Chatziaras ve diğ., 2016; Ariyaratne, 2009). Prosese verilen arıtma çamurunun besleme oranının, klinker üretim kapasitesinin %5'inden fazla olmaması önerilmektedir (Hasanbeigi ve diğ., 2012).

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

Kentsel katı atıkların yanması esnasında, toksinler ve ağır metaller oluşmakta ve bu maddeler kısmi olarak klinker yapısına katılmaktadır. Çimento fırınlarında kentsel

katı atık kullanma durumunda en büyük endişe, atıkların heterojen kompozisyonundan dolayı, değişen sıcaklık değerleri ve nem içeriğidir. Bu nedenlerden dolayı, çimento üretiminde kentsel katı atık ikame oranı en fazla %30 olabilmektedir (Rahman ve diğ., 2015; Hasanbeigi ve diğ., 2012). Farklı alternatif yakıtların, kalorifik değerleri, nem içerikleri, ulaşılabilirlikleri, emisyon salımları, klinker kalitesine etkileri ve maksimum ikame oranları ile ilgili bilgiler, Tablo 1.12’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Rahman ve diğ., 2015).

Tablo 1.12. Farklı alternatif yakıtların karşılaştırması (Rahman ve diğ., 2015)

Kriter	Alternatif yakıtlar					
	ÖTL	MSW	DS	Biyokütle	Plastik atık	Atık yağ
<b>Kalorifik Değer (MJ/kg)</b>	35,6	15,4	15,28	14-21	29-40	43-45
<b>Nem içeriği</b>	0,62	31,2	Değişken	6-12	Değişken	<3
<b>Ulaşılabilirlik</b>	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta
<b>NOx emisyonu</b>	Değişmez	Azalır	Azalır	Azalır	Değişmez	Azalır
<b>CO2 emisyonu</b>	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır
<b>SO2 emisyonu</b>	Artar	Artar	Artar	Azalır	Azalır	Belirlenmedi
<b>Ağır metal emisyonu</b>	Azalır	Artar	Değişmez	Azalır	Artar	Azalır
<b>Maksimum ikame oranı</b>	%30	%30	%5	%20	Belirlenmedi	Belirlenmedi
<b>Depolama ihtiyacı</b>	Orta	Orta	Yüksek	Düşük	Orta	Orta
<b>Klinker kalitesine etkisi</b>	Değişmez	Düşük	Düşük	Belirlenmedi	Orta	Düşük
<b>Kurulum maliyeti</b>	Düşük	Yüksek	Yüksek	Düşük	Orta	Düşük

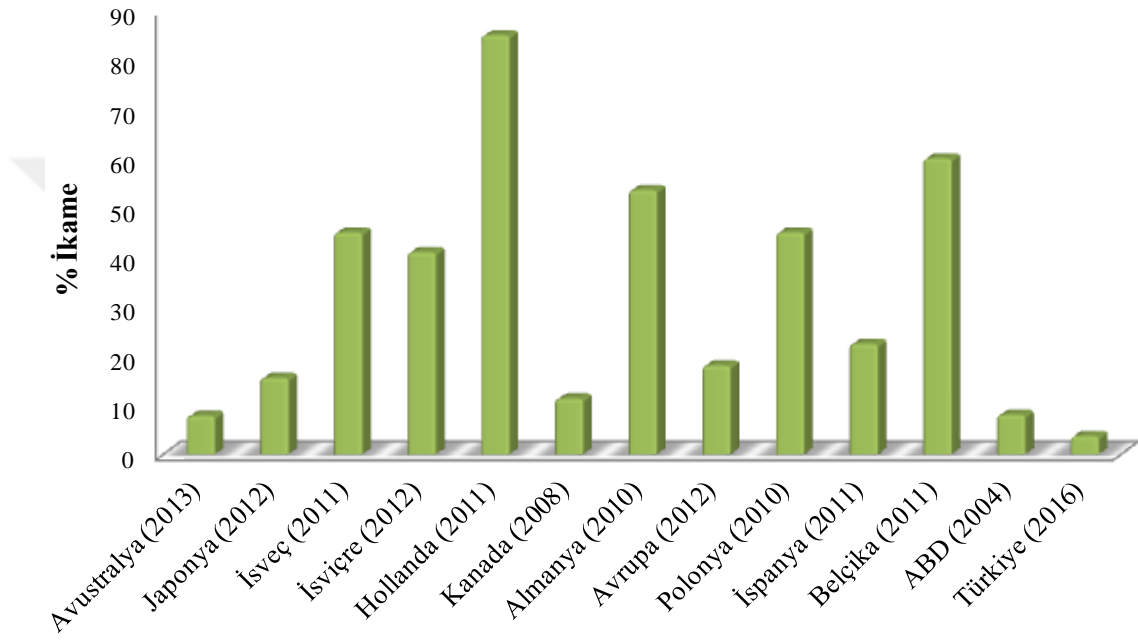
ÖTL: Ömrünü tamamlamış lastik  
MSW: Kentsel katı atık  
DS: Kurutulmuş arıtma çamuru

Çimento üretiminde kullanılacak alternatif yakıtlar için belirlenmiş kriterler genel olarak; yakıtın fiziksel durumu (katı, sıvı, gaz), zehirlilik (organik bileşikler, ağır metaller), kül kompozisyonu ve içeriği ve uçucu içeriği, kalorifik değeri (14 MJ/kg’dan büyük), klor içeriği (<%0,2) ve kükürt içeriği (<%2,5), PCB içeriği(<50ppm), ağır metal içeriği, fiziksel özellikleri (yoğunluk ve homojenlik gibi), nem içeriği, dozaj teknolojisi, kirletici salımları, çimento kalitesi, ekonomik tutarlılığı ve ulaşılabilirliği olarak tanımlanabilir (Rahman ve diğ., 2015; Lamas ve diğ., 2013).

Alternatif yakıt kullanımı ayrıca, hem çimento üretimini nedeniyle oluşan emisyonların azalmasını ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının korunmasını da sağladığı için büyük önem taşımaktadır. Dünyada çimento sektöründe atık yakma faaliyetlerine 1980’li yıllarda (Chatziaras ve diğ., 2016), Türkiye’de ise 2004 yılında



başlanmıştır (Bulut, 2017). Alternatif yakıtların, fosil yakıt yerine ikame oranı ülkeden ülkeye değişmekle birlikte; Avrupa ülkelerinin çoğu, dünyadaki diğer ülkelerden epey öndedir. Özellikle Hollanda, bu anlamda dünya lideri konumundadır (Şekil 1.14). 2015 yılı verilerine göre Türkiye’de beraber yakma lisansına sahip 35 tesis bulunmakta; alternatif yakıt ikame oranı ise %3,8 olarak belirtilmektedir (Bulut, 2017). Çeşitli ülkelerdeki ikame oranları Şekil 1.14’de verilmektedir (Rahman ve diğ., 2015).



Şekil 1.14. Farklı ülkelerde çimento üretiminde alternatif yakıt kullanımları (Rahman ve diğ. 2015’den uyarlandı. Türkiye verisi Bulut, 2017’den alındı)

### 1.3. Konu ile İlgili Çalışmalar

Çimentonun yaşam döngüsü değerlendirmesinin yapılması, çimento üretim prosesine bağlı olarak oluşabilecek çevresel etkilerin tanımlanabilmesi, etkilerin boyutlarının belirlenebilmesi ve buna bağlı olarak alternatif teknolojilerin geliştirilmesi ve tercih edilmesi açısından önem taşımaktadır. Literatürde, çimento ve klinker üretiminin yaşam döngüsü değerlendirmesi ile ilgili yapılmış çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalardan bazıları, tipik çimento üretiminin çevresel boyutlarını, bazıları mevcut üretim hatlarının iptal edilerek tamamen yeni üretim hatları ile üretimin gerçekleştirildiği durumları ve bunların karşılaştırmasını; bazıları, mevcut üretim hatları üzerinde değişikliğe gidilerek yapılan iyileştirmelerin ortaya konmasını, bazıları ise alternatif hammadde ve yakıt kullanımının ürün ve çevresel etkilerini

araştırmıştır. Bu çalışmaların bir kısmında çevresel etkiler, küresel ısınma ve iklim değişikliği çerçevesinde, bir kısmında enerji verimliliği çerçevesinde, bir kısmında ise daha geniş ve yaşam döngüsü etki değerlendirme çalışmalarının bir gereği olan havaya, suya, toprağa ve insana olan etkiler gibi (asidifikasyon, ötrofikasyon, arazi kullanımı, iyonize radyasyon, insan toksisitesi, çevresel ekotoksosite, solunabilir organikler ve inorganikler, kanserojen ve kanserojen olmayanlar) geniş bir çerçevede değerlendirilmiştir.

Valderrama ve diğerleri (2012), temel faaliyet alanı çimento üretimi olan bir fabrikada gerçekleştirmiş oldukları yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmasında, eski çimento üretim hatlarının iptal edilerek yeni çimento üretim hattı ile değiştirilmesi üzerine, eski ve yeni üretim hattına bağlı olarak oluşan çevresel etkileri (küresel ısınma, asidifikasyon, ötrofikasyon, abiyotik tüketim, ozon tabakası incelmeleri, temiz su ekotoksitesitesi ve fotokimyasal oksidasyon) karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Yaşam döngüsü değerlendirme çalışmasının kapsamında, “beşikten kapıya” yaklaşımı; fonksiyonel birim olarak ise 1 kg klinker üretimi baz alınmıştır. Envanter analizi ve etki değerlendirme, SimaPro 7.2 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İklim değişikliği etkisi IPCC, 2001; asidifikasyon, ötrofikasyon, ozon tabakasının incelmeleri gibi orta nokta etkileri ise CML 2000 etki değerlendirme metodu kullanılarak belirlenmiştir. Son olarak, zarar odaklı metotlardan biri olan Eco-indicator 99 etki değerlendirme metodu kullanılarak, fabrikada gerçekleştirilen çimento üretiminin insan sağlığı, ekosistem zehirliliği ve kaynak kullanımı üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda; küresel ısınma, asidifikasyon ve ötrofikasyon etkilerinin, yeni üretim hattının kurulması ile beraber, sırasıyla; %5, %15 ve %17 azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada, yeni üretim hattının %13 enerji tasarrufu sağladığı doğrulanmıştır. Eco-indicator 99 etki değerlendirme metodu sonuçlarına göre ise, yeni üretim hattının kaynaklara, ekosistem kalitesine ve insan sağlığına olan zararı sırasıyla; %14, %11 ve %11 azalttığı belirlenmiştir

Chen ve diğerleri (2010) tarafından yapılmış olan bir çalışmada ise, yaşam döngüsü etki değerlendirme metodu kullanılarak, çimento üretiminin ve farklı çimento fabrikaları arasındaki değişimlerinin çevresel etkileri belirlenmiştir. Çalışmada, fonksiyonel birim olarak 1 kg tipik Portland çimentosu (CEM I) baz alınmıştır. Çevresel etkileri belirlenecek olan üretim sistemi, yaşam döngüsü değerlendirmesi

kapsamında, üç temel prosese ayrılmıştır: Ham madde hazırlanması ve ekstraksiyonu (S1), klinker üretimi (S2) ve çimento üretimi (S3). Abiyotik tükenme, küresel ısınma, ozon tabakasının incilmesi, insan toksisitesi, ekotoksisite (temiz su, deniz suyu, karasal), fotokimyasal oksidasyon, asidifikasyon ve ötrofikasyon gibi çevresel etkiler, üç üretim aşaması için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Etki değerlendirme, problem odaklı metotlardan biri olan CML01 metodu kullanılarak, SimaPro yazılımında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, klinker üretimi aşamasının, en yüksek çevresel etkiye sahip olduğu; çimento son üretimi ve ham madde hazırlanması aşamalarının ise klinker üretimi ile kıyaslandığında, çok büyük bir çevresel etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. Klinker üretim aşaması ayrıntılı olarak incelendiğinde ise, birincil yakıt üretimi ve fırın emisyonlarının çevre üzerinde önemli olumsuz etkilerinin olduğu belirlenmiştir. Üretim prosesleri ve bunlara bağlı olarak ortaya çıkan etki kategorileri arasındaki ilişki incelendiğinde, abiyotik tükenmenin yakıt üretimi tarafından kontrol edildiği; küresel ısınma ve asidifikasyon gibi etkilerin ise temel olarak çimento fırınından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Son olarak, deniz ortamı ekotoksisitesi gibi etkilerin ise yakıt üretimi (%57), çimento fırını (%20) ve çimento hazırlanması (%13) aşamalarına bağlı olarak oluştuğu belirlenmiştir. Bunların dışındaki etki kategorilerinin ise ulaşım ve hammadde üretimine bağlı olarak oluşabildiği belirtilmiştir

Huntzinger ve Eatmon (2009) ise yapmış oldukları çalışmada, Portland çimentosu üretiminde, geleneksel ve alternatif üretim teknolojilerine bağlı olarak ortaya çıkabilecek çevresel etkileri yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi ile belirlemeye çalışmışlardır. Çalışma kapsamında, dört farklı çimento üretim prosesi değerlendirmeye alınmıştır: (1) geleneksel Portland çimento üretimi, (2) katkılı çimento üretimi (doğal puzzolanlar), (3) Atık çimento fırın tozunun tamamının çimento fırını prosesinde geri dönüştürülmesi ile oluşan çimento ve (4) CO<sub>2</sub> emisyonları ile ilgili proseslerin ayrı tutulduğu Portland çimentosu üretimi. Çalışmada, yaşam döngüsü değerlendirmesi, belirsizlikleri azaltmak amacıyla “beşikten kapıya” yaklaşımıyla gerçekleştirilmiş ve SimaPro 6.0 yazılımı kullanılmıştır. Etki kategorileri olarak sera etkisi, asidifikasyon, ötrofikasyon, ağır metaller, kanserojenler, kış smogu, yaz smogu ve enerji kaynakları seçilirken; etki değerlendirme metodu olarak Eco-indicator 95 kullanılmıştır. Çalışmanın en önemli

sonuçlarından biri, çimento üretim prosesi içinde klinker üretimi aşamasının, enerji kullanımı ve emisyon salınımı açısından en yoğun aşama olduğudur. Dört farklı proses karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, katkı çimento üretiminin gerçekleştirildiği alternatif metodun (2), diğer üç metoda oranla, küresel ısınma potansiyelinin en düşük metot olduğu belirlenmiştir. Çimento fırın tozunun geri dönüştürüldüğü metot (3) ise, geleneksel metot (1) ile karşılaştırıldığında, katkı çimento üretiminin (2), karbon emisyonlarının azaltılmasında sifıra yakın bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır.

Çimentonun yaşam döngüsü değerlendirmesi üzerine yapılmış çalışmalardan biri de, How tarafından 2007'de Malezya'da gerçekleştirilen çalışmadır. Bu çalışmada, alternatif yakıt ve çimento türlerine bağlı olarak karşılaştırmalı yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, literatürde benzer konularda yapılmış çalışmalar ile uyumlu olarak (Chen ve diğ., 2010; Huntzinger ve Eatmon, 2009), çimento üretim süreci içerisinde klinker üretimi aşamasının, çevre üzerinde en yüksek olumsuz etkiye sahip aşama olduğu belirlenmiştir. Var olan katı yakıtlı (kömür) sistemin, sıvı yakıt ve gaz yakıt alternatifleri ile karşılaştırıldığında, mevcut yakıtın en düşük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Çalışma kapsamında, diğer bir alternatif olarak çimento içindeki klinker yüzdesinin azaltılması seçilmiştir ve bu durumun beklenen sonucu olarak, düşük klinker yüzdesinin, çevreye olan olumsuz etkiyi azalttığı belirlenmiştir.

Li ve diğ. (2016), Beijing'de tipik bir çimento fabrikasında yüksek fırın cürufu içeren Portland çimentosunun çevresel etkilerini ISO 14040/14044 kapsamında analiz etmişlerdir. Çimento üretim prosesi, madencilik faaliyetleri, yüksek fırın cürufu üretim prosesi ve nakliye prosesi çalışma kapsamına alınmıştır. YDD aracı olarak SimaPro yazılımı; etki değerlendirme metodu olarak da CML metodu kullanılmıştır. Ayrıca, kaynak tüketimi, nakliye mesafesi, tahsisat metotları ve yaşam döngüsü etki değerlendirme modelinin duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiş ve tartışılmıştır. Sonuçlar, küresel ısınma ve asidifikasyon potansiyelinin en önemli çevresel etkiler olduğunu göstermiştir (toplam etkinin sırasıyla; %58,5 ve %21,7'si). Duyarlılık analizleri, yüksek fırın cürufu çimentonun toplam çevresel etkilerinin, tahsisat metodu ve etki değerlendirme modeline olduğu kadar, kalker ve enerji tüketimine de duyarlı olduğunu; fakat yüksek fırın cürufu tüketimine ve nakliye mesafesine duyarlı

olmadığını göstermiştir. Geleneksel Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında, insan toksisitesindeki %9'luk artış dışında, diğer etkilerde cüruflu çimentonun çevresel etkileri ciddi oranda azalmıştır. Özellikle, biyolojik olmayan zarar potansiyeli (abiotic depletion potential) ve arazi kullanımı sırasıyla %72 ve %41 azalmıştır. Çalışma kapsamında, yüksek fırın cüruflu çimentonun elektrik tüketimini hafif oranda artırdığı; buna karşılık arazi kullanımı ve kaynakların korunmasını olumlu etkilediği ve çimentonun toplam çevresel etkisini ise ciddi oranda azalttığı sonucuna varılmıştır.

Zhang ve Mabee (2016), çimento üretiminde düşük karbonlu yakıtlarının kullanılmasının sera gazı emisyonlarına etkisini karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Çalışma kapsamı “beşikten kapıya”, fonksiyonel birim ise 1 ton klinker olarak seçilmiştir. Çalışmada kullanılan model, klinker üretimi (fırın prosesi, hammadde ve yakıtların üretimi ve nakliyesi) ve elektrik üretimi ile ilgili tüm sera gazı emisyon kaynaklarını içermektedir. Bu kapsamda, 4 farklı düşük karbonlu yakıt araştırılmıştır: inşaat/yıkım ahşap atıkları, asfalt kiremit, demiryolu bağlantıları ve plastikler. Çalışma sonucunda, yakıt olarak %99 petrokok ve %1 kömür kullanılması durumunda, 1 ton klinker üretimine bağlı 971,4 kg CO<sub>2</sub>-eşdeğeri oluşumuna neden olduğu; ve bu rakamın 388,6 kg CO<sub>2</sub>-eşd'nin fosil yakıt yanmasına bağlı olduğu belirlenmiştir. Fosil yakıt %100 oranında inşaat/yıkım ahşap atıkları (tüm karbon biyojenik kaynaklardan geldiği için) ile ikame edildiğinde, CO<sub>2</sub> emisyonunun 582,6 kg CO<sub>2</sub>-eşdeğeri olduğu belirlenmiştir.

Valderrama ve diğ. (2013), arıtma çamurlarının klinker üretiminde alternatif hammadde ve yakıt olarak kullanılmasının etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, fonksiyonel birimi 1 ton klinker ve çalışma kapsamını “beşikten kapıya” olarak seçmişlerdir. Çimento fabrikasının sınırlamalarına göre, yakıt (petrokok) ve hammadde (kalker) ikame oranı %5 ile %15 arasında sabitlenmiştir. Etki değerlendirme metodu olarak, IPCC, CML 200 ve CExD metotları seçilmiştir. İki senaryo da, ikame olduğu durumlarda, ikame olmadığı durumlara göre CO<sub>2</sub> emisyonlarında azalma olduğunu göstermiştir. Hammadde ikamesi durumunda 1 ton klinker üretimi nedeniyle oluşan karbondioksit emisyonu 904 kg CO<sub>2</sub>-eşd, yakıt ikamesi durumunda 898 kg CO<sub>2</sub>-eşd. olarak bulunmuştur. İkame olmaması durumunda ise bu değer 906 kg CO<sub>2</sub>-eşd. olarak belirlenmiştir. Yakıt ikamesi ile

hammadde ikamesi durumları karşılaştırıldığında ise, yakıt ikamesi durumunun dikkate değer çevresel gelişme sağladığı belirlenmiştir. Çevresel etkiler, son nokta etkileri temelinde değerlendirildiğinde ise, yakıt ikamesi senaryosunun insan sağlığı, ekosistem ve kaynaklar üzerindeki etkileri sırasıyla; %2.6, %4.4 ve %8.1 azalttığı tespit edilmiştir.

Stafford ve diğ. (2016a), fosil yakıtlara ek olarak alternatif yakıtları (ömrünü tamamlamış lastikler ve atıktan türetilmiş yakıt) da kullanan bir çimento fabrikasında, çimento üretiminin yaşam döngüsü değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Fonksiyonel birim olarak 1 ton Portland çimentosu; çalışma kapsamı olarak “beşikten kapıya” seçilmiştir. YDD yazılımı olarak SimaPro kullanılmış ve etki değerlendirme metodu olarak CML tercih edilmiştir. Abiyotik yok olma, asidifikasyon, ötrofikasyon, fotokimyasal oksidant oluşumu ve küresel ısınma etki kategorileri üzerinde çalışılmıştır. Bir ton çimento üretimine bağlı olarak 632 kg CO<sub>2</sub>-eşd. oluştuğu tespit edilmiştir. Toplam asidifikasyon potansiyeli etkisinin yaklaşık %48’inin fırın emisyonlarından kaynaklandığı; asidifikasyon potansiyelinin ise SO<sub>2</sub> emisyonları ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Bu durum, alternatif yakıt olarak kullanılan ömrünü tamamlamış lastiklerin (içinde yer aldıkları vulkanizasyon prosesi nedeniyle), ek bir sülfür kaynağı olması ile açıklanmıştır. Fosil yakıt üretiminin asidifikasyon ve ötrofikasyon potansiyelini önemli oranda etkilediği; ayrıca elektrik tüketiminin de (üretiminde fosil yakıtlar kullanılması nedeniyle) asidifikasyon potansiyeli üzerinde önemli etkisi olduğu belirtilmiştir. Stafford ve diğ. (2016b) bir başka çalışmada ise Brezilya’da çimento üretiminin yaşam döngüsü değerlendirmesini gerçekleştirmiştir. Fonksiyonel birimin 1 ton portland çimentosu olarak seçildiği çalışmada, etki değerlendirme metodu olarak ReCiPe tercih edilmiştir. Çalışma sonucunda, dikkat çekici bir şekilde nakliye aşaması, iklim değişikliği de dahil, tüm etki kategorilerine en çok katkısı olan aşama olarak belirlenmiştir. Bu durum, Brezilya’da ulaşımın çoğunlukla karayolu ile yapıldığı şeklinde açıklanmıştır. Ulaşım işlemlerinin %95’i kamyonlar ile yapıldığı ve mesafenin 25 km’den 1000 km’nin üzerine kadar çıktığı belirtilmiştir.

Hossain ve diğ. (2017), çimento endüstrisinde atık kullanımının yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, Hong Kong’da üretilen farklı çimento tiplerinin küresel ısınma potansiyelleri ve enerji tüketimi etkileri

kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamı, “beşikten kapiya” olarak belirlenmiş; fonksiyonel birim ise farklı dayanımlardaki 1 ton çimento olarak seçilmiştir. Etki değerlendirme metodu olarak ise IMPACT 2002+ kullanılmıştır. YDD sonuçları, hammadde kullanımı ve fosil yakıtların yanması nedeniyle, Portland çimentosu üretiminin önemli çevresel etkiye sahip olduğunu göstermiştir (1 ton portland çimentosu için 5732 MJ enerji tüketimi ve 980 kg CO<sub>2</sub>-eşd. emisyonu). Uçucu kül gibi alternatif malzemelerin kullanımının, olumsuz çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olduğu; bu nedenle çimento üretimi ile ilişkili olarak önemli etki azaltımlarına, cam tozu, biyo-yakıt gibi farklı stratejiler ile ulaşılabileceği belirtilmiştir. Kömür yerine farklı oranlarda (%10’dan %50’ye kadar) biyo-yakıt kullanılması halinde ise, 1 ton çimento üretimine bağlı oluşan sera gazı emisyonu 953 kg CO<sub>2</sub>-eşd.’den 847 kg CO<sub>2</sub>-eşd.’ne kadar azalmıştır. Çalışmada, çimento üretiminde atık ikamesi ile sera gazı emisyonlarının yaklaşık %12; enerji tüketiminin ise %15 oranında azaltılabileceği sonucuna varılmıştır. ECO-GC-1 olarak adlandırılan çimento tipini üretmek için, cam kırıkları kullanımının 20 kg CO<sub>2</sub>-eşd./t.GHG emisyonu ve 108 MJ/t.enerji tüketimi azalmasını sağladığı belirlenmiştir (temel senaryoya göre).

Brown ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışma, yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarının sağlık temelinde gerçekleştirilmesi ve yorumlanması açısından önem taşımaktadır. Bahsedilen çalışmada Çin ve Kanada’da çimentonun yaşam döngüsü karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Etki değerlendirme metodu olarak Eco-indicator 99’u kullandıkları çalışmalarında, 1 ton Portland çimentosu üretimi nedeniyle oluşan zarar, “işlev kaybına uyarlanmış yaşam yılı (Disability-adjusted life years – DALY)” birimi cinsinden ölçülerek değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, Çin’deki değer 14,2 DALY; Kanada’da ise 7,02 DALY bulunmuştur. Bu yüksekliğin, Çin’deki partikül madde konsantrasyonları ile ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Garcia-Gusano ve diğ. (2015b), İspanyol çimento üretiminin yaşam döngüsü değerlendirmesini mevcut durum ve karbon tutma teknolojisi kullanılması durumu için karşılaştırmalı olarak detaylı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında 3 farklı senaryo seçilmiştir: 2010-temel senaryo; 2030-temel senaryo ve 2030-PCC (yakımdan sonra karbon tutumu). Çimento üretimi emisyonu yoğun bir

sektör olduğundan, PCC birimi çok yüksek miktarda baca gazlarını filtrelemektedir ve solvent rejenerasyonunda yüksek miktarda enerji tüketilmektedir. Bu nedenle çalışmada, çimento üretimi ve karbon tutma teknolojisi için kullanılacak elektriği üretecek kombine ısı ve enerji üretim tesisi (CHP) de dikkate alınmıştır. Çalışmada, karbon tutma teknolojisinde absorbent olarak monoetanolamin kullanıldığı belirtilmiştir. 2010-temel senaryo ve 2030-temel senaryo karşılaştırıldığında; en düşük azalmanın küresel ısınma etki kategorisinde (%21,6) ve en yüksek azalmanın ise iyonize radyasyon (%93,7) etki kategorisinde olduğu belirlenmiştir. 2030-PCC senaryosu ise, küresel ısınma (%15), ozon tükenmesi (%27) ve abiyotik tükenmeyi (%11) azaltırken; diğer etkilerde artışa sebep olmuştur. Özellikle, insan toksisitesi (kanserojen olmayan), 2030-temel senaryoya göre 53 kat artmıştır. Bu durumun nedeni, enerji tüketimindeki fazlalık ile ilişkilendirilmiş ve bu konuda daha fazla çalışma yapılması önerilmiştir.

Abuşoğlu ve diğ. (2017) tarafından Türkiye’de gerçekleştirilmiş bir çalışmada ise, çürütülmüş çamurun yakma (akışkan yataklı) tesisinde yakılarak ve çimento üretiminde (varsayımsal) kullanılarak bertarafı durumunda çevresel etkileri, yaşam döngüsü yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Bu 2 senaryonun karşılaştırması, karakterizasyon aşamasında 15 farklı etki kategorisi temelinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, akışkan yataklı yakma tesisinde çamurun yakılmasının çevresel performansının, çoğu etki kategorisi için (küresel ısınma, solunabilir organik ve inorganikler, sucul ve karasal ekotoksiste, karasal asidifikasyon/nütrifikasyon, arazi kullanımı ve maden çıkarma) daha iyi olduğunu göstermiştir. İnsan sağlığı kategorisinde ise, çimento üretiminde kullanılmasının, yakma tesisinde yakılmasına oranla daha olumlu olduğu belirtilmiştir. Bu durumun nedeni, çimento fırınında yanma sonrası kalan malzemenin çimentonun bünyesine katılarak ürün olarak değerlendirildiği; yakma tesisinde ise bu atık malzemenin düzenli depolamaya gönderildiği şeklinde açıklanmıştır.

Liu ve diğ. (2014), Çin çimento endüstrisinde evsel atıkların kullanımından kaynaklanan çevresel etkileri analiz etmişlerdir. Ayrıca, evsel atıkların bertarafı için, düzenli depolama, yakma, çimento üretiminde değerlendirme gibi 5 farklı senaryo oluşturularak her biri için yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, düzenli depolamanın yakmaya oranla daha az emisyon



oluşturduğu; fakat yakmanın arazi kullanımı, toprak, yer altı suyu ve insan sağlığı açısından olumsuz etkilerinin daha az olduğu belirlenmiştir. Çimento fırınında değerlendirme senaryosunun, abiyotik kaynak tükennesi, arazi kullanımı ve insan toksisitesi etkilerini önemli ölçüde azalttığı; buna karşılık, sera gazı ve asidifikasyon gazı emisyonlarını, atık ön-işleminden kaynaklanan ekstra enerji tüketimi nedeniyle arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Sonuçlar geniş kapsamda değerlendirildiğinde ise, atıkları imento fırınında değerlendirmenin, sürdürülebilir gelişmeyi sağlamak için verimli bir teknik olduğu belirtilmiştir.



## **2. MALZEME VE YÖNTEM**

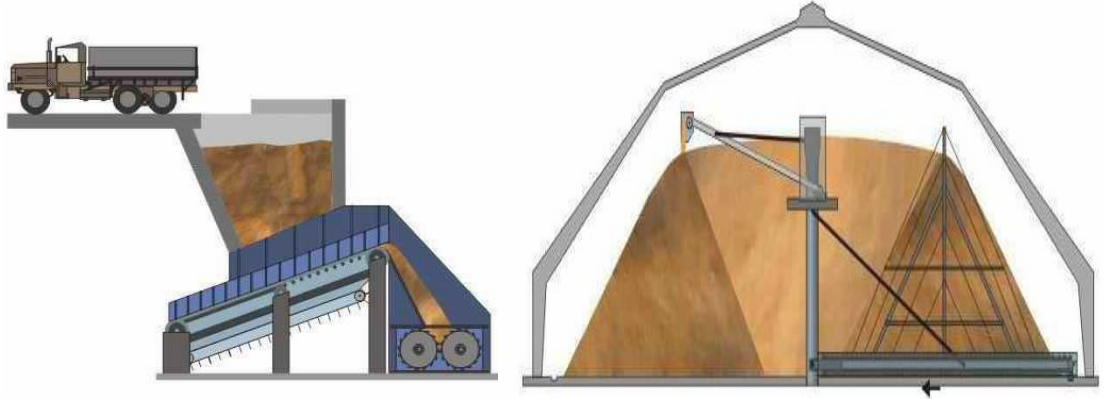
### **2.1. Kuruluşa ait Çimento Üretim Prosesi**

Çalışma kapsamında seçilen tesis, 4.000.000 milyon t/yıl üretim kapasitesi ve pre-kalsinasyon ön ısıtıcılı kuru sistem teknolojili üç adet döner fırın ile Türkiye ve Avrupa'nın en yüksek üretim kapasitesine sahip tesisi konumundadır. Tesis, Türkiye çimento sektörü toplam ihracatının yaklaşık %10'unu gerçekleştirmektedir (Nuh Çimento, 2017). İki adet kalker ve bir adet marn ocağına sahip bir entegre çimento fabrikasıdır. Fabrikada gerçekleştirilen çimento üretimi temel olarak beş aşamadan oluşmaktadır: Hammadde hazırlama, farin öğütme, klinker üretimi, çimento üretimi ve paketleme.

#### **2.1.1. Hammadde hazırlama**

Hammadde ocaklarında, açık ocak işletmeciliğiyle çıkartılan 0-1000 mm aralığında boyuta sahip hammaddeler kırıcıdan geçirilerek, 0-30 mm boyutlarına düşürülmektedir. Burada amaç, boyut küçültmenin ilk aşamasını gerçekleştirmek, sevkiyat kolaylığı sağlamak ve homojene stok hollerinde stabil üretim için gerekli olan homojenliği yüksek karışımlar elde edebilmektir. Hammaddenin kırıcıya getirilmesi ve homojene stokholleri görünümü Şekil 2.1'de verilmiştir.

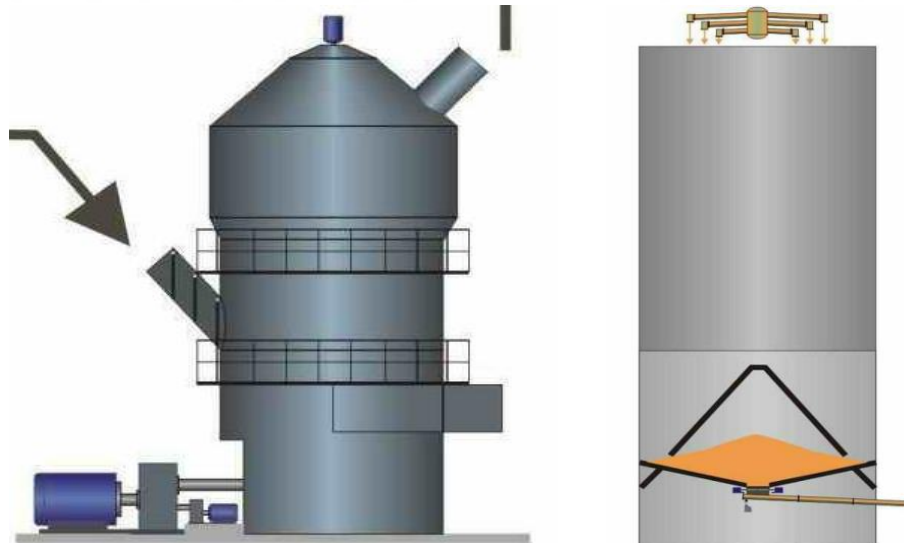
Tesiste iki adet 1500 t/saat hammadde kırma kapasiteli, bir adet 400 t/saat yardımcı malzeme kırma kapasiteli toplam üç adet kırıcı bulunmaktadır. Günlük kırıcıdan geçen malzeme hareketi yaklaşık 20.000 tondur.



Şekil 2.1. Hammaddenin kırıcıya getirilmesi ve homojene stok holleri

### 2.1.2 Farin öğütme

Çimentodan istenen özelliklerin sağlanabilmesi için fiziksel ve kimyasal olarak istenilen değer aralığına sahip olması gerekmektedir. Kırıcılardan geçen malzeme, farin değirmenlerine gelerek mikron seviyesinde küçültülür ve farin silolarına alınarak burada depolanır (Şekil 2.2). Homojen stok hollerinden alınan hammaddeler değirmende öğütülerek farin haline getirilir. Çimento hammaddelerinin dikkatle orantılanmış bir karışımı olan farinin ana bileşenleri kireç ve silistir.

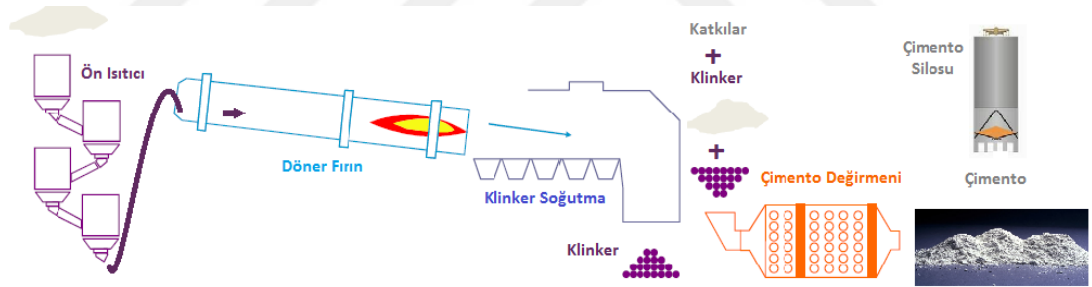


Şekil 2.2. Farin değirmeni ve farin silosu

### 2.1.3. Klinker üretimi

Farin olarak tanımlanan kimyasal ve fiziksel özellikler bazında istenilen standarttaki hammadde, yarı mamul üretim grubunda pişirilerek klinker olarak isimlendirilen yarı mamul oluşur. İşletmede 3 adet klinker üretim hattı bulunmaktadır. Prekalsinasyon ön ısıtıcı kuru sistem olarak adlandırılan döner fırınların toplam üretim kapasitesi 4.000.000 t/yıl'dır.

Fırın içerisinde yakıtın yanması için; yakıtın yanı sıra oksijen ve ortam sıcaklığına ihtiyaç vardır. Yakıtın tutuşması için asgari 550 °C sıcaklığa ihtiyaç vardır. Yanmanın devamlılığı ve tam yanma (verimli yanma) sağlanabilmesi için daha yüksek sıcaklıkta bir ortam ve oksijen ihtiyacı vardır. Fırından çıkan 1100-1200 °C sıcaklığındaki klinker soğutmaya düşer, atmosferden alınan soğuk hava fanlar vasıtasıyla soğutmaya aktarılır. Burada meydana gelen ısı transferi ile klinker ısısını havaya vererek soğur, hava ise klinkerden aldığı ısıyla sıcaklığı yükselir (Şekil 2.3). Isınan hava aynı zamanda yanma havası olarak da kullanılacaktır.



Şekil 2.3. Fabrikada klinker üretimi, klinker soğutma ve çimento üretimi

Hammadde ocaklarında bulunan kömür stok alanından alınan kömürler karayoluyla kömür besleme alanlarına getirilir. Buradan bantlar yardımıyla kömür değirmenlerine gelen kömür öğütülerek mikron seviyesinde küçültülür. Kömürün tam ve verimli yanması için yanma yüzey alanına ihtiyaç vardır. Bu nedenle daha önce bahsedilen farin değirmenlerine benzer modellemede 5 adet dik kömür değirmeni mevcuttur. Bu kömür değirmenleri, 3 adet döner fırına öğütülmüş kömür beslemektedir.

### 2.1.4. Çimento üretimi

Fırınlarda elde edilen klinker, alçı taşı ve katkı malzemesi; belirli oranlarda çimento değirmenine şarj edilerek öğütülür. İşletmede 4 adet çimento değirmeni mevcuttur.

Çimento değirmenleri, farin, kömür ve tras değirmenlerinden farklı olarak; yatay, tüp şeklinde bilyeli değirmenlerdir.

İşletmede üretimi gerçekleştirilen çimento türleri şunlardır: CEM I, CEM II CEM IV ve Petrol Kuyusu Çimentosu (PKÇ).

### **2.1.5. Paketleme**

Çimento silolarında depolanan ürün, dökme veya torbalı çimento olmak üzere iki farklı yöntemle satışa sunulmaktadır. Altı adet 100 t/saat kapasiteli kantarlarda 50'şer kg'lık torbalara doldurularak torbalı çimento; yine 100 t/saat deşarj kapasiteli altı adet ve 150 t/saat kapasiteli dört adet dökme hattıyla da dökme çimento adı altında satışa sunulmaktadır.

### **2.1.6. Sürdürülebilirlik faaliyetleri**

Enerji ve yakıt tüketiminin yoğun olduğu bir sektör olan çimento üretim sektöründe, sürdürülebilirlik çalışmaları büyük önem taşımaktadır. İşletmede, sürdürülebilir üretim çamur kurutma tesisi, atık ısı geri kazanım tesisi (18 MW/saat kapasitede) ve atıktan türetilmiş yakıt (ATY) besleme tesisi (5 t/saat kapasitede) ile gerçekleştirilmektedir.

Enerji geri kazanımı ve çimento sektörüne entegre yapısıyla Türkiye' de bir ilk olan çamur kurutma tesisi günlük 250 ton yaş çamur kabulü ve 54 ton granül ikincil yakıt çıkışıyla çalışmaktadır. Proses genel olarak üç aşamadan oluşmaktadır: Isı enerjisi kazancı, kurutma prosesi ve alternatif yakıt kullanımı. Döner fırınların soğutma ünitesi sonrası çıkan baca gazı ile transfer yağı ısıtılarak, kurutma işlemi için gerekli olan sıcak hava elde edilmektedir. Böylece, ısı enerjisinden kazanç sağlanmaktadır. Arıtma çamuru kurutma tesisinin görünümü Şekil 2.4'de verilmektedir.



Şekil 2.4. Arıtma çamuru kurutma tesisi

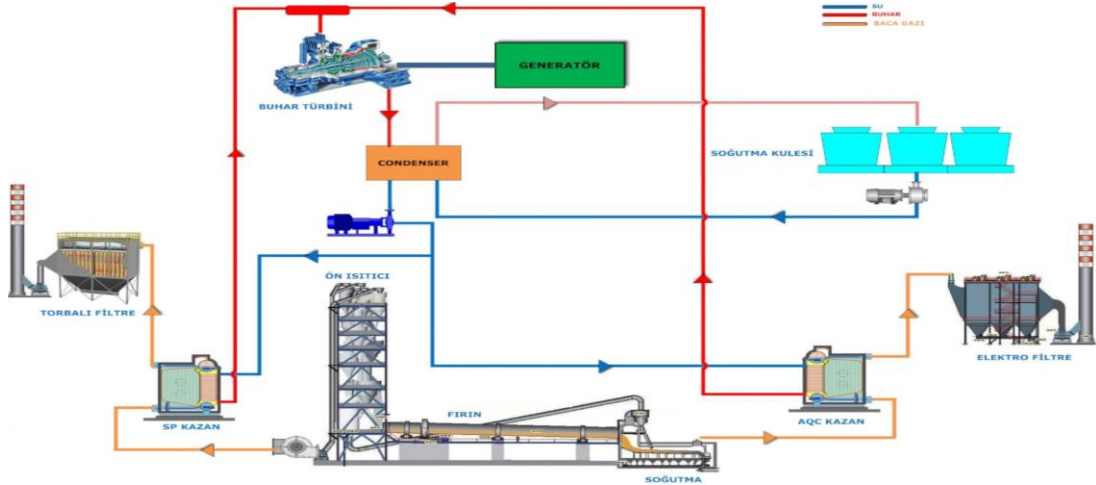
Kalorifik değeri 2500 – 3500 kcal/kg ve katı madde içeriği % 90 olan kuru çamur, klinker üretimi için döner fırına beslenerek alternatif yakıt olarak kullanılmaktadır. Yakıt olarak kullanılacak arıtma çamurunun kalitesi, organik katıların içeriği, besin içeriği (azot, fosfor gibi), ağır metal içeriği, patojenik organizma, virüs ve toksin içeriği gibi kriterlere göre değişiklik gösterebilmektedir. Çamur kurutma tesisinde %90-95 katı madde içerecek şekilde granül haline getirilen evsel ve endüstriyel arıtma çamurlarına ait temel özellikler aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 2.1). Ayrıca, çamur kurutma tesisine kabul edilecek çamurun, solvent, yanıcı ve parlayıcı maddeler içermemesi istenmektedir.

Atık ısı geri kazanım (WHR) tesisi, temel olarak çimento prosesinden artan ve bacalardan atılan yüksek debili sıcak gazın geri kazanımı ile çalışan bir sistemdir. 2013 yılında devreye alınmıştır. Tesiste, daha önceki yıllarda proses gereği bacalardan atılan atık ısı, kurulan yeni kazanlar ile buhar enerjisine, buhar enerjisi de buhar türbini vasıtası ile elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. İşletmenin elektrik tüketiminin yaklaşık %25'i atık ısıdan geri kazanım ile sağlanmaktadır.

Tablo 2.1. Çamur kurutma tesisi için atık kabul kriterleri

Parametre	Minimum	Maksimum
Rutubet (%)		80
Kalorifik değer (kcal/kg)	3000	
Klor (%)		1
Organik içerik (%)	35	85
pH	5,5	8,0
Toplam fibre içeriği (%)	0	20
Kaba maddeler (>5 – 10 mm)	0	8
İnce maddeler (0.3 – 5 mm)	0	12
Amonyak (mg/kg)	0	12000
Toplam sülfür (mg/kg)	0	5000
Toplam demir	0	20000
Florür (mg/kg)	0	100
Uçucu olmayan yağlı maddeler	0	30000
Toplam PCB (mg/kg)	0	0,8
AOX (mg/kg)	0	500
BTX (mg/kg)	0	50

WHR tesisi kurulmadan önce atmosfere atılan 300-450 °C gazları soğutmak için kullanılan su ve elektrik enerjisinden tasarruf edilirken, gazların da atmosfere uygun sıcaklıkta atılması sağlanmaktadır. Şekil 2.5' de atık ısı geri kazanım tesisinin şematik görünümü verilmektedir.



Şekil 2.5. Atık ısı geri kazanım (WHR) tesisi

## **2.2. Çimento Üretiminde Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Uygulaması**

### **2.2.1. Amaç, kapsam ve fonksiyonel birim**

ISO 14040 standardında temel olarak 4 aşamadan oluştuğu belirtilen yaşam döngüsü değerlendirmesinin ilk aşamasında, yaşam döngüsü değerlendirmesinin amacı ve kapsamı açıkça tanımlanmaktadır. Bu YDD çalışmasının amaç ve kapsamının tanımlanması için, ilk olarak sistem sınırları belirlenmiş ve fonksiyonel birim seçilmiştir. Bu çalışmanın amacı, geleneksel yakıt ve hammadde kullanımının azaltılması için çimento üretiminde iki farklı durumun çevresel etkilerinin karşılaştırılması ve değerlendirilmesidir: geleneksel yakıt ve hammaddelerle üretimin gerçekleştirildiği 2007 (GHY) yılı ve alternatif yakıt ve hammaddeler ile üretimin gerçekleştirildiği 2013 yılı (AHY).

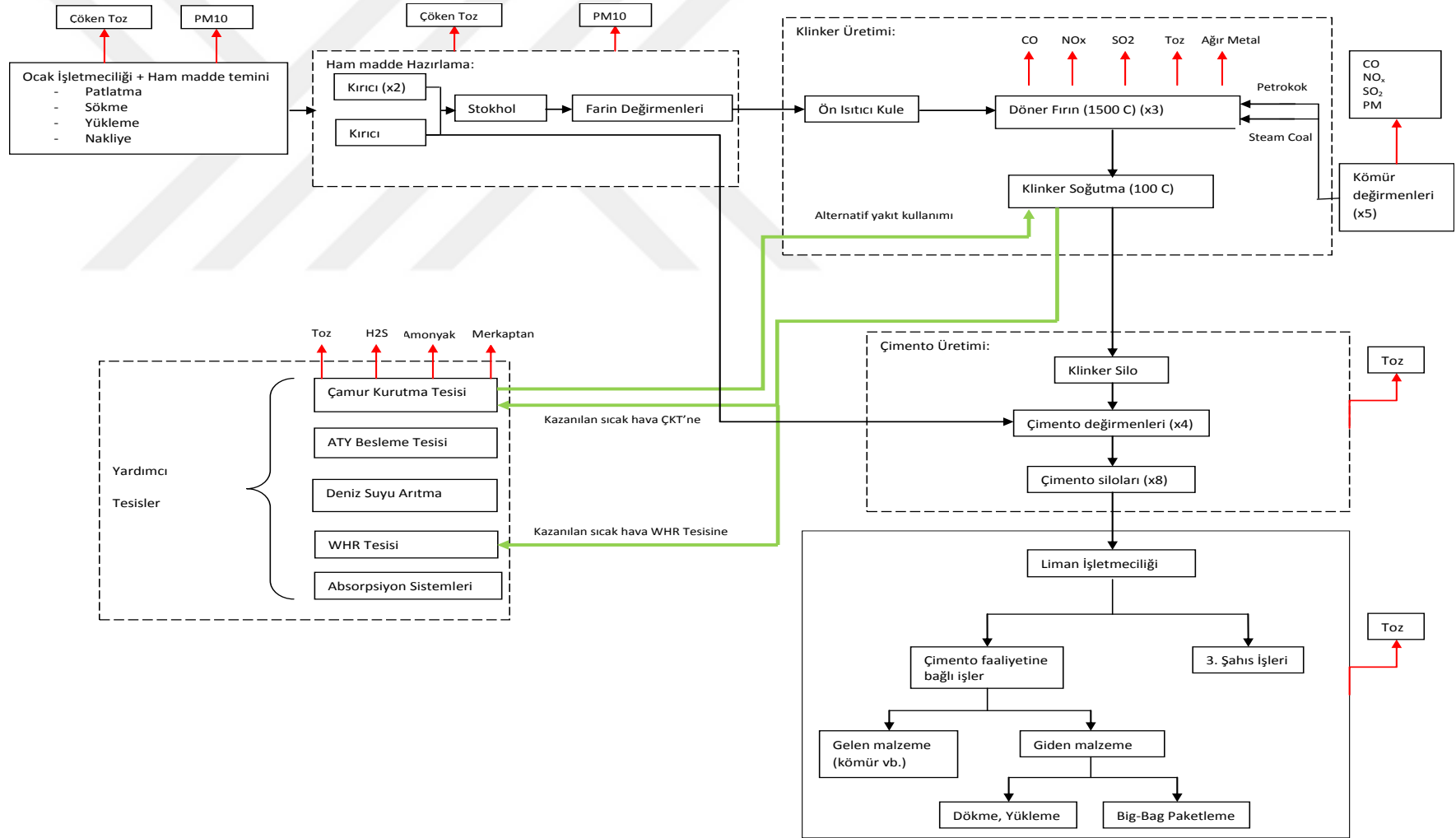
Literatürde, yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarının kapsamının belirlenmesi için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır: beşikten mezara, beşikten kapıya, kapıdan kapıya vb. Bu tez çalışmasında yaşam döngüsü değerlendirmesi, hammadde temini ve hazırlanması, farin üretimi, klinker üretimi, çimento öğütülmesi, hammadde ve yakıtların nakliyesi süreçlerine bağlı olarak oluşabilecek olası çevresel etkilerin değerlendirilmesini kapsayan “beşikten kapıya” yaklaşımına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.6’da çalışmanın kapsamı şema olarak gösterilmektedir.

İşletmede dört farklı türde çimento üretilirken; her birinin hammaddesi olan klinkerin içeriği tüm çimento tipleri için aynıdır. Bu nedenle çalışmada, fonksiyonel birim olarak bir ton klinker (madencilik prosesinden klinker üretimine kadar) ve bir ton çimento (çimento öğütme prosesi için) seçilmiştir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi yaklaşımı, dört aşama için gerçekleştirilmiştir: hammadde hazırlama, farin üretimi, klinker üretimi ve çimento öğütme.

### **2.2.2. Yaşam döngüsü envanter analizi**

Yaşam döngüsü envanter analizi (YDEA) için öncelikli olarak, çimento üretimini gerçekleştiren işletmeden edinilen spesifik veriler kullanılmıştır. Bunun dışında, işletmeden temin edilemeyen veriler için SimaPro 8.0.4 (Pre Consultants, 2008) yazılımında bulunan ECOINVENT ve USLCI veri tabanlarından yararlanılmıştır.





Şekil 2.6. Çalışmanın sistem sınırları (Yeşil renk, geri kazanım faaliyetlerini; kırmızı renk, emisyonları göstermektedir)

Çimento üretimini gerçekleştiren işletmede, 2007 yılında çok düşük miktarda (fırındaki termal enerjinin %0,09' u) atıktan türetilmiş yakıt (ATY) kullanımı ve alternatif hammadde kullanımı (%0,2) mevcuttur. Bu nedenle, 2007 yılındaki durum, geleneksel hammadde ve yakıtlarla klinker ve çimento üretiminin gerçekleştirildiği yıl olarak dikkate alınacaktır. 2013 yılında ise yüksek fırın tozu, alüminyum çamuru, uçucu kül ve demir içerikli çamur alternatif hammadde olarak kullanılırken; kurutulmuş arıtma çamuru, ATY ve atık yağ alternatif yakıt olarak kullanılmaktadır. 2013 yılında, klinker üretiminde alternatif hammadde kullanım oranı yaklaşık %1 iken; alternatif yakıt kullanım oranı %3,5'tur. Envanter analizi ile ilgili detaylı bilgiler Tablo 2.2'de verilmektedir.

Tablo 2.2. Bir ton klinker üretimi için girdi ve çıktılar

Malzeme	AHY (2013)	GHY (2007)	Birim
<b>Girdi</b>			
<b>Hammadde:</b>			
Kalker	0.7036	0.3287	t
Marl	0.7718	1.1614	t
Killi Şist	0.0055	0.0123	t
Demir cevheri, %46 Fe	0.0367	0.0262	t
Boksit	0.0162	0.0108	t
Çakıl	-	0.0084	t
<b>Alternatif hammaddeler:</b>			
Yüksek fırın cürufu	0.0085	-	t
Alüminyum çamuru	0.0013	-	t
Uçucu kül	0.0028	-	t
Demir içerikli çamur	0.0003	-	t
Pirit külü	-	0.0038	t
<b>Nakliye:</b>			
Kalker	8.442	3.9444	tkm
Marl	11.25	17.678	tkm
Killi Şist	0.110	0.246	tkm
Demir cevheri, %46 Fe	0.734	0.734	tkm
Boksit	16.94	9.1216	tkm
Yüksek fırın cürufu	0.102	-	tkm
Alüminyum çamuru	0.140	-	tkm
Uçucu kül	0.034	-	tkm
Demir içerikli çamur	0.012	-	tkm
Petrokok	547.9	519.9	tkm
Fuel oil	0.0032	0.0116	tkm
<b>Fossil yakıtlar:</b>			
Petrokok	0.0081	-	t
Yerli linyit	-	0.0146	

Tablo 2.2. (Devam) Bir ton klinker üretimi için girdi ve çıktılar

İthal kömür	0.1179	0.1059	t
Toplam kömür	0.1261	0.1206	t
Fuel oil	0.000097	0.000351	t
Doğalgaz	0.849	0.798	Sm <sup>3</sup>
<b>Alternatif yakıtlar:</b>			
Kurutulmuş arıtma çamuru	0.002	-	t
ATY	0.005	0.0002	t
Atık yağ	3.761E-06	-	t
<b>Elektrik:</b>			
Atık ısı geri kazanımı (WHR)	-17.912	-	kWh
<b>Termal enerji</b>			
	3340	3120	MJ
<b>Çıktı:</b>			
<b>Emisyonlar:</b>			
CO <sub>2</sub> , fosil	836	812	kg
CO	0.6991	0.6938	kg
Partikül madde	0.0125	0.0443	kg
NO <sub>2</sub>	0.8572	1.0519	kg
NO	0.5527	0.6870	kg
<b>Ürün:</b>			
Klinker	1	1	t

Tablo 2.3’de, işletmeye susuzlaştırılmış bir şekilde gelen arıtma çamurundan, çamur kurutma tesisinde katı madde içeriği %90 olan 1 ton kuru çamur çamur elde etmek için gerekli girdi ve çıktı miktarları verilmektedir.

Tablo 2.3. Bir ton kuru çamur için gerekli girdi ve çıktılar

Parametre	Miktar	Birim
<b>Girdi:</b>		
Yaş çamur	4.50	t/t.DS
Elektrik	616	kWh/t.DS
<b>Çıktı:</b>		
Enerji	3000	kcal/kg
<b>Emisyon</b>		
H <sub>2</sub> S	0.0452	kg/t.DS
NH <sub>3</sub>	0.0031	kg/t.DS
VOC	0.0447	kg/t.DS
NO	0.0406	kg/t.DS
NO <sub>2</sub>	0.0622	kg/t.DS
<b>Ürün:</b>		
Kuru çamur	1	t

DS: Kuru çamur

Alternatif yakıt olarak kullanılan ATY ile ilgili bilgiler işletmeden temin edilemediğinden, ATY kompozisyonu ve ATY üretimi için gerekli elektrik enerjisi miktarı literatürdeki çalışmalardan alınmıştır. Atıktan türetilmiş yakıt, %66 oranında tekstil atığı, %17 kağıt atığı, %13,3 plastik poşet atığı ve %3,6 PET plastik içermektedir (Kara ve diğ., 2009). 1 ton ATY üretimi için gerekli elektrik enerjisi miktarı ise 373,4 kWh olarak varsayılmıştır (Grzesik ve Malinowski, 2016).

Yaşam döngüsü değerlendirmesi yaklaşımında, kullanılan alternatif hammadde ve yakıtlar sayesinde, kullanımından kaçınılan temel hammadde ve fosil yakıt miktarlarının (ikame miktarlarının) belirlenmesi ve yaşam döngüsü envanter analizine dahil edilmesi aşaması, çalışmanın gerçekçiliği ve güvenilirliği açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada ikame miktarları Denklem (2.1) kullanılarak belirlenmiştir:

$$\text{İkame miktarı} = \frac{[\text{Miktar} \times \text{KM} (\%) \times \text{Tenör} (\%)]_{\text{alternatif hammadde}}}{[\text{KM} (\%) \times \text{Tenör} (\%)]_{\text{temel hammadde}}} \quad (2.1)$$

Burada; KM (%) ile ifade edilen katı madde yüzdesi, Tenör (%) olarak ifade edilen ise tenör yüzdesidir.

Tablo 2.4’de, kullanılan alternatif hammaddelerin rutubet oranları, tenör yüzdeleri ve kullanımından kaçınılan bu hammaddelere bağlı olarak hesaplanan ikame değerleri verilmiştir.

Tablo 2.4. Bir ton klinker için kullanılan alternatif hammaddelerin ikame değerleri

Alternatif hammadde	Rutubet Oranı (%)	Tenör (%)	İkame ürün adı	İkame ürün miktarı (ton)
Demir Cürufu	10	57	Demir cevheri	0,00474
Demir içerikli çamur	53	35	Demir cevheri	0,00011
Uçucu kül	18	12	Boksit	0,00061
Alüminyum içerikli çamur	74	34	Boksit	0,00025

Klinker üretiminin envanter analizi aşamasından sonra, çimento üretimi aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada, fonksiyonel birim 1 ton çimento olarak seçilmiş ve çimento üretimi ile ilgili çalışmalar bu fonksiyonel birim temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Söz konusu işletmede, 4 farklı çimento üretilmektedir. İşletmede üretimi gerçekleştirilen dört farklı çimento türü için kullanılan klinker ve katkı maddesi

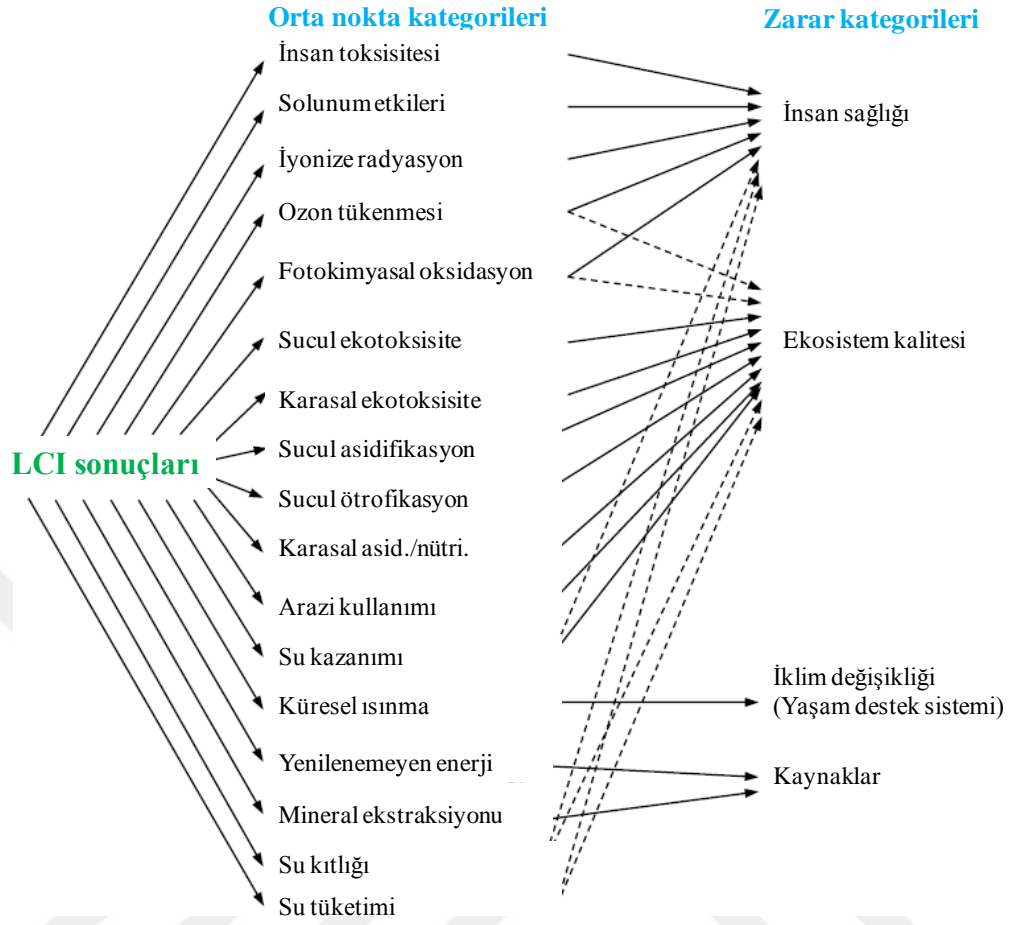
oranları, çalışma kapsamında karşılaştırması yapılan 2 farklı yıl için Tablo 2.5’de verilmiştir.

Tablo 2.5. Üretilen çimento türleri için kullanılan klinker ve katkı maddesi oranları

Senaryo	Çimento tipi	Klinker (%)	Alçıtaşı (%)	Kalker (%)	Tras (%)
<b>GHY</b> (2007)	<b>CEM I</b>	0,93	0,06	0,01	-
	<b>CEM II</b>	0,83	0,06	0,01	0,10
	<b>CEM IV</b>	0,71	0,06	0,01	0,23
	<b>PKÇ</b>	0,92	0,05	0,03	-
<b>AHY</b> (2013)	<b>CEM I</b>	0,92	0,05	0,03	-
	<b>CEM II</b>	0,77	0,05	0,04	0,15
	<b>CEM IV</b>	0,55	0,05	0,03	0,37
	<b>PKÇ</b>	0,95	0,05	-	-

### 2.2.3. Yaşam döngüsü etki değerlendirme

Çalışmada etki değerlendirme metodu olarak, orta nokta ve zarar odaklı yaklaşıma dayanan bir etki değerlendirme metodu olan ve IMPACT 2002, Eco-indicator 99, CML ve IPCC metodlarının bir kombinasyonu olan IMPACT 2002+ metodu kullanılmıştır. IMPACT 2002+ metodu ile hesaplanan orta nokta, son nokta (zarar) kategorileri ve birbirleri ile ilişkisi Şekil 2.7’de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. IMPACT 2002+ metodundaki orta nokta ve zarar kategorilerinin birbiri ile ilişkisi şeması (Jolliet ve diğ., 2003)

IMPACT 2002+ metodunda kullanılan karakterizasyon faktörlerinin kaynakları, referans maddeler ve zarar birimleri Tablo 2.6'da verilmektedir.

Tablo 2.6. IMPACT 2002+ metodunda kullanılan karakterizasyon faktörlerinin kaynakları, referans maddeler ve zarar birimleri (Jolliet ve diğ., 2003)

Kaynak	Orta nokta kategorisi ve kısaltmaları	Referans madde	Zarar kategorisi	Zarar birimi
[a]	İnsan toksisitesi: Kanserojenler (K) Kanserojen olmayanlar (KO)	kg <sub>eq</sub> kloro etilen (havada)	İnsan sağlığı	DALY
[b]	Solunabilir inorganikler (Sİ)	kg <sub>eq</sub> PM <sub>2,5</sub> (havada)	İnsan sağlığı	
[b]	İyonize radyasyon (İR)	Bq <sub>eq</sub> carbon-14 (havada)	İnsan sağlığı	
[b]	Ozon tükenmesi (OT)	kg <sub>eq</sub> CFC-11 (havada)	İnsan sağlığı	
[b]	Fotokimyasal oksidasyon (=solunabilir organikler) (SO)	kg <sub>eq</sub> etilen (havada)	İnsan sağlığı	
			Ekosistem kalitesi	-

Tablo 2.6 (Devam). IMPACT 2002+ metodunda kullanılan karakterizasyon faktörlerinin kaynakları, referans maddeler ve zarar birimleri (Jolliet ve diğ., 2003)

[a]	Sucul ekotoksosite (SE)	kg <sub>eq</sub> trietilen glikol (suda)	Ekosistem kalitesi	
[a]	Karasal ekotoksosite (KE)	kg <sub>eq</sub> trietilen glikol (toprakta)	Ekosistem kalitesi	PDF.m <sup>2</sup> .yr
[b]	Karasal asid./nutri. (KAN)	kg <sub>eq</sub> SO <sub>2</sub> (havada)	Ekosistem kalitesi	
[c]	Sucul asidifikasyon (SA)	kg <sub>eq</sub> SO <sub>2</sub> (havada)	Ekosistem kalitesi	Geliştirme aşamasında
[c]	Sucul ötrofikasyon (SÖ)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (suda)	Ekosistem kalitesi	
[b]	Arazi kullanımı (AK)	m <sup>2</sup> eq organik tarım arazisi.yıl	Ekosistem kalitesi	PDF.m <sup>2</sup> .yr
[b]	Küresel ısınma (KI)	kg <sub>eq</sub> CO <sub>2</sub> (havada)	İklim değişikliği	kg <sub>eq</sub> CO <sub>2</sub> (havada)
[d]	Yenilenemeyen enerji (YE)	MJ toplam birincil yenilenemeyen veya kg <sub>eq</sub> ham petrol	Kaynaklar	MJ
[b]	Maden çıkarma (MÇ)	MJ ilave enerji veya kg <sub>eq</sub> demir (cevherde)	Kaynaklar	

Yaşam döngüsü etki değerlendirmeden sonra, elde edilen sonuçların yorumunu ve sunumunu kolaylaştırmak için, tercihe bağlı aşamalar olan normalizasyon ve ağırlıklandırma işlemleri uygulanmıştır (Chen ve diğ., 2010; ISO, 2006a). Normalizasyon işlemi, etki kategorilerinin normalizasyon faktörlerine bölünmesi ile gerçekleştirilmekte (Jolliet ve diğ., 2003) ve böylece etki göstergelerinin farklı etki kategorileri arasında karşılaştırılabilmesi sağlanmaktadır. Bunun için kullanılan normalizasyon faktörleri Tablo 2.7’de verilmektedir.

Tablo 2.7. IMPACT 2002+ etki değerlendirme metodu için kullanılan normalizasyon faktörleri (Frischknecht ve diğ., 2007)

Zarar kategorileri	Normalizasyon faktörü	Birim
İnsan sağlığı	0,0071	DALY/kişi/yıl
Ekosistem kalitesi	13700	PDF.m <sup>2</sup> .yıl/kişi/yıl
İklim değişikliği	9950	kg CO <sub>2</sub> /kişi/yıl
Kaynaklar	152000	MJ/kişi/yıl

#### 2.2.4. Yorum

ISO 14040 standardının son aşaması olan yorumlama aşamasında, envanter analizi ve etki değerlendirmesi aşamalarındaki bulgular birlikte göz önünde bulundurularak, standardın ilk aşaması olan ve temelini oluşturan amaç ve kapsam tanımları ile ilişkili sonuçlar ortaya konmakta, kısıtlar tanımlanmakta ve şeffaf bir şekilde raporlanmaktadır.

## **2.3. Veri Kalitesi**

### **2.3.1. Hassasiyet analizleri**

Hassasiyet analizleri, yaşam döngüsü değerlendirmesinde sonuçların sağlamlığının ve belirsizlik faktörleri üzerindeki hassasiyetlerinin çalışılması açısından önemli bir araçtır (Wei ve diğ., 2015). ISO 14040 standardına göre hassasiyet analizleri, “Bir çalışmanın çıktısına dair yöntemlere ve verilere göre yapılan seçimlerin etkilerinin tahmin edilmesi için ihtiyaç duyulan sistematik prosedürler” olarak tanımlanmaktadır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi sonuçları giriş verileri seçimindeki farklılık, konumsal ve zamansal çeşitlilik gibi faktörlerden etkilenebileceğinden, hassasiyet analizlerinin gerçekleştirilmesi önem taşımaktadır (Hossain ve diğ., 2017). Bu nedenle, giriş verilerinin, YDD sonuçları üzerindeki etkisini değerlendirmek için hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir.

Modellenen senaryolarda, klinker ve çimento üretimi için kullanılan temel hammaddeler (kalker, kil, marn vb.) ve yakıtlara (petrokok, linyit, fuel oil vb.) ait veriler hem USLCI (U.S. Life Cycle Inventory Database) hem de Ecoinvent veri tabanından alınarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Geleneksel yakıtların kullanıldığı 2007 yılındaki durum ve alternatif yakıtların %3 oranında kullanıldığı 2013 yılındaki durumlara ek olarak; hassasiyet analizleri kapsamında %15 ve %30 arasında değişen farklı ikame oranları ve farklı alternatif yakıtlar belirlenerek alternatif senaryolar oluşturulmuş ve elde edilen YDD sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

### **2.3.2. Belirsizlik analizleri**

Belirsizlik analizleri ISO 14040 standardında, “Model etkisinin, girdi belirsizliğinin ve veri değişkenliğinin toplam etkilerinden dolayı, bir hayat boyu envanter analizinin sonuçlarında ortaya çıkan belirsizliği hesaplamak için kullanılan sistematik prosedürler” olarak tanımlanmaktadır (ISO, 2006a). Huijbregts (1998), altı farklı çeşit belirsizlik ve değişkenliğin olacağını belirtmiştir: (1) parametre belirsizliği, (2) model belirsizliği, (3) seçimlerden kaynaklanan belirsizlik, (4) konumsal değişkenlik, (5) zamansal değişkenlik ve (6) kaynaklar arasındaki değişkenlik. Yaşam döngüsü



etki değerlendirme aşamasında, belirsizlik analizi için çeşitli yaklaşımlar derlenmiş olmakla birlikte, bunlar arasında en çok önerilen stokastik bir model olan Monte Carlo simülasyonudur (Guo ve Murphy, 2012). Monte Carlo simülasyonunu uygulamak için, parametreler belirsizlik dağılımı olarak tanımlanmalıdır (Huijbregts, 1998). Monte Carlo simülasyonu, SimaPro yazılımında yer almasına rağmen, halen az sayıda YDD çalışmasında uygulanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, elde edilen sonuçların öneminin değerlendirilmesi amacıyla, SimaPro yazılımında yer alan Monte Carlo simülasyonu kullanılarak belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. Belirsizlik analizi için, direkt olarak fabrikadan alınan veriler yerine istatistiksel kaynaklardan edinilen veriler kullanılmıştır. Bunun nedeni, fabrikaya özęü verilerin, herhangi bir belirsizlik (standart sapma vb.) içermemesidir. Monte Carlo analizleri, hassasiyet analizleri için oluşturulan senaryoları karşılaştırmayı sağlamaktadır. Belirsizlik değerlendirmesi için gereklilikler 1000 iterasyon ve %95 güven aralığıdır.

#### **2.4. Alternatif Senaryoların Oluşturulması**

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

Her bir senaryo için, alternatif yakıt kullanım oranları seçilmiş ve bunlara bağlı olarak oluşacak emisyon değerleri ve gerekli termal enerjiyi sağlaması için yeterli olan fosil yakıt miktarı hesaplanmıştır. İşletmede 2013 yılında, termal enerjinin %3'ü alternatif yakıtlarla sağlanmaktadır. Bu oran alternatif senaryolarda %15 ve %30 olacak şekilde seçilerek, farklı alternatif yakıt kullanımlarına bağlı olarak oluşacak çevresel etkiler belirlenmiştir. Tablo 2.8'de, alternatif senaryolara ait bilgiler özetlenmektedir.

Tablo 2.8. Tez çalışması kapsamında oluşturulan alternatif senaryolar

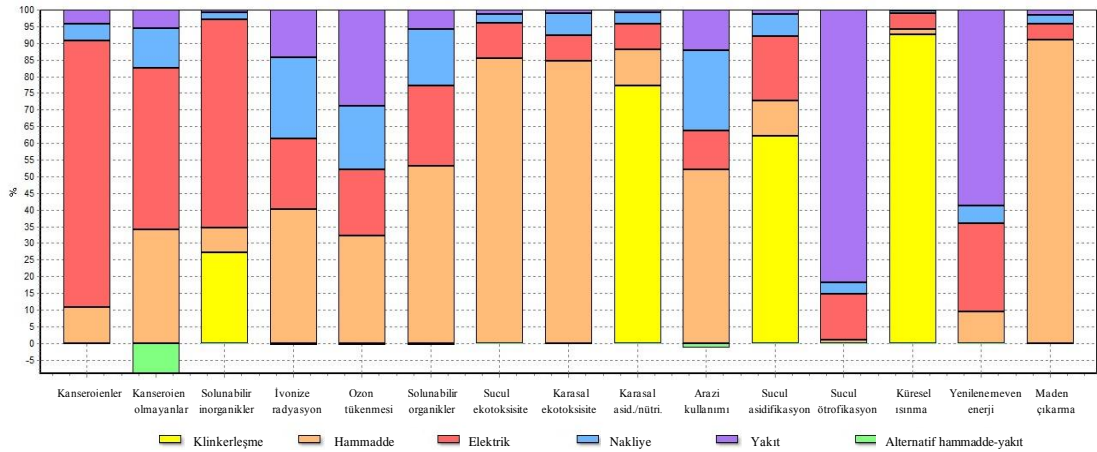
Senaryo	Alternatif yakıt türü	Alternatif yakıt kullanım oranı	Kaçınılan kömür miktarı (t/klinker)	Hesaplanan CO <sub>2</sub> emisyonu (kg CO <sub>2</sub> /t.klinker)
Senaryo 1	Kuru çamur	% 15	0,015	837
Senaryo 2	ATY	% 15		835
Senaryo 3	Atık yağ	% 15		832
Senaryo 4	Kuru çamur, ATY Atık yağ	% 5 % 5 (toplam %15) % 5		835
Senaryo 5	Kuru çamur	% 30	0,036	830
Senaryo 6	ATY	% 30		827
Senaryo 7	Atık yağ	% 30		821
Senaryo 8	Kuru çamur, ATY Atık yağ	% 10 % 10(toplam %30) % 10		826

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Klinker Üretimine Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme Sonuçları

##### 3.1.1. 2007 yılı

IMPACT 2002+ metodu kullanılarak yaşam döngüsü etki değerlendirmesi yapılan 1 ton klinker üretimine ait karakterizasyon sonuçları Şekil 3.1’de verilmiştir. Geleneksel hammadde ve yakıtlarla üretimin gerçekleştirildiği 2007 yılı için klinker üretiminin çevresel etkileri, klinkerleşme (kalsinasyon ve yakıt yanması), hammadde kullanımı, elektrik tüketimi, nakliye, yakıt tüketimi ve alternatif hammadde ve yakıt tüketimi olmak üzere 6 farklı kategori olarak değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.



Şekil 3.1. GHY durumu için karakterizasyon sonuçları

Şekil incelendiğinde, klinkerleşmenin küresel ısınma başta olmak üzere, karasal asidifikasyon/nütrifikasyon ve sucul asidifikasyon üzerinde olumsuz etkileri olduğu göze çarpmaktadır. Küresel ısınma etki kategorisi incelendiğinde, klinkerleşmenin etkisinin %93 olduğu belirlenmiştir. Klinkerleşme aşamasında salınan CO<sub>2</sub>'in yaklaşık %50'si kalsinasyondan, diğer kısmı ise yakıt yanmasından kaynaklanmaktadır.

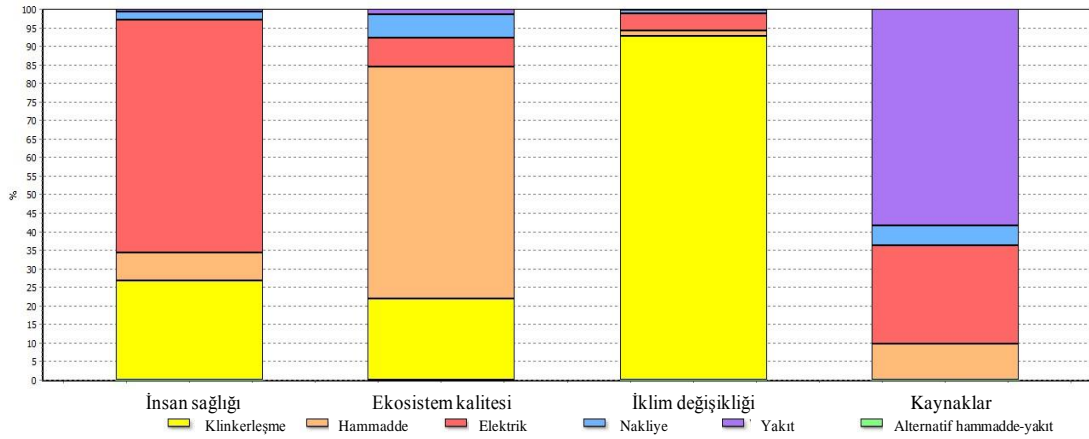
Hammadde kullanımının en önemli olumsuz etkisi ise maden çıkarma faaliyetleri kategorisinde görülmektedir. Maden çıkarma etki kategorisi %91 oranında hammadde kullanımından etkilenmektedir. Ayrıca 1 ton klinker üretimine bağlı olarak oluşan sucul ekotoksitenin %85'i, karasal ekotoksitenin %84'ü, arazi kullanımının %52'si, solunabilir organiklerin %53'ü, kanserojen olmayanların %34'ü, ozon tükenmesinin %32'si ve iyonize radyasyonun %40'ı, hammadde kullanımına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır.

Elektrik tüketimi ise, kanserojenler (%80), solunabilir inorganikler (%62,5) ve kanserojen olmayanlar (%48,4) gibi genellikle insan sağlığı ile ilişkili olan çevresel kategoriler üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Bununla birlikte, yenilenemeyen enerji kategorisinin %27'si de klinker üretimindeki elektrik tüketimi ile ilişkidir.

Klinker üretimi için kullanılan tüm hammaddelerin ve yakıtların karayolu ve denizyolu ile temini aşamasındaki nakliye işleminin, arazi kullanımı, iyonize radyasyon, ozon tükenmesi ve solunabilir organikler üzerinde %16 ile %24 arasında değişen oranlarda olumsuz etkileri bulunmaktadır.

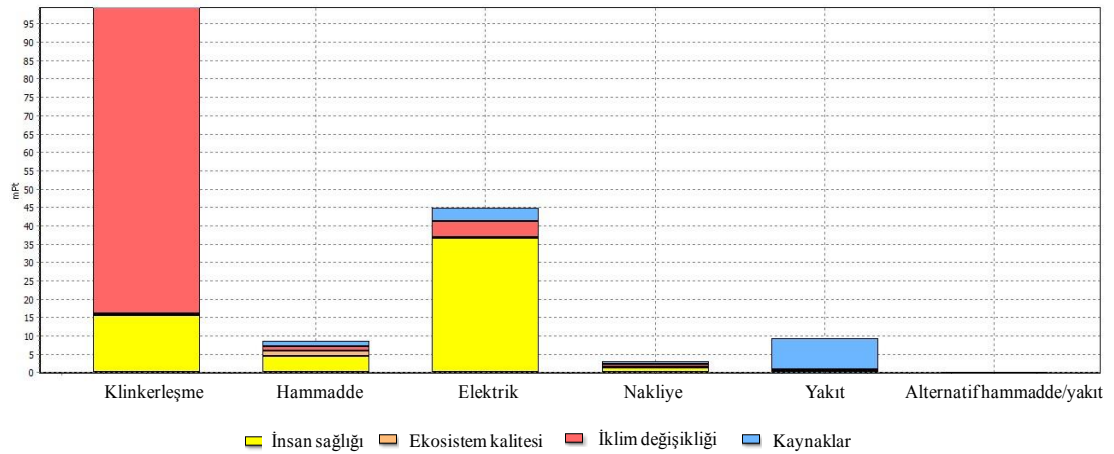
Klinker üretimi için kullanılan petrokok, linyit, fuel oil ve doğalgaz gibi yakıtların ise madencilik ve rafineri faaliyetlerine bağlı olarak yenilenemeyen enerji (%59), sucul ötrofikasyon (%81) ve ozon tükenmesi (%29) üzerinde olumsuz etkileri olduğu görülmektedir.

Şekil 3.2'de son nokta etki kategorileri verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, iklim değişikliğinin %93 oranında klinkerleşme (kalsinasyon ve yakıt yanması) prosesi; kaynak kullanımının %59 oranında yakıt kullanımı (madenciliği ve rafinerisi); ekosistem kalitesinin %62,5 hammadde kullanımı; insan sağlığının ise %63 elektrik tüketimi ile ilişkili olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.2. GHY durumu için zarar değerlendirme sonuçları

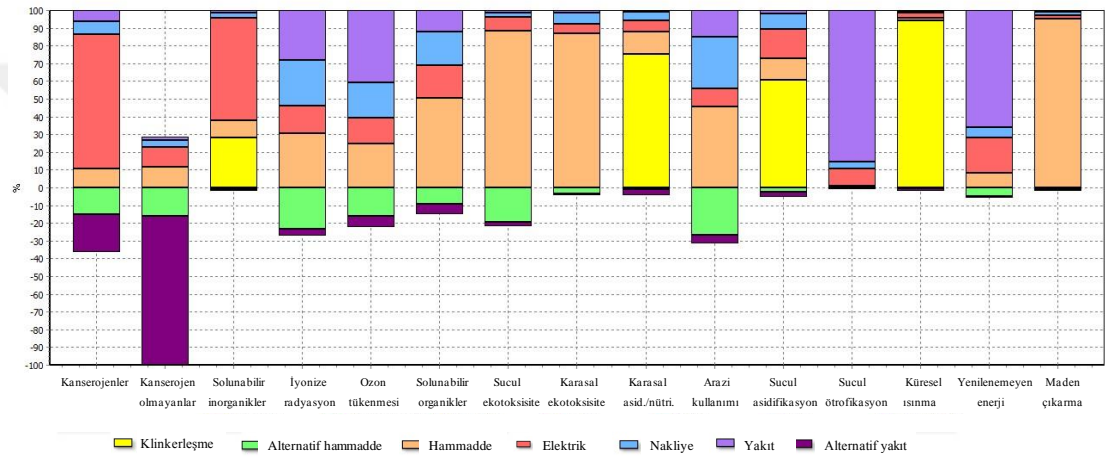
Klinker üretim prosesini oluşturan beş farklı kategorinin, çevresel açıdan önem derecelerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen normalizasyon ve ağırlıklandırma işlemleri sonucunda oluşturulan grafik Şekil 3.3’de sunulmaktadır. Buna göre, klinker üretim prosesinde, klinkerleşme (kalsinasyon ve yakıt yanması) tüm çevresel etkilerin %60’ını oluştururken; elektrik tüketimi ise %27’sini oluşturmaktadır. Alternatif hammadde ve yakıt kullanımının, çevresel açıdan pozitif veya negatif önemli bir etkisi bulunmamaktadır. 2007 yılında üretimin neredeyse tamamının geleneksel hammadde ve yakıtlarla gerçekleştirildiği düşünüldüğünde, bunun beklenen bir durum olduğu sonucuna ulaşılabilir.



Şekil 3.3. GHY durumu için eko puan grafiği

### 3.1.2. 2013 yılı

IMPACT 2002+ metodu kullanılarak yaşam döngüsü etki değerlendirmesi yapılan 1 ton klinker üretimine ait karakterizasyon sonuçları Şekil 3.4’de verilmiştir. Alternatif hammadde ve yakıtlarla üretimin gerçekleştirildiği 2013 yılı için klinker üretiminin çevresel etkileri, klinkerleşme (kalsinasyon ve yakıt yanması), hammadde kullanımı, alternatif hammadde kullanımı, elektrik tüketimi, nakliye, yakıt tüketimi ve alternatif yakıt tüketimi olmak üzere 7 farklı kategori olarak değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.



Şekil 3.4. AHY durumu için karakterizasyon sonuçları

Şekil incelendiğinde, 2007 yılındaki durum ile benzer olarak, klinkerleşmenin küresel ısınma, karasal asidifikasyon/nütrifikasyon ve sucul asidifikasyon üzerinde olumsuz etkileri olduğu göze çarpmaktadır. Küresel ısınma etki kategorisi, %94 oranında klinkerleşme ile ilişkilidir. Bu sonuç; Güereca ve diğ. 2015, Galvez-Martos ve Schoenberger (2014), Valderrama ve diğ. (2012), Chen ve diğ. (2010), Huntzinger ve Eatmon (2009) ve Stafford ve diğ. 2016a ile uyumludur. Bir ton klinker üretimine bağlı oluşan küresel ısınma potansiyeli 878 kg CO<sub>2</sub>-eşd olarak bulunmuştur. Bir ton klinker üretiminin sucul asidifikasyon üzerine etkisi 1,05 kg SO<sub>2</sub>-eşd olmakla birlikte; bu değer %61’i klinkerleşme (0,68 kg SO<sub>2</sub>-eşd); %16’sı elektrik tüketimi, %12’si hammadde kullanımı ve %2’si yakıt tüketimi ile ilişkilidir. Stafford ve diğ. (2016a) de bu çalışma ile benzer olarak, klinkerleşmenin asidifikasyon üzerinde yüksek katkısının olduğu sonucuna varmıştır (%48). Bir ton klinker üretimine bağlı oluşan karasal asidifikasyon/nütrifikasyon etkisi ise 6,75 kg SO<sub>2</sub>-eq olarak belirlenmiş ve bunun %75’inin klinkerleşme (5,3 kg SO<sub>2</sub>-eşd.), %13’ünün

hammadde kullanımı, %6,5'inin elektrik tüketimi ve %4,6'sının nakliye ile ilgili olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, çimento üretiminde alternatif yakıt olarak ATY kullanımının, kömüre oranla içerdiği daha düşük NO<sub>x</sub> ve SO<sub>x</sub> emisyonları nedeniyle, asidifikasyon potansiyelini azalttığı belirten Güereca ve diğ. (2015); Huntzinger ve Eatmon (2009), ve Genon ve Brizio (2008) tarafından yapılmış çalışmalardaki sonuçlar ile uyumludur.

Hammadde kullanımı değerlendirildiğinde, 2007 yılındaki durum ile benzer olarak, hammadde kullanımının en çok maden çıkarma, sucul ve karasal ekotoksiste, solunabilir organikler, arazi kullanımı, iyonize radyasyon ve ozon tükenmesi potansiyelini olumsuz şekilde etkilediği görülmektedir. Burada göze çarpan nokta, 2007 yılından farklı olarak, 2013 yılında klinker üretiminde alternatif hammaddelerin kullanımının, arazi kullanımı, iyonize radyasyon, sucul ekotoksiste, ozon tükenmesi, kanserojenler ve kanserojen olmayan etki kategorileri üzerindeki pozitif etkisidir. Bir ton klinker üretimi prosesinde %1 oranında alternatif hammadde kullanımının, arazi kullanımını %27, iyonize radyasyonu %24, sucul ekotoksisteyi %20 azalttığı belirlenmiştir.

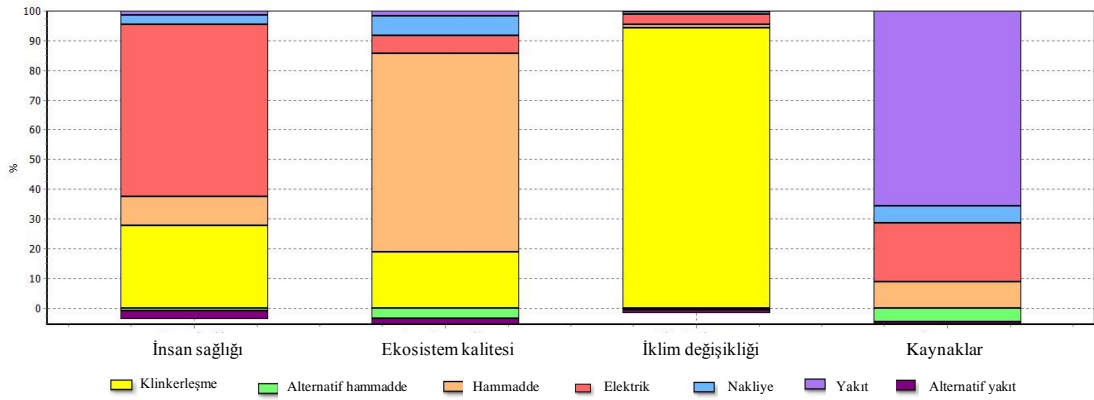
Elektrik tüketimi ise, insan sağlığı ile ilişkili olan kanserojenler (%76) ve solunabilir inorganikler (%58) üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Yenilenemeyen enerji kategorisinin %20'si, kanserojen olmayanların ise %11'i elektrik tüketimi ile ilişkilidir. 2013 yılında, klinker üretimi için gerekli olan elektrik enerjisinin yaklaşık %25'i atık ısı geri kazanım tesisiyle elde edilmekte, ve dolayısıyla şebekeden satın alınan elektrik miktarından finansal açıdan tasarruf yapılması sağlanmaktadır. Yenilenemeyen enerji ve kanserojen olmayan etki kategorisindeki elektrik tüketimi katkısının 2007 yılına göre daha az olması, WHR tesisi sayesinde elektrik enerjisinden yapılan çevresel tasarruf olarak açıklanabilir.

Klinker üretimi için kullanılan tüm hammaddelerin ve yakıtların karayolu ve denizyolu ile temini aşamasındaki nakliye işleminin, arazi kullanımı, iyonize radyasyon, ozon tükenmesi ve solunabilir organikler üzerinde %18 ile %29 arasında değişen oranlarda olumsuz etkileri bulunmaktadır.

Klinker üretimi için kullanılan petrokok, linyit, fuel oil ve doğalgaz gibi yakıtların ise madencilik ve rafineri faaliyetlerine bağlı olarak yenilenemeyen enerji (%66),

sucul ötrofikasyon (%85) ve ozon tükenmesi (%40) üzerinde olumsuz etkileri olduğu görülmektedir. Kurutulmuş arıtma çamuru, ATY ve atık yağ gibi alternatif yakıtların kullanılmasına bağlı olarak ise, kanserojen olmayan etki kategorisinde oldukça dikkat çeken bir azalma (%84) olduğu göze çarpmaktadır. Bunun yanı sıra, kanserojenlerde de %21 oranında bir azalma bulunmaktadır.

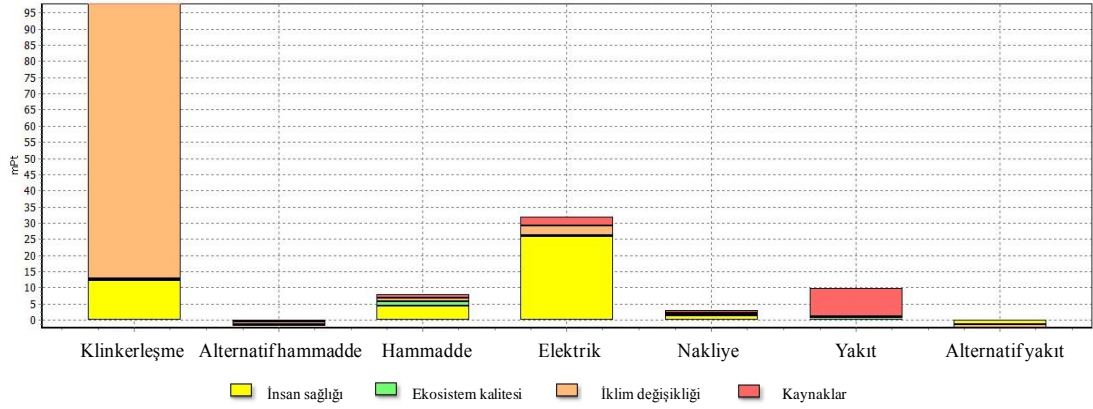
Şekil 3.5’de verilen son nokta etki kategorileri değerlendirildiğinde ise, iklim değişikliğinin %94 oranında klinkerleşme (kalsinasyon ve yakıt yanması) prosesi; kaynak kullanımının %65 oranında yakıt kullanımı (madenciliği ve rafinerisi); ekosistem kalitesinin %67 hammadde kullanımı; insan sağlığının ise %58 elektrik tüketimi ve %28 klinkerleşme ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Alternatif hammadde ve yakıt kullanımının, zarar kategorileri üzerindeki olumsuz etkileri, %1 ile %5 arasında değişen oranlarda azalttığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.5. AHY durumu için zarar değerlendirmesi sonuçları

Normalizasyon ve ağırlıklandırma işlemleri sonucunda oluşturulan eko puan grafiğine göre ise (Şekil 3.6), 1 ton klinker üretimine bağlı olarak oluşan çevresel etkilerin %67’si, klinkerleşme (kalsinasyon ve yakıt yanması), %22’si ise elektrik tüketiminden kaynaklanmaktadır. Alternatif hammadde ve yakıt kullanımının, tüm çevresel etkiler üzerinde yaklaşık %3 pozitif etkisi bulunmaktadır.



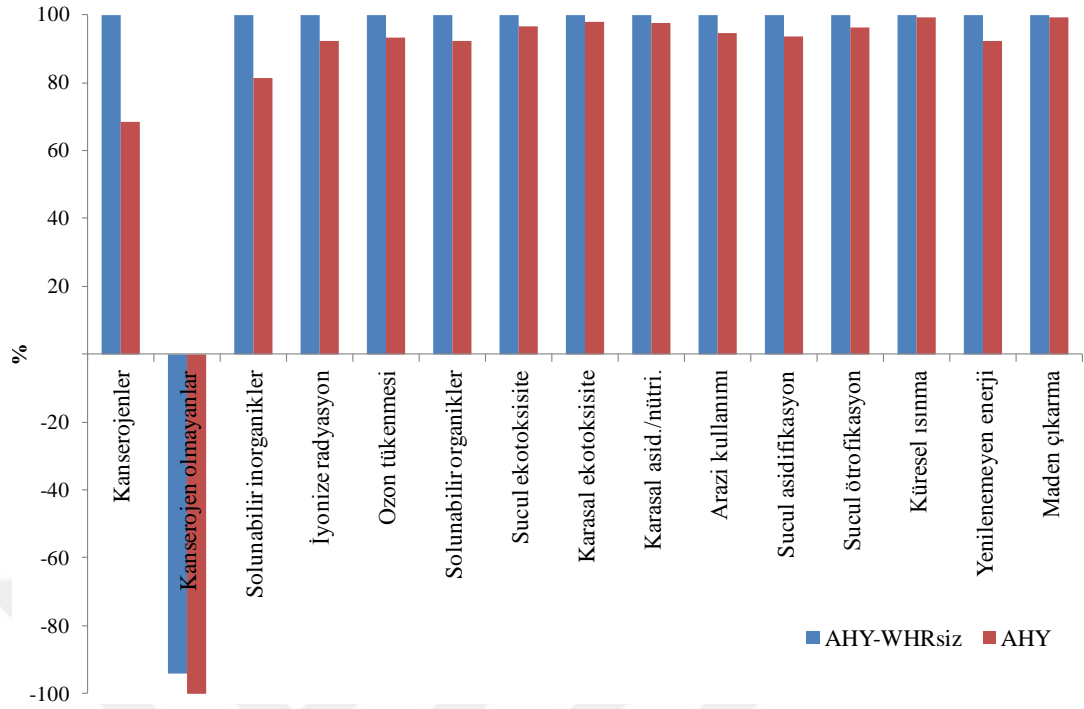


Şekil 3.6. AHY durum için oluşturulan eko puan grafiği

### 3.1.3. 2013 yılı (WHR olmadan)

İşletmenin, atık ısı geri kazanım tesisi sayesinde tasarruf ettiği elektrik enerjisinin, çevresel açıdan etkilerinin değerlendirilmesi için, WHR tesisinin olmadığı ve bu tesisten elde edilen elektrik enerjisi yerine şebekeden elektrik satın alındığı varsayılarak, yeniden bir yaşam döngüsü değerlendirme çalışması modellenmiştir. Bu duruma göre elde edilen karakterizasyon sonuçları, WHR tesisinin mevcut olduğu durumdaki sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak Şekil 3.7’de sunulmaktadır.

Eğer, WHR tesisi mevcut olmayıp, klinker üretimi için gerekli elektrik enerjisi sadece şebekeden karşılsaydı, çevresel etkiler açısından değerlendirildiğinde, tüm çevresel etkilerde artış olacağı belirlenmiştir. En önemli artışın ise kanserojenler (%46) ve solunabilir inorganiklerde (%23) olacağı sonucuna varılmıştır. İşletme, klinker ve çimento üretimi için kullandığı elektrik enerjisinin yaklaşık %30’unu WHR tesisinden karşılayarak; tüm etki kategorilerinde %0,75 (küresel ısınma) ile %32 (kanserojenler) arasında değişen oranlarda azalmayı sağlamıştır.



Şekil 3.7. WHR tesisinin olmadığı durum ile WHR tesisinin olduğu durumun karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

WHR tesisi kullanımının çevresel açıdan pozitif etkilerini belirlemek amacıyla hesaplanan son nokta etkileri ise WHR tesisinin kullanılmadığı durum ile karşılaştırmalı olarak Tablo 3.1’de verilmektedir.

Tablo 3.1. WHR tesisinin olmadığı durum ile WHR tesisinin olduğu durumun zarar değerlendirmesi sonuçlarının karşılaştırılması

Zarar kategorisi	Birim	WHR olmadan	WHR olması durumu	Değişim (%)
İnsan sağlığı	DALY	0,0004	0,0003	-19,01
Ekosistem kalitesi	PDF.m <sup>2</sup> .yr	28,328	27,661	-2,353
İklim değişikliği	kg CO <sub>2</sub> eq	884,48	877,85	-0,749
Kaynak kullanımı	MJ primary	2099,8	1941,0	-7,561

Tablodan görüldüğü gibi, işletme WHR tesisi ile elektrik enerjisi temin ederek, üretim faaliyetlerine bağlı insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkisini %19, ekosistem kalitesi üzerindeki olumsuz etkisini %2, kaynak kullanımı üzerindeki olumsuz etkisini %7, iklim değişikliği üzerindeki olumsuz etkisini ise %0,75 azaltmaktadır.

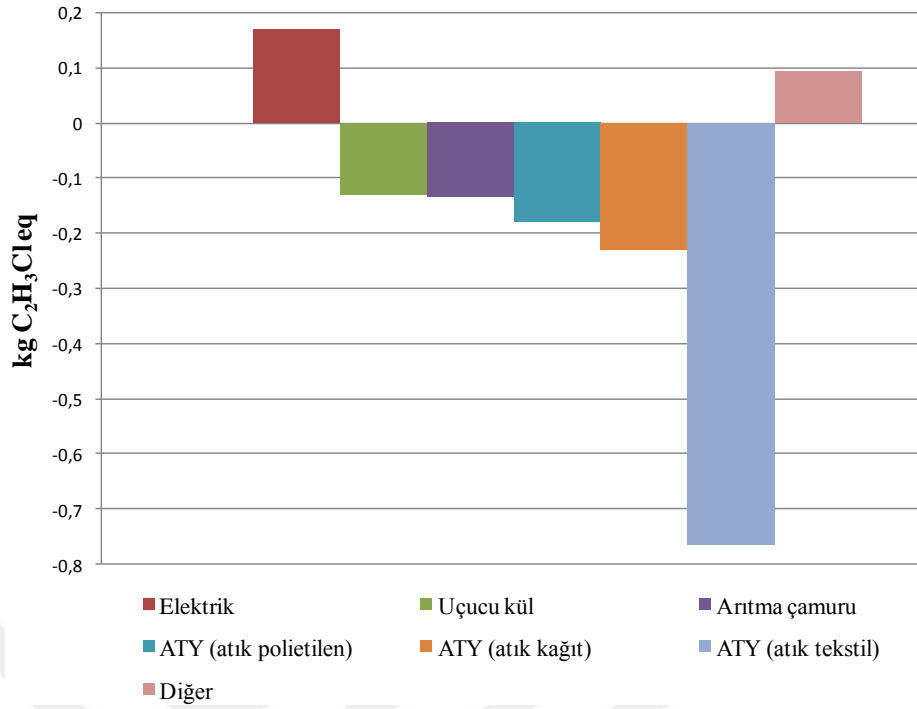
### 3.1.4. Karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırılması ve katkı analizleri

Geleneksel hammadde ve yakıtların kullanıldığı 2007 yılı ve alternatif hammadde ve yakıtların kullanıldığı 2013 yılı için, 1 ton klinker üretiminin beşikten kapıya yaklaşımı ile gerçekleştirilen yaşam döngüsü etki değerlendirme sonuçları Tablo 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.2. Orta nokta etki kategorisi karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

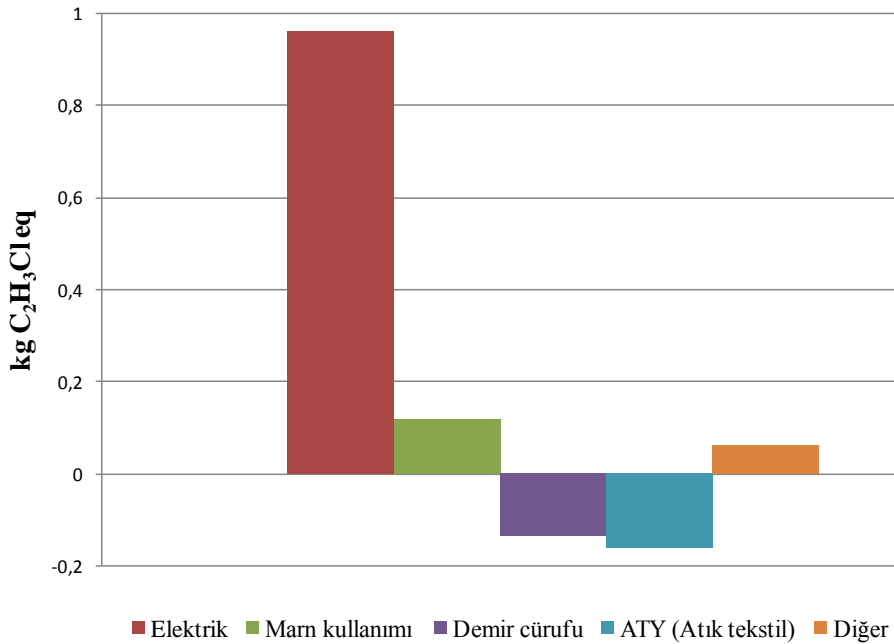
Etki kategorisi	Birim	GHY (2007)	AHY (2013)	Değişim (%)
<b>Kanserojenler</b>	kg C2H3Cl eq	1,78E+00	8,46E-01	-52,6
<b>Kanserojen olmayanlar</b>	kg C2H3Cl eq	4,72E-01	-1,17E+00	-349
<b>Solunabilir inorganikler</b>	kg PM2.5 eq	5,83E-01	4,36E-01	-25,3
<b>İyonize radyasyon</b>	Bq C-14 eq	1,71E+02	1,21E+02	-29,2
<b>Ozon tükenmesi</b>	kg CFC-11 eq	2,52E-06	1,92E-06	-23,9
<b>Solunabilir organikler</b>	kg C2H4 eq	2,83E-02	2,23E-02	-21,0
<b>Sucul ekotoksisite</b>	kg TEG water	9,75E+03	7,99E+03	-18,0
<b>Karasal ekotoksisite</b>	kg TEG soil	2,59E+03	2,48E+03	-4,29
<b>Karasal asid./nütri.</b>	kg SO2 eq	8,41E+00	6,75E+00	-19,8
<b>Arazi kullanımı</b>	m2org.arable	9,94E-01	5,80E-01	-41,7
<b>Sucul asidifikasyon</b>	kg SO2 eq	1,33E+00	1,05E+00	-21,2
<b>Sucul ötrofikasyon</b>	kg PO4 P-lim	1,08E-01	1,04E-01	-3,56
<b>Küresel ısınma</b>	kg CO2 eq	8,90E+02	8,78E+02	-1,40
<b>Yenilenemeyen enerji</b>	MJ primary	2,17E+03	1,93E+03	-11,3
<b>Maden çıkarma</b>	MJ surplus	6,91E+00	1,12E+01	+61,8

Tablo 3.2 incelendiğinde, maden çıkarma etki kategorisi dışındaki tüm etki kategorilerinde, alternatif hammadde ve yakıt kullanımına bağlı olarak (2013 yılında), 2007 yılına göre %1,4 ile %349 arasında değişen oranlarda azalma olduğu belirlenmiştir. 2013 yılında en önemli azalma kanserojen olmayanlar (%349) başta olmak üzere, kanserojenler (%52) ve arazi kullanımında (%42) görülmektedir. Genel olarak kanserojen ve kanserojen olmayanların artmasına neden olan faktörler elektrik tüketimi ve marn kullanımınıdır. Bununla birlikte, SimaPro yazılımında proses katkı analizi gerçekleştirildiğinde, kanserojen olmayan etki kategorisindeki azalmayı sağlayan en önemli faktörün, atıktan üretilmiş yakıt (ATY) içerisinde yer alan tekstil atıkları olduğu (%65) belirlenmiştir (Şekil 3.8). Bunun yanı sıra, yine ATY içerisinde yer alan atık kağıt ve atık polietilenler de, bu etki kategorisinde önemli düşüşü sağlamaktadır (sırasıyla; %19 ve %15).



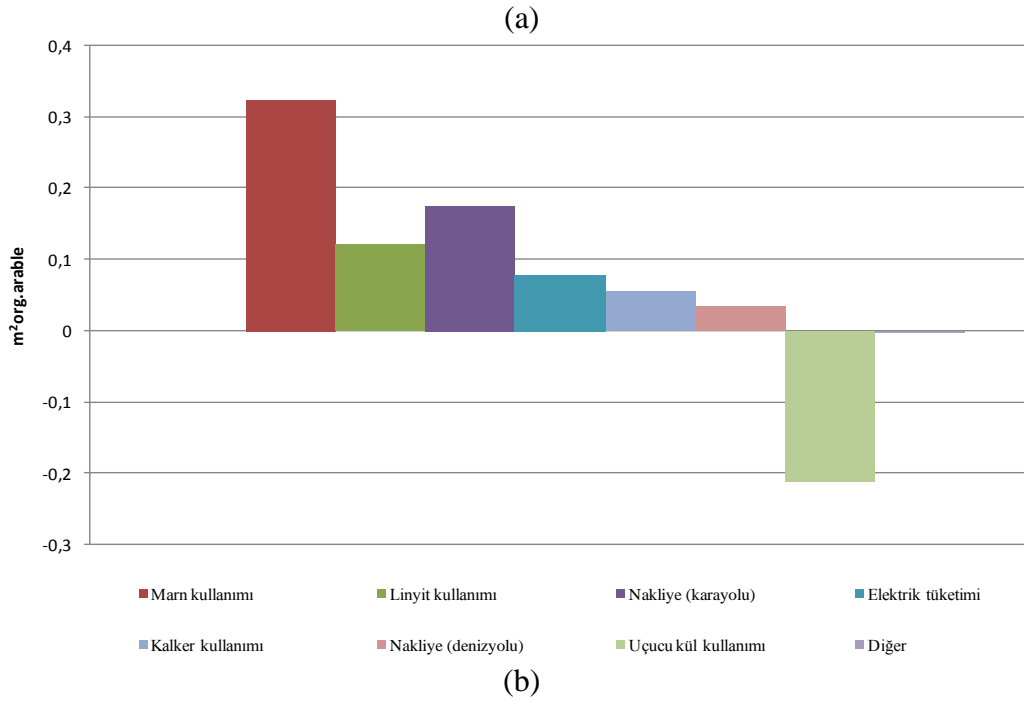
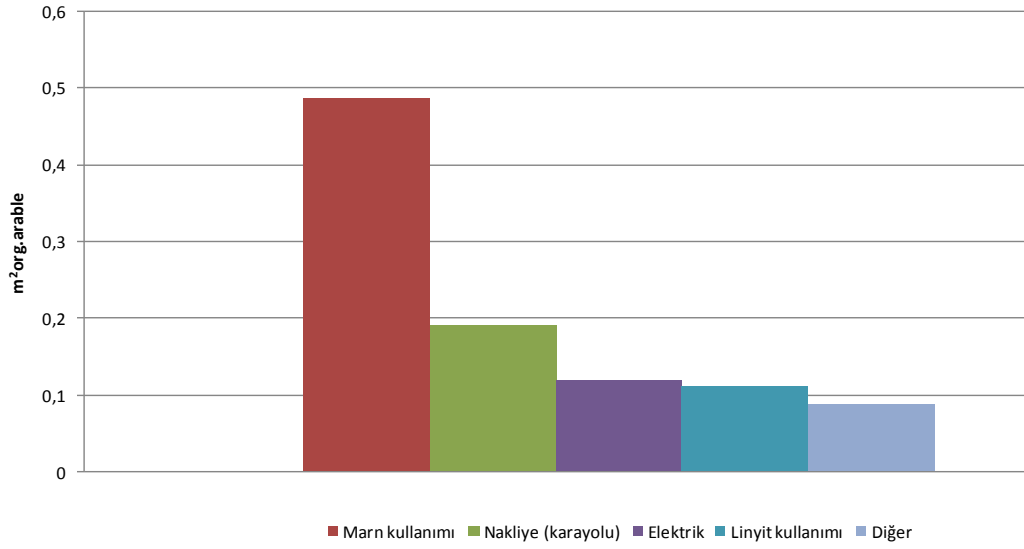
Şekil 3.8. Kanserojen olmayanlar için proses katkıları

Kanserojenlerin katkı analizleri yapıldığında da, kanserojen olmayan etki kategorisine benzer şekilde azalmayı sağlayan en önemli faktörün, ATY içerisinde yer alan tekstil atıkları ile ilişkili olduğu (%19) belirlenmiştir (Şekil 3.9). Buna ek olarak, alternatif hammadde olarak kullanılan demir cürufu da önemli miktarda (%16) azalma sağlamaktadır.



Şekil 3.9. Kanserojenler için proses katkıları

Önemli bir azalmanın görüldüğü diğer bir etki kategorisi olan arazi kullanımı, nakliye (karayolu ağı, tren yolu ağı vb.), maden çıkarma alanı, yapay dolgu, ekilebilir arazi, orman alanı, düzensiz depolama sahası, inşaat sahası ve endüstriyel bölge gibi faktörlerden etkilenmektedir. SimaPro yazılımında gerçekleştirilen katkı analizlerine göre, arazi kullanımına katkısı en yüksek faktörler 2007 yılında marn madenciliği ve nakliye iken; 2013 yılında marn ve linyit madenciliğidir. Arazi kullanımını etkileyen tüm faktörler 2007 ve 2013 yılı için, Şekil 3.10’da detaylıca verilmiştir.

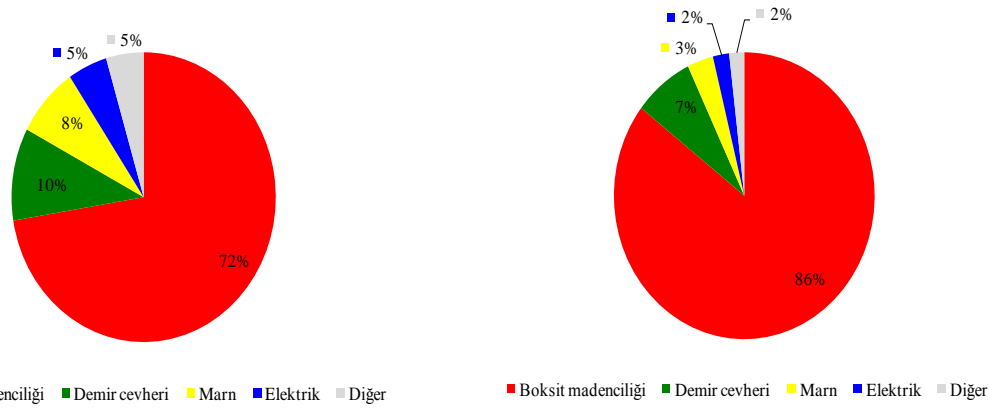


Şekil 3.10. GHY (a) ve AHY (b) durumunda arazi kullanımını etkileyen prosesler

Şekilden de görüldüğü gibi, 2013 yılında arazi kullanımı etki kategorisindeki azalmanın en önemli nedeni ise alternatif hammadde olarak kullanılan uçucu küldür.

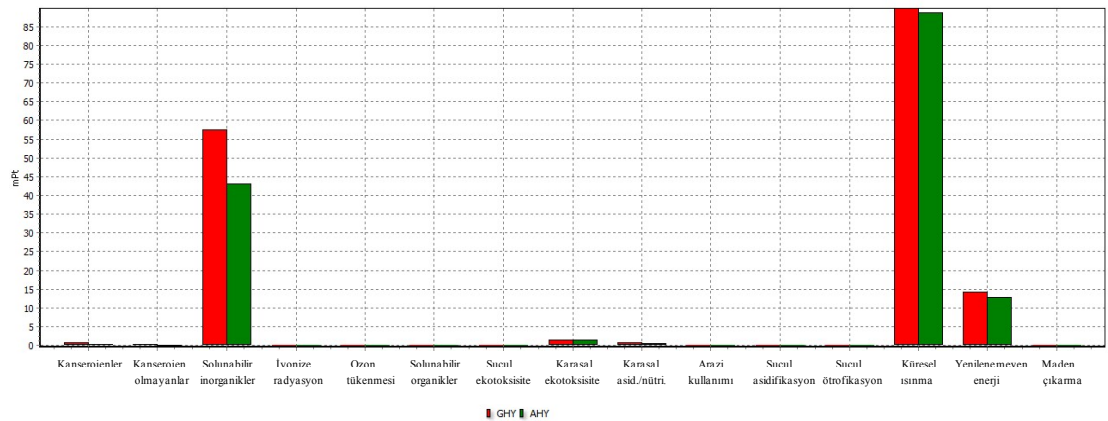
Ozon tükenmesindeki yaklaşık %24'lük azalma, Tablo 3.2'de dikkat çeken noktalardan biridir. Ozon tükenmesi, klorlu ve bromlu atomlar içeren dirençli kimyasalların antropojenik emisyonları nedeniyle ozon tahribatının artması ile oluşmaktadır ve CFC-11 eşdeğeri olarak ölçülmektedir (Stafford ve diğ. 2016b). 2007 yılında klinker üretiminin ozon tükenmesi üzerindeki etkisi  $2,52E-06$  kg CFC-11-eşd iken, bu değer %29'unun ( $7,3E-07$  kg CFC-11 eşd.) yakıt kullanımı ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. 2013 yılında klinker üretiminin ozon tükenmesi üzerindeki etkisi  $1,92E-06$  kg CFC-11-eşd. olarak hesaplanmış; ve bu değer %52,6'sının ( $1,01E-06$  kg CFC-11 eşd.) yakıt kullanımı ile ilgili olduğu belirlenmiştir. İki farklı yıl arasında, yakıt kullanımına bağlı oluşan ozon tükenmesi etkisi değerlendirildiğinde, petrokok kullanımının mevcut olduğu 2013 yılındaki değer daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. 2007 yılında ise klinker ve çimento üretiminde petrokok kullanımı mevcut değildir. Konu ile ilgili literatürde yapılan araştırmalar sonucunda da, petrokok kullanımının, rafinerideki üretimi esnasında önemli miktarda CFC emisyonlarına neden olduğu belirtilmektedir (Güereca ve diğ., 2015). Bu çalışmada ise 2013 yılında ozon tükenmesindeki yaklaşık %24'lük azalmanın ise, alternatif hammadde ve yakıt kullanımına bağlı olarak kullanımından kaçınılan fosil yakıtlar ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Tablo 3.2'de dikkat çeken diğer bir nokta ise, tüm orta nokta etkileri 2013 yılında azalırken, maden çıkarma etki kategorisindeki %61 oranındaki artıştır. Bu durum araştırıldığında, proses katkı analizine göre maden çıkarma faaliyetlerinin en çok boksit madenciliğinden etkilendiği görülmüştür (Şekil 3.11). Bu durumun nedeni, 2013 yılında 1 ton klinker için kullanılan boksit miktarının artışına bağlı olarak, boksit madenciliği faaliyetlerinin artması olarak açıklanabilir. 2007 ve 2013 yıllarına ait, maden çıkarma etki kategorisine katkısı olan parametreler, Şekil 3.11'de verilmektedir.



Şekil 3.11. 2007 ve 2013 yıllarında, maden çıkarma kategorisine katkısı olan parametreler

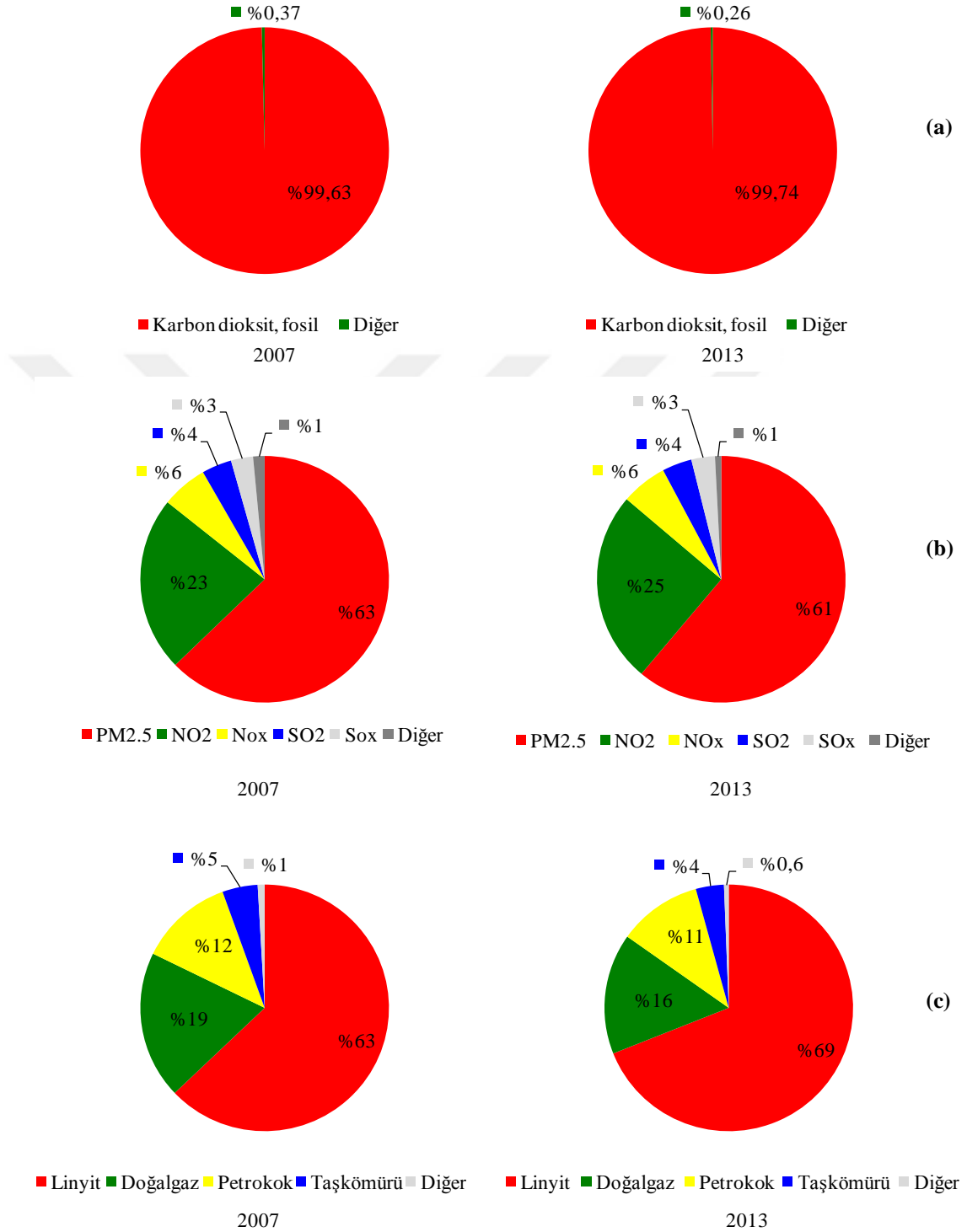
Şekil 3.12’de karakterizasyon sonuçlarına normalizasyon ve ağırlıklandırma işlemi uygulanarak, çevreye olumsuz etkisi en yüksek olan orta nokta etki kategorileri belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.12. AHY-GHY normalizasyon-midpointe göre

Şekil 3.12’de de görüldüğü gibi, küresel ısınma, solunabilir inorganikler ve yenilenemeyen enerji kullanımı klinker üretimine bağlı olarak oluşan en önemli etki kategorilerini oluşturmaktadır. Benhelal ve diğ. (2013) de çimento endüstrisi yaşam döngüsü değerlendirmesinde en etkili kategorileri küresel ısınma ve solunabilir inorganikler olarak belirlemiştir. Yaşam döngüsü envanter analizi sonuçları detaylı bir şekilde araştırıldığında, küresel ısınmayı etkileyen en önemli parametrenin CO<sub>2</sub>-fossil; solunabilir inorganikleri etkileyen en önemli parametrelerin PM<sub>2.5</sub> (yaklaşık %62) ve NO<sub>2</sub> (yaklaşık %23); yenilenemeyen enerjiyi etkileyen en önemli parametrelerin ise linyit ve doğalgaz kullanımı olduğu görülmüştür. Bu

parametrelerin, 2007 ve 2013 yılları arasındaki değişimleri ise Şekil 3.13' de verilmektedir.

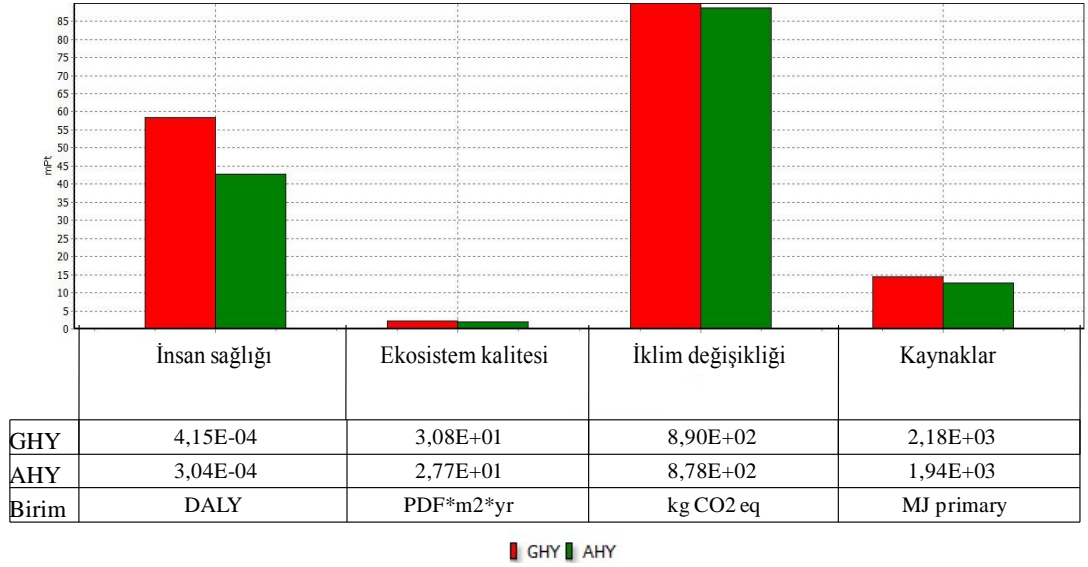


Şekil 3.13. Küresel ısınma (a), solunabilir inorganikler (b) ve yenilenemeyen enerji (c) kategorilerini etkileyen parametreler



### 3.1.5. Zarar değerlendirmesi (son nokta etkilerinin) sonuçlarının karşılaştırılması

Belirlenen karakterizasyon sonuçlarına ek olarak, zarar değerlendirmesi yapılmış ve sonuçlara normalizasyon ve ağırlıklandırma işlemi uygulanarak, klinker üretiminde asıl göze çarpan etki kategorileri belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 3.14’de son nokta değerlerine ait sonuçlar ve normalizasyon ve ağırlıklandırma işlemleri sonrası değerler görülmektedir. Klinker üretiminin, son nokta etki kategorisi olarak tanımlanan iklim değişikliği, insan sağlığı ve kaynak kullanımı üzerinde önemli etkileri olduğu görülmektedir. 2007 yılında toplam etkinin % 55’ ini iklim değişikliği; %35’ini insan sağlığı, %14’n ise kaynak kullanımı oluşturmaktadır. 2013 yılında ise toplam etkinin %61’ini iklim değişikliği; %29’unu insan sağlığı, %13’n ise kaynak kullanımı oluşturmaktadır.



Şekil 3.14. 2007 ve 2013 yılı için son nokta değerlerine ait sonuçlar

Zarar değerlendirme sonuçları, alternatif hammadde ve yakıt kullanımına bağlı olarak insan sağlığı etkisinin %27, ekosistem kalitesinin %10, kaynak kullanımının %11 ve iklim değişikliğinin %1,4 azaldığını göstermiştir.

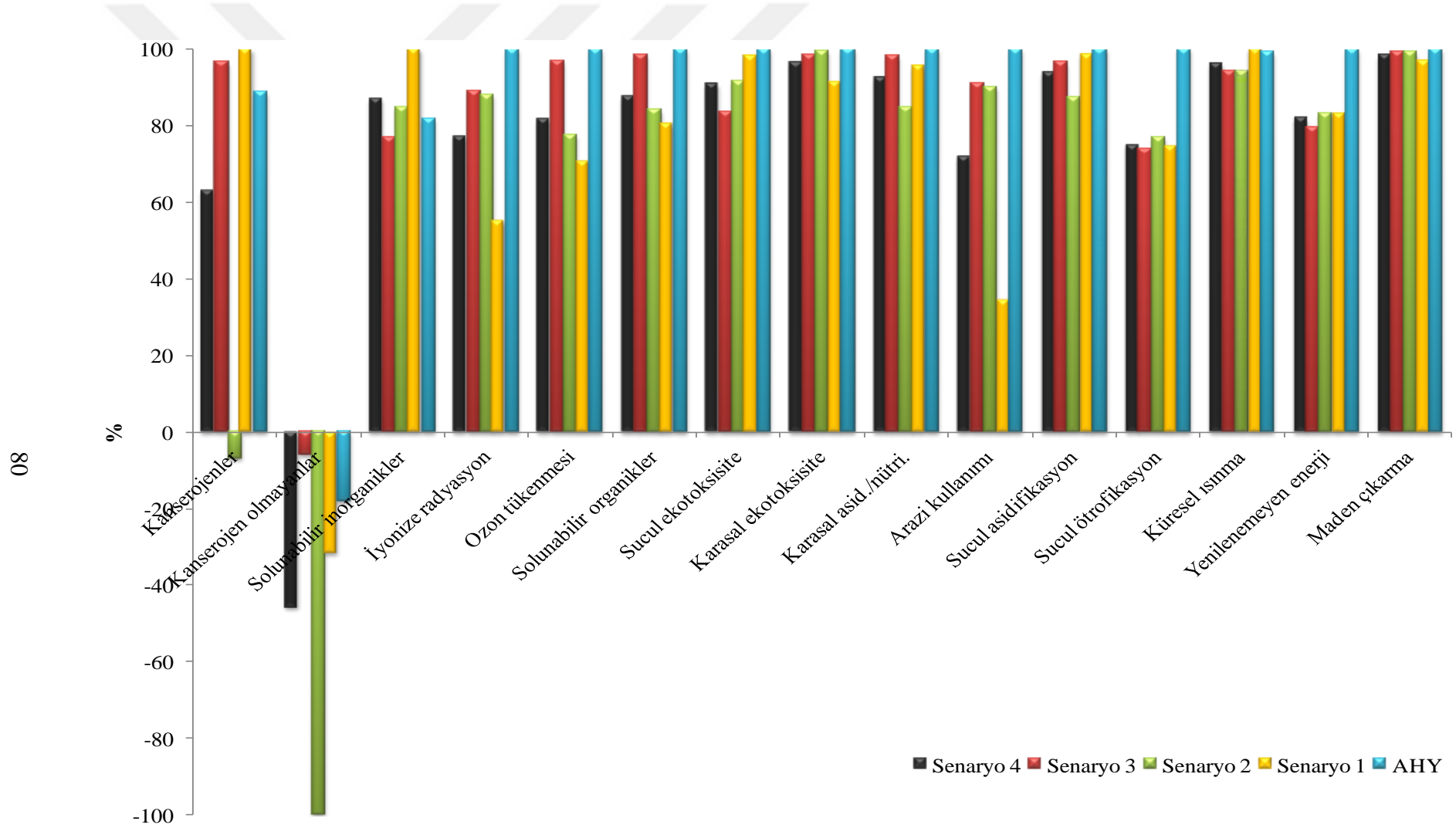
İklim değişikliği, tamamen küresel ısınma etki kategorisiyle ilişkili olmakla birlikte; her iki yıl için de, insan sağlığına en yüksek katkısı olan orta nokta kategorisinin solunabilir inorganikler; kaynak kullanımına en yüksek katkısı olan orta nokta kategorisinin ise yenilenemeyen enerji kullanımı olduğu belirlenmiştir.

Çimento üretiminden kaynaklanan temel sera gazı CO<sub>2</sub>'dir (Huntzinger ve Eatmon 2009). Klinker üretiminde CO<sub>2</sub> emisyonlarını belirleyen temel faktörler enerji verimliliği ve gerekli ısıyı temin etmek için kullanılan yakıt karışımıdır. Bunların yanısıra, klinker üretiminde kullanılan karbonlu malzemelerin miktarı da önem taşımaktadır (Boesch ve Hellweg, 2010). Bu tez çalışmasında, bir ton klinker üretimi nedeniyle oluşan küresel ısınma potansiyeli 2007 yılı için 890 kg CO<sub>2</sub>-eşdeğeri, 2013 yılı için ise 878 kg CO<sub>2</sub>-eşdeğeri olarak hesaplanarak, alternatif hammadde ve yakıt kullanımı ile 12 kg CO<sub>2</sub>-eşd./t.klinker tasarruf sağlandığı belirlenmiştir. 2007 yılında bu değer %93'ü; 2013 yılında ise %95'i fırında yakma prosesinden kaynaklanmaktadır. Bunun yanı sıra elektrik tüketimi de az miktarda etkilidir. Elektrik tüketimine bağlı olarak oluşan küresel ısınma potansiyeli ise toplam oluşan küresel ısınma potansiyeli içinde 2007 yılında %4,8 (42,3 kg CO<sub>2</sub> eşd/t.klinker); 2013 yılında ise %3'lük (28,5 kg CO<sub>2</sub> eşd/t.klinker) paya sahiptir.

### **3.1.6. Alternatif senaryoların karşılaştırılması**

2013 yılındaki %3'lük alternatif yakıt kullanımına alternatif olarak oluşturulan termal enerjinin %15'inin alternatif yakıtlarla sağlandığı senaryolara ait orta nokta etkilerinin karakterizasyon sonuçları Şekil 3.15'de verilmektedir.

Şekil incelendiğinde, mevcut durum ve tüm senaryolar için kanserojen olmayan etki kategorisinin pozitif çevresel etkisi olduğu ilk başta göze çarpmaktadır. Kanserojen olan etki kategorisi incelendiğinde ise, %15 ATY kullanımının olduğu Senaryo 2 dikkat çekmektedir. Kanserojen etki kategorisi, çamur kullanımı ve atık yağ kullanımının olduğu senaryolarda artış gösterirken (Senaryo 1 ve Senaryo 3), Senaryo 2'de pozitif çevresel etkiye sahiptir. Bu durumun, Senaryo 2'de alternatif yakıt olarak kullanılan ATY'nin içeriği ile ilişkili olduğu söylenebilir.



Şekil 3.15. Mevcut durum (2013) ve %15 alternatif yakıt ikamesi ile oluşturulan senaryoların etkilerinin karşılaştırılması

Şekil incelendiğinde göze çarpan bir başka nokta ise; mevcut durumdan daha çevre dostu bir yaklaşım olacağı düşünülen %15'lik kuru çamur kullanımının olduğu Senaryo 1'in çevresel etkileridir. Senaryo 1, kanserojenler, solunabilir inorganikler ve küresel ısınma etki kategorileri üzerinde en yüksek katkısı olan senaryodur. Bu durumun, 1 ton kuru çamur üretmek için gerekli olan yüksek miktarda elektrik enerjisi tüketimi (616 kWh/t.kuru çamur) olduğu düşünülmektedir. İşletmenin bu aşamada doğrudan çevresel etkisi olmamakla birlikte; satın aldığı elektriğin üretimi aşamasında oluşan çevresel etkilere (dolaylı etkiler) bağlı olarak Senaryo 1'in belirtilen etki kategorilerindeki katkısı yüksektir. Bununla birlikte; iyonize radyasyon, ozon tükenmesi, solunabilir organikler, karasal ekotoksosite, arazi kullanımı ve maden çıkarma etki kategorilerinde ise en avantajlı senaryonun termal enerjinin %15'inin kuru çamur ile sağlandığı Senaryo 1 olduğu görülür.

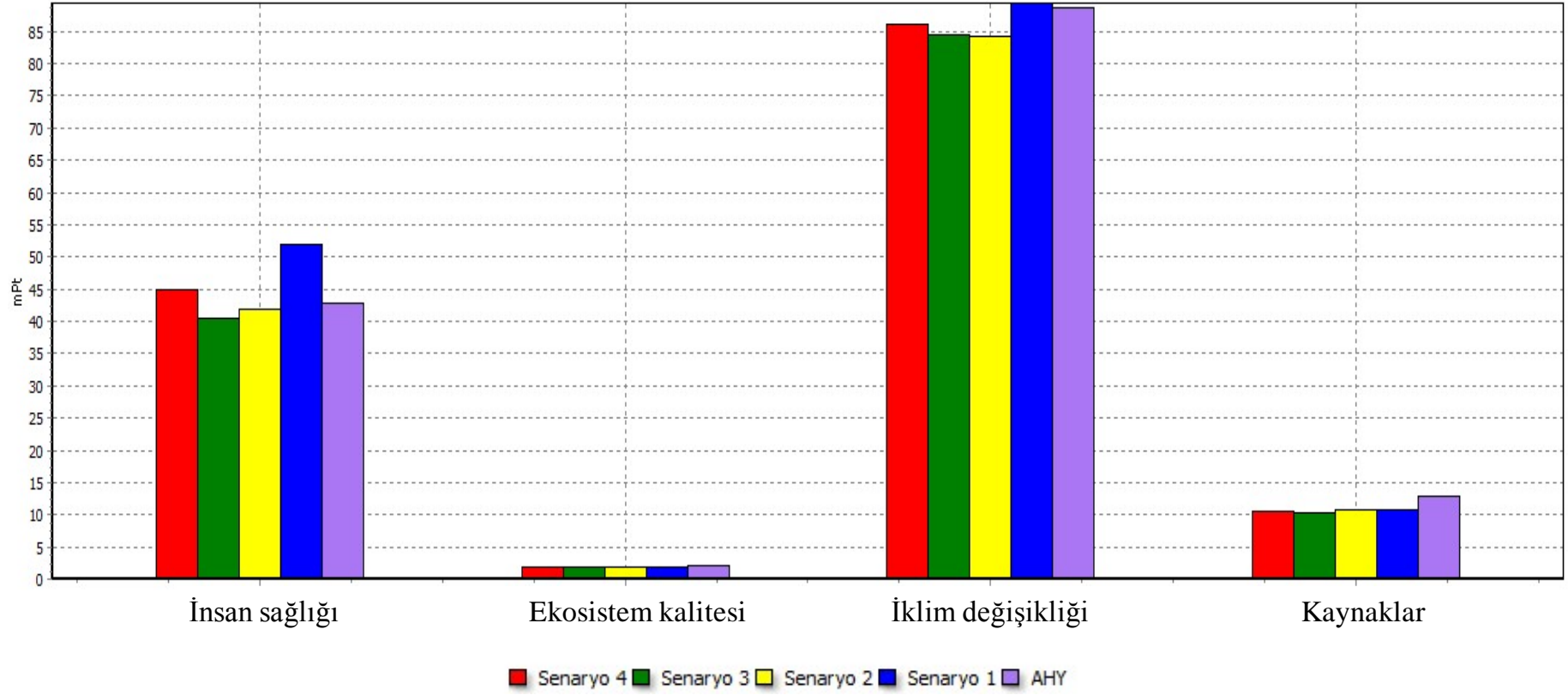
Küresel ısınma potansiyelleri Senaryo 1, Senaryo 2, Senaryo 3 ve Senaryo 4 için sırasıyla; 885 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri, 835 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri, 836 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri ve 852 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, en yüksek küresel ısınma potansiyelinin, Senaryo 1 için bulunduğu görülmektedir. Bu çalışma ile benzer olarak, Hong ve diğ. (2009), farklı çamur bertaraf yöntemlerinin çevresel etkilerini yaşam döngüsü değerlendirmesi yaklaşımıyla belirledikleri çalışmasında, termal kurutma ile kurutulan 1 ton çamurun küresel ısınma potansiyelinin diğer yöntem göre en yüksek olduğu sonucuna varmıştır (1300 kg CO<sub>2</sub>-eşd/t.kuru çamur). 2013 yılına göre küresel ısınma potansiyellerindeki en önemli azalma, termal enerjinin %15'inin ATY ile sağlandığı Senaryo 2 için belirlenmiştir (%4,9). Çalışma kapsamında bulunan sonuçlara göre, alternatif yakıt olarak ATY kullanımının, 1 ton klinker üretiminde yaklaşık 43 kg CO<sub>2</sub> eşdeğerinin azalmasını sağladığı belirlenmiştir (1,42 kg CO<sub>2</sub>/kg.ATY). Literatürde benzer konuda yapılmış çalışmalarda farkı sonuçlar elde edilmiştir. Genon ve Brizio (2008), 1 kg ATY kullanımının, 1,61 kg CO<sub>2</sub> eşdeğerinde azalmayı sağladığını; bir çalışma ise 1 kg ATY kullanımının 0,72 kg CO<sub>2</sub> eşdeğerinde azalmayı sağladığını tespit etmiştir. Bourtsalas ve diğ. (2018), geri dönüştürülemeyen plastik ve kağıt atıklarının alternatif yakıt olarak çimento üretiminde kullanımını, yaşam döngüsü yaklaşımıyla değerlendirdikleri çalışmalarında ise, 1 ton alternatif yakıt kullanımının 3 ton CO<sub>2</sub> emisyonu azalımı sağladığı sonucuna varmışlardır. Reza ve diğ. (2013) tarafından

yapılan bir çalışmada ise, 1 ton ATY kullanımının yaklaşık 3,8 ton CO<sub>2</sub>-eşd. azalma sağladığı belirlenmiştir. Beher ton ATY başına ortaya çıkan CO<sub>2</sub>-eşd. miktarındaki bu değişikliğin, ATY içeriği ile de ilgili olabileceği düşünülmektedir.

Sonuçlar, sucul asidifikasyon açısından değerlendirildiğinde, küresel ısınma potansiyeli ile benzer olarak en yüksek değerin Senaryo 1'e ait olduğu; bunu sırasıyla; senaryo 2, senaryo 3 ve senaryo 4'ün takip ettiği görülmektedir. Hong ve diğ. (2009) de yapmış oldukları çalışmada, termal kurutma işleminin en yüksek asidifikasyon potansiyeline sahip olduğunu belirlemişlerdir. Sucul ötrofikasyon etkisi dikkate alındığında ise, alternatif senaryolar arasında %15 ATY kullanımının olduğu Senaryo 2'de en yüksek sucul ötrofikasyon etkisinin olduğu görülmüştür. Şekil incelendiğinde, ATY kullanımının sucul ötrofikasyonu, maden çıkarmayı ve karasal ekotoksositeyi arttırırken; küresel ısınma ve sucul asidifikasyonu azalttığı dikkat çekmiştir. Bu konuda gerçekleştirilen literatür araştırması sonunda da, bu durum ile benzer olarak; klinker üretiminde ATY kullanımının, ötrofikasyon etkisini arttırdığı, buna karşılık küresel ısınma ve asidifikasyon etkisini azalttığı belirlenmiştir (Panahandeh ve diğ., 2017).

Karasal asidifikasyon/nütrifikasyon etkisinin, tehlikeli atıklar ile termal enerjinin sağlandığı Senaryo 1, Senaryo 3 ve Senaryo 4'te yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Literatürde gerçekleştirilmiş bir çalışmada da, karasal ötrofikasyon etkisinin, fosil yakıtlar yerine atıkların kullanıldığı durumlarda artış gösterdiği tespit edilmiştir. Aynı çalışmada bu durumun, tehlikeli atıkların yanması sonucu açığa çıkan NO<sub>x</sub>'lerden kaynaklandığı yorumu yapılmıştır (Holt, 2016). Senaryoların ekotoksosite üzerindeki etkileri araştırıldığında ise, sucul ekotoksositeyi en olumsuz etkileyen senaryonun kuru çamur kullanılan Senaryo 1; karasal ekotoksositeyi en olumsuz etkileyen senaryonun ise ATY kullanılan Senaryo 2 olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, kuru çamur kullanımının karasal ekotoksosite üzerindeki olumsuz etkisi en düşüktür.

Senaryolara ait çevresel etkilerin önem derecelerinin daha iyi tespit edilebilmesi amacıyla gerçekleştirilen normalizasyon ve ağırlıklandırma sonrası oluşturulan grafik Şekil 3.16'da verilmiştir.

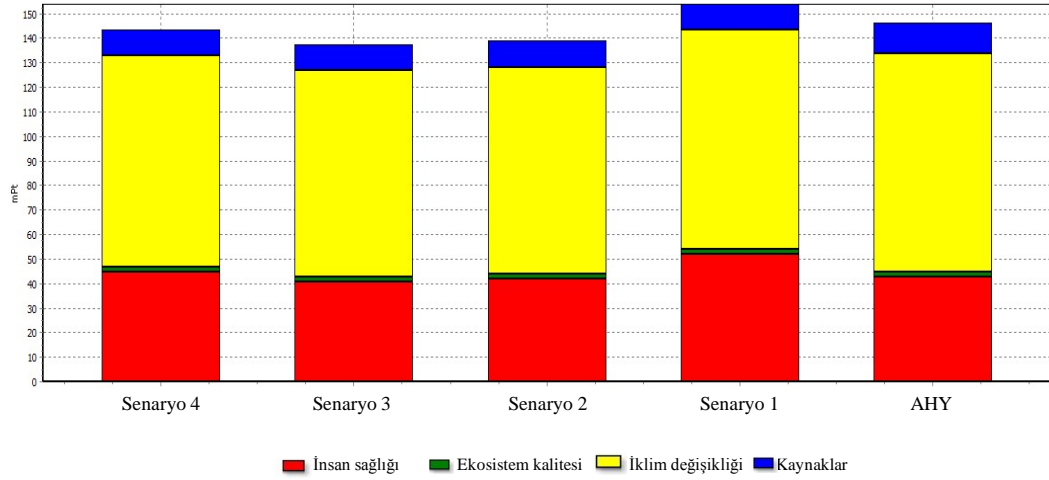


Şekil 3.16. Mevcut durum (AHY) ve Senaryo 1-4 için zarar değerlendirmesi sonuçları

Son nokta metoduna dayanan zarar değerlendirme sonuçlarının sunulduğu grafik incelendiğinde; küresel ısınma ve insan sağlığı etkisinin klinker üretimine bağlı oluşan en önemli çevresel etkiler olduğu görülür. Literatürde de benzer şekilde, klinker ve imento üretiminin en çok iklim değişikliği ve insan sağlığını etkilediğine dair çalışmalar mevcuttur (Ali ve diğ., 2014; Ruan ve Unluer, 2016; Abuşoğlu ve diğ. 2017).

Sonuçlar, iklim değişikliği etki kategorisi temelinde değerlendirildiğinde; iklim değişikliğine en yüksek katkının Senaryo 1'e ait olduğu belirlenmiştir. İklım değişikliği son nokta etkisi tamamen küresel ısınma etki kategorisi (orta nokta) ile ilgili olduğundan, Senaryo 1'deki küresel ısınma potansiyeli ile ilgili yapılan tüm değerlendirmeler bu kategori için de geçerlidir. Alternatif senaryoların, insan sağlığı üzerindeki katkıları değerlendirildiğinde ise, en yüksek katkının, iklim değişikliğinde olduğu gibi Senaryo 1'e ve en düşük katkının ise %15 atık yağ kullanımının olduğu Senaryo 3'e ait olduğu dikkat çekmektedir.

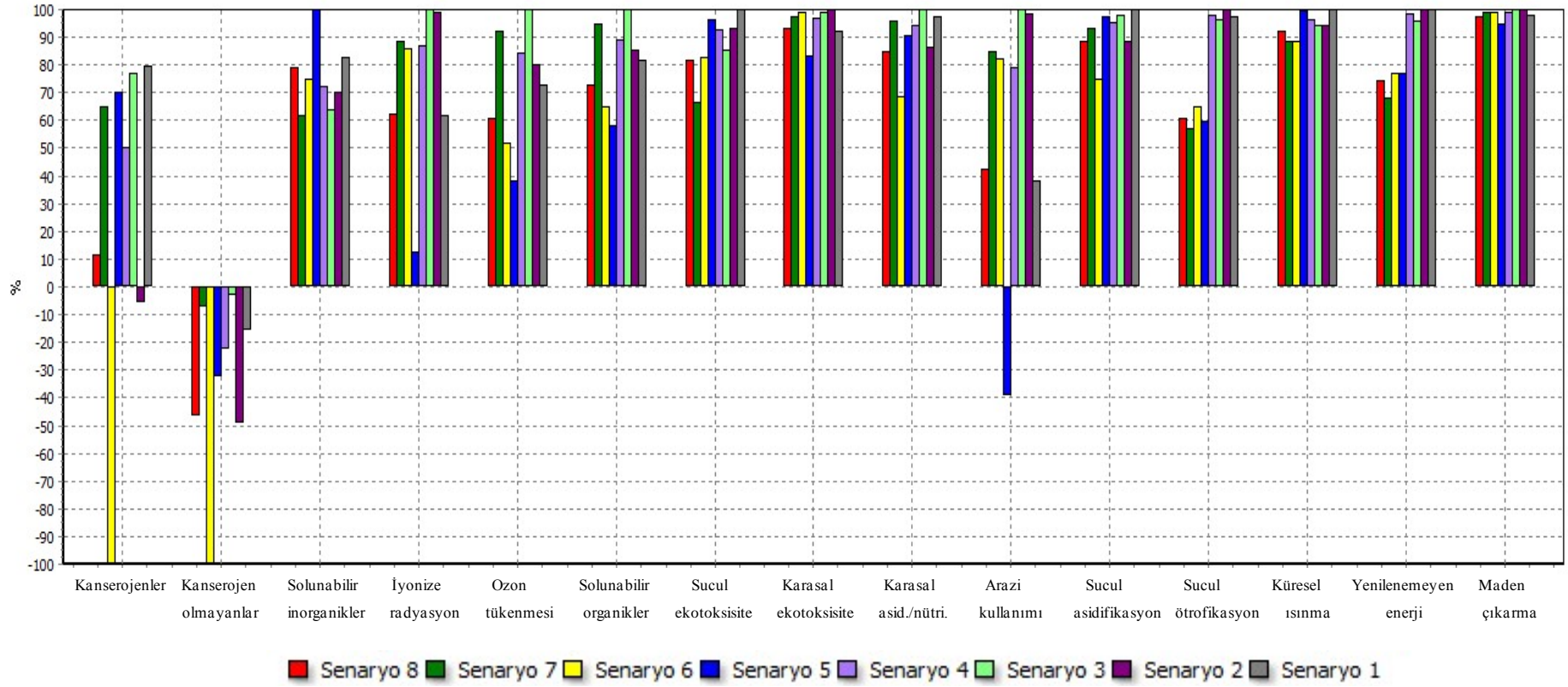
şekil 3.17'de ise mevcut durum ve %15 alternatif yakıt kullanımının olduğu 4 farklı senaryo için hesaplanan eko puanlar verilmiştir. Mevcut durum olan AHY, Senaryo 1, Senaryo 2, Senaryo 3 ve Senaryo 4 için hesaplanan eko puanlar sırasıyla; 146, 154, 139, 137 ve 143'tür. Mevcut durum ve 4 senaryo için, bu değerlerin ortalama %60'ını iklim değişikliği; %30'unu ise insan sağlığı etkisi oluşturmaktadır. şekilden de grldğu gibi, %15 atık yağ kullanılan Senaryo 3 ve %15 ATY kullanılan Senaryo 2, evre dostu yaklaşımlar olarak nitelendirilebilir. Atık yağlardan enerji eldesi yöntemlerinin çevresel etkilerinin YDD ile karşılaştırıldığı bir çalışmada, imento fırınında yakılması yönteminin, bazı karbonların klinker içinde tutunması sayesinde, küresel ısınma potansiyeli açısından en evre dostu yaklaşım olduğu belirlenmiştir. (Kanokkantung ve diğ., 2009).



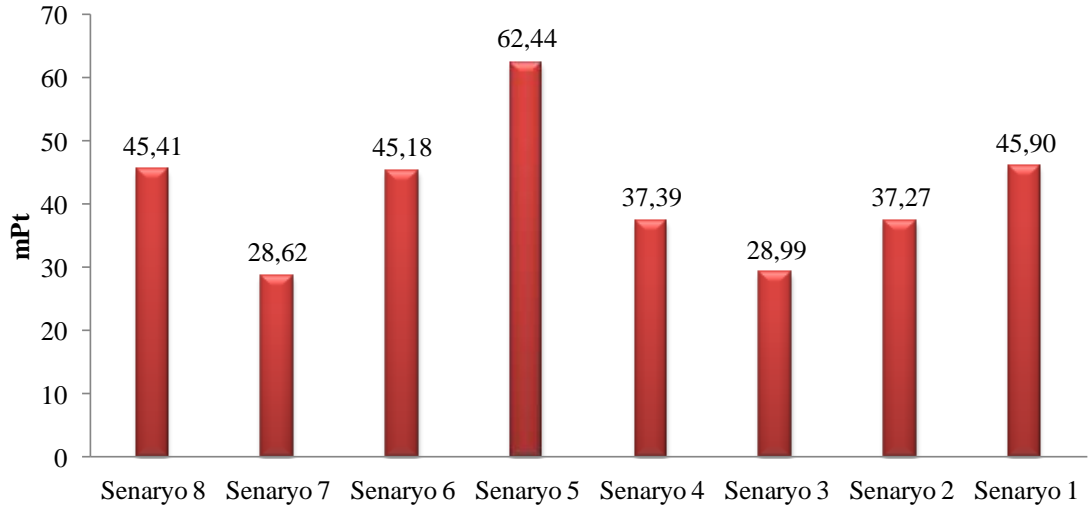
Şekil 3.17. Mevcut durum (AHY) ve Senaryo 1-4 için eko puan grafiği

Termal enerjinin %15'inin alternatif yakıtlar ile sağlandığı senaryolar (Senaryo 1-4) ve alternatif yakıt kullanımı artırılarak oluşturulan (termal enerjinin %30'u) senaryoların (Senaryo 5-8) orta nokta metodu ile belirlenen çevresel etkileri Şekil 3.18'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, alternatif yakıt ikamesi arttırıldığında, solunabilir inorganikler dışındaki tüm orta nokta etkilerinde değişen oranlarda azalma olduğu görülmektedir. Solunabilir inorganikler etki kategorisindeki artış ise, alternatif yakıt olarak kuru çamur ve/veya ATY'nin kullanıldığı senaryolarda (Senaryo 1,2,4,5,6,8) mevcuttur. Bunun nedeninin, bahsedilen senaryolarda, klinker üretimi prosesine ek olarak çamur kurutma prosesi ve ATY hazırlanması için tüketilen elektrik olduğu düşünülmektedir. Nitekim, alternatif yakıt olarak sadece atık yağların kullanıldığı ve direkt olarak döner fırına verildiği senaryolarda (Senaryo 3,7), solunabilir inorganik etkisi de alternatif yakıt ikamesiyle doğru orantılı olarak azalmaktadır. Şekil 3.19'da, senaryolardaki elektrik tüketimlerinin çevresel etkileri eko puan cinsinden gösterilmektedir. Özellikle alternatif yakıt olarak sadece kuru çamurun kullanıldığı senaryolarda (Senaryo 1 ve 5), çamur kurutma işleminde önemli miktarda elektrik tüketilmekte ve dolayısıyla elektrik tüketimine bağlı etkiler de ciddi oranda artmaktadır (yaklaşık %36).



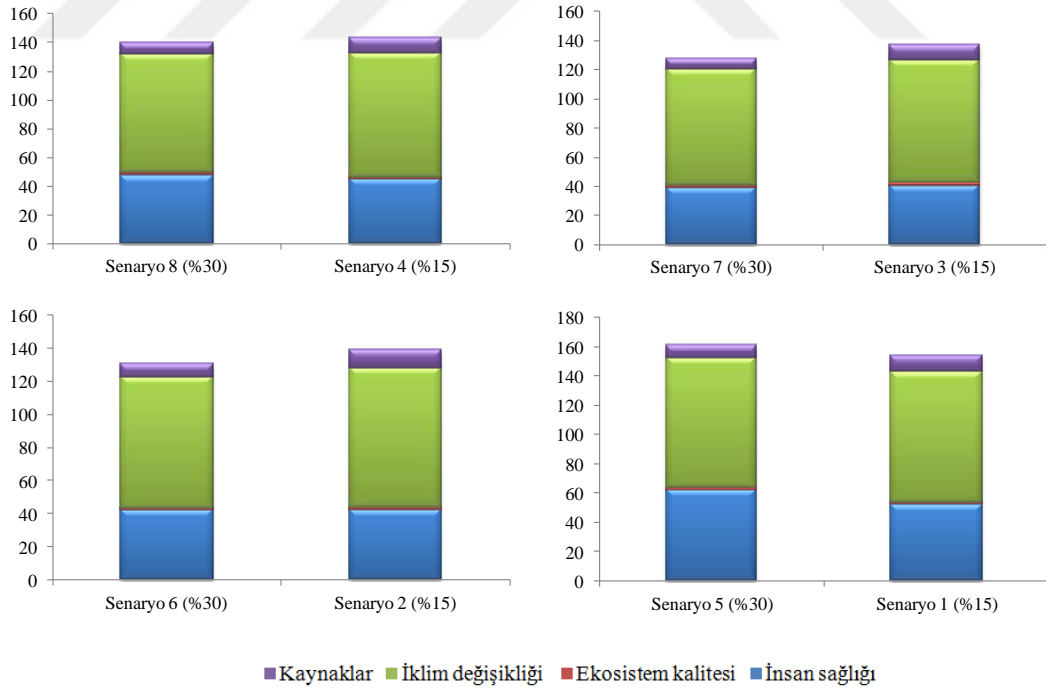


Şekil 3.18. Alternatif senaryoların (Senaryo 1-8) karakterizasyon sonuçları



Şekil 3.19. Alternatif senaryolarda elektrik tüketimlerine göre oluşan çevresel etkiler

Termal enerjinin %15'inin alternatif yakıtlar ile sağlandığı senaryolara ek olarak; termal enerjinin %30'unun alternatif yakıtlarla sağlanması durumunda son nokta metoduna göre belirlenen çevresel etkiler ise karşılaştırmalı olarak (eko puan cinsinden) Şekil 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3.20. %15 ve %30 ikame durumları için senaryoların eko puanlarının karşılaştırılması

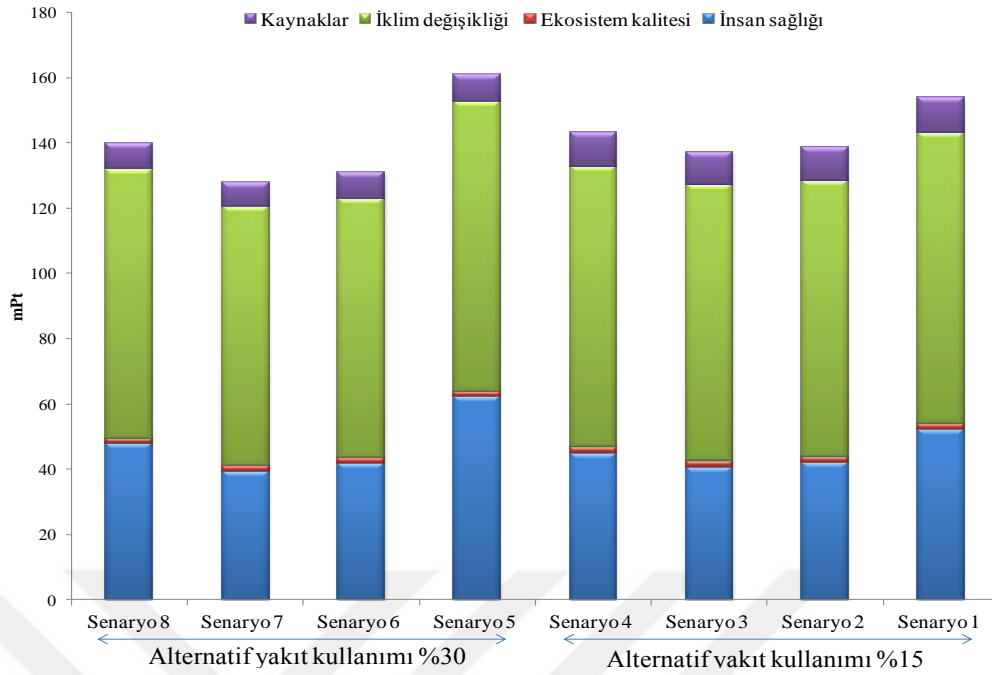
Şekil 3.20 incelendiğinde; Senaryo 6, 7 ve 8'de alternatif yakıt kullanımındaki artışa bağlı olarak, beklenen bir durum olarak eko puanlarda azalma olduğu sonucuna

varılmıştır. En yüksek azalma Senaryo 7’de (% 6,6) olmakla birlikte; bunu sırasıyla Senaryo 6 (%5,8) ve Senaryo 8 (%2) takip etmektedir. Şekilde dikkat çeken nokta ise, Senaryo 6, 7 ve 8’deki çevresel etkilerin azalmasına rağmen Senaryo 5’deki %4’lük bir artıştır. Senaryo 5’te son nokta etkileri ayrı ayrı dikkate alındığında ise; kuru çamur kullanımındaki artışın kaynaklar, iklim değişikliği ve ekosistem kalitesi üzerindeki olumsuz etkisi azalmasına rağmen; insan sağlığı üzerindeki artışın fazlalığı nedeniyle toplam etkilerde artış olduğu görülmüştür. Envanter sonuçları incelendiğinde ve katkı analizleri gerçekleştirildiğinde insan sağlığı kategorisindeki artışın, çamur kurutma prosesindeki yüksek elektrik enerjisi tüketimi (616 kWh/t.kuru çamur) ile alakalı olabileceği sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla, alternatif yakıt olarak kullanılan kuru çamurun miktarı arttıkça, kaynaklar, iklim değişikliği ve ekosistem kalitesi üzerindeki olumsuz etkiler sırasıyla %23, %0,38 ve %10 azalmakla birlikte; artan elektrik kullanımına bağlı olarak insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkisi yaklaşık %20 artmaktadır.

Klinker ve çimento üretiminin en önemli etkilerinden olan iklim değişikliği etkisindeki azalma açısından olaya yaklaşıldığında ise, iklim değişikliğindeki en önemli azalmanın termal enerjinin %30’unun ATY ile sağlandığı Senaryo 6’da olduğu görülmüştür (%6,25). Termal enerjinin %30’unun atık yağ ile sağlandığı Senaryo 7’de iklim değişikliği kategorisi %6, Senaryo 8’de ise %4 azalmıştır.

Yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirilen senaryolar arasında en çevre dostu senaryonun tespit edilmesi amacıyla oluşturulan grafik Şekil 3.21’de verilmektedir. Buna göre, iklim değişikliğinin toplam çevresel etkiler içerisindeki payı senaryolara göre %55-62 arasında; insan sağlığının toplam çevresel etkiler içindeki payı ise %29-39 arasında değişmektedir.

Şekil 3.21 incelendiğinde, en çevre dostu senaryonun termal enerjinin %30’unun atık yağlar ile sağlandığı 7. Senaryo olduğu görülecektir. Bununla birlikte, termal enerjinin %30’unun ATY ile sağlandığı 6. Senaryo da, çevre dostu olması açısından alternatif yakıt kullanımında temel alınabilecek senaryolar arasında nitelendirilebilir.



Şekil 3.21. Tüm senaryoların çevresel etkilerinin eko puan cinsinden gösterilmesi

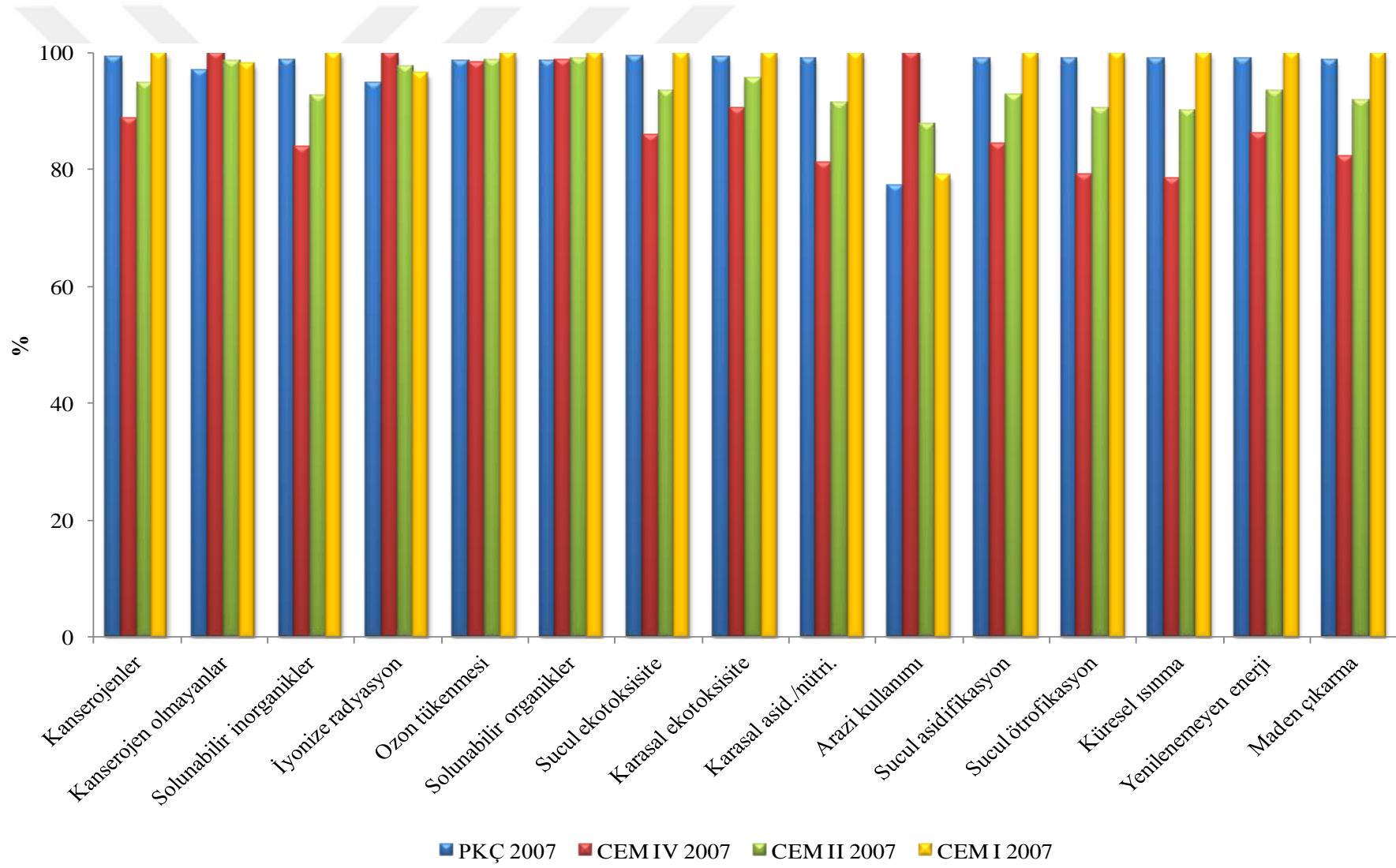
## 3.2. Çimento Üretiminin Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme Sonuçları

### 3.2.1. 2007 yılı

İşletmede üretimi gerçekleştirilen CEM I, CEM II, CEM IV ve PKÇ tipi çimentolara ait yaşam döngüsü etki değerlendirmesi karakterizasyon sonuçları, fonksiyonel birim 1 ton olmak üzere Şekil 3.22’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, beklenen bir sonuç olarak; klinker oranlarındaki azalmaya bağlı olarak, genellikle CEM IV tipi çimentonun üretimine bağlı oluşan çevresel etkilerin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Kanserojenler, solunabilir inorganikler, ozon tükenmesi, sucul ekotoksosite, karasal ekotoksosite, karasal asid./nütri., sucul asidifikasyon ve ötrofikasyon, küresel ısınma, yenilenemeyen enerji ve maden çıkarma etki kategorilerindeki en düşük katkı CEM IV tipi çimentoya aittir. Buna karşılık; kanserojen olmayanlar, iyonize radyasyon ve arazi kullanımı etki kategorilerinde ise CEM IV tipi çimentonun yüksek katkısı dikkat çekmektedir. SimaPro yazılımında katkı analizlerinde bu durumun nedenleri araştırıldığında; kanserojen olmayan etki kategorisindeki artışın tras kullanımı; iyonize radyasyon ve arazi kullanımındaki artışın ise nakliye işlemleri ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

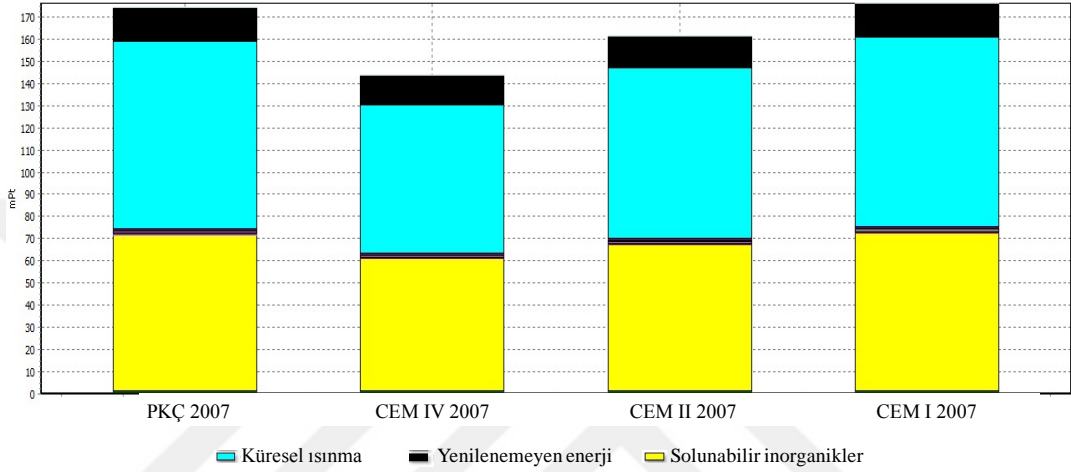
Çimento tipleri için belirlenen çevresel etkiler, küresel ısınma ve iklim değişikliği temelinde ele alındığında; en yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip çimento tipinin CEM I tipi çimento olduğu görülür. Bir ton CEM I tipi çimento üretimine bağlı olarak 850 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri oluşmaktadır. Bu değer CEM II, CEM IV ve PKÇ için sırasıyla; 766 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri, 666 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri ve 841 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri olarak belirlenmiştir. Beklenen bir durum olarak, klinker/çimento oranının en düşük olduğu CEM IV tipi çimentonun küresel ısınma üzerindeki etkisi de en düşüktür.





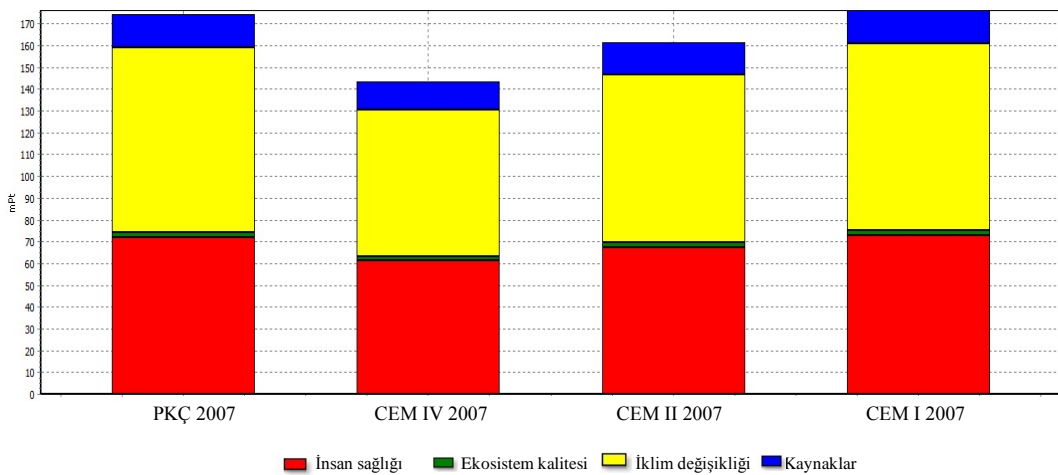
Şekil 3.22. 2007 yılı için farklı çimento türlerinin karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 3.23’de orta nokta karakterizasyon sonuçları verilen çimento tiplerinin, en önemli etki kategorilerinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan ekopuan grafiği verilmiştir. Şekil incelendiğinde, tüm çimento tipleri için en önemli etki kategorilerinin küresel ısınma, solunabilir inorganikler ve yenilenemeyen enerji olduğu dikkat çekmektedir. Diğer 12 etki kategorisi, şekilde de görüldüğü gibi çevresel etkilerin çok düşük bir kısmını oluşturmaktadır.



Şekil 3.23. 2007 yılındaki durum için orta nokta etkileri temelinde eko puan grafiği

Şekil 3.24’de ise her bir çimento tipi için hesaplanan eko puanlar zarar kategorileri temelinde değerlendirilmektedir.



Şekil 3.24. 2007 yılındaki durum için son nokta etkileri temelinde eko puan grafiği

Eko puan grafiği de, CEM IV tipi çimentonun en evre dostu imento tipi olduğunu destekler niteliktedir. Bir ton CEM I, CEM II, CEM IV ve PK tipi imento için eko puanlar sırasıyla; 176, 161, 144 ve 174 olarak belirlenmiştir.

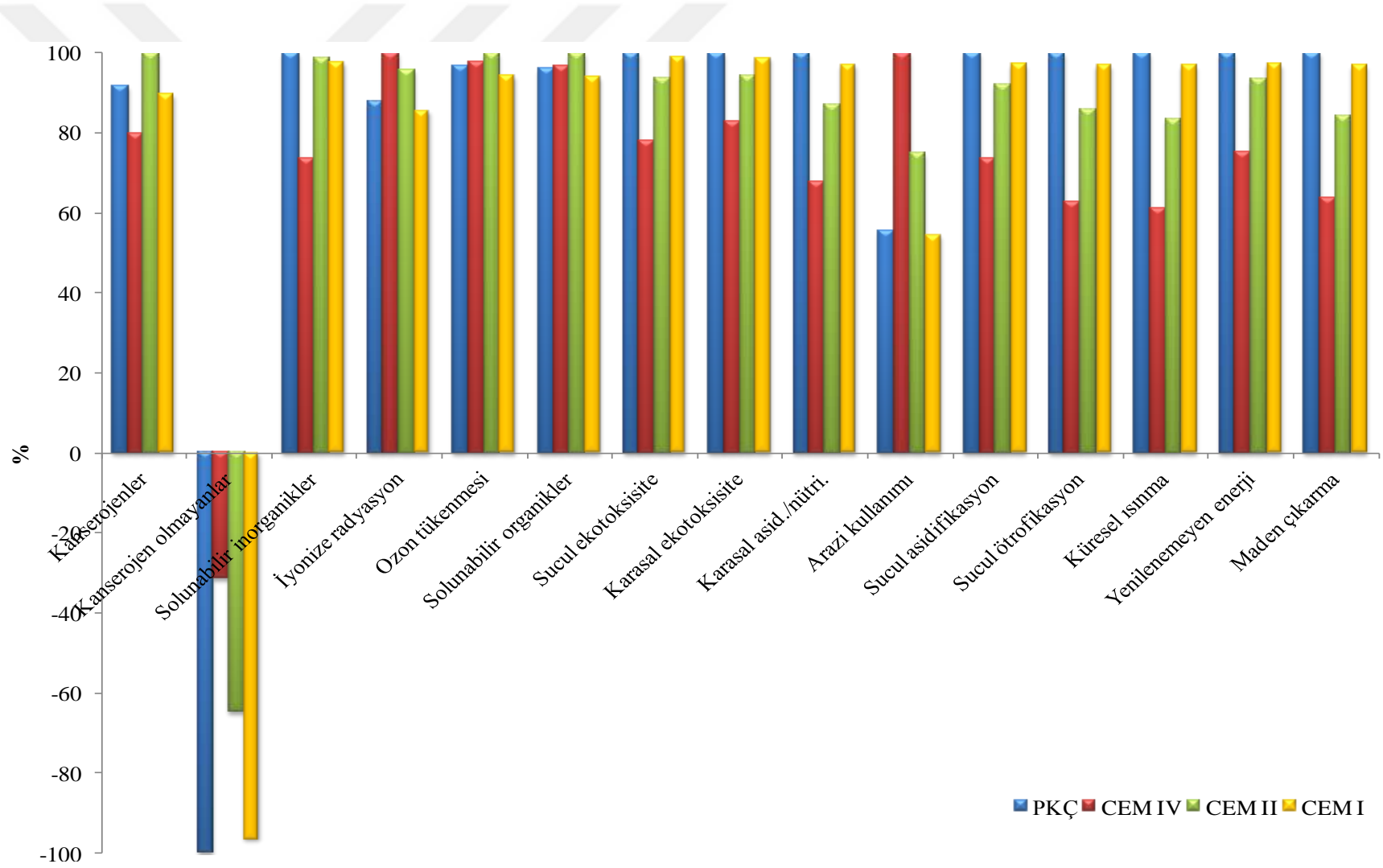
PK tipi ve CEM I imentonun üretiminde kullanılan klinker ve katkı maddesi oranları birbirine çok yakın olduğu için, çevresel etkileri birbirine oldukça benzer bulunmuştur. Bu iki imento tipinin çevresel etkilerinin %49'u iklim değişikliği, %41'i insan sağlığı, %8,7'si kaynak kullanımı, yaklaşık %1,3'ü ise ekosistem kalitesi ile ilişkilidir. CEM II tipi çimentonun evre üzerindeki olumsuz etkilerinin %47'sini iklim değişikliği, %43'ünü insan sağlığı, %9,2'sini kaynak kullanımı ve %1,4'ünü ekosistem kalitesi etkileri oluşturmaktadır. Bu değerler CEM IV tipi imento için ise sırasıyla; %48, %42, %9,2 ve %1,35 olarak bulunmuştur. Zarar kategorilerinin, toplam ekopuanlar içindeki payları incelendiğinde, imento üretimine bağlı en önemli son nokta etkilerinin iklim değişikliği ve insan sağlığı olduğu dikkat çekmektedir.

### **3.2.2. 2013 yılı**

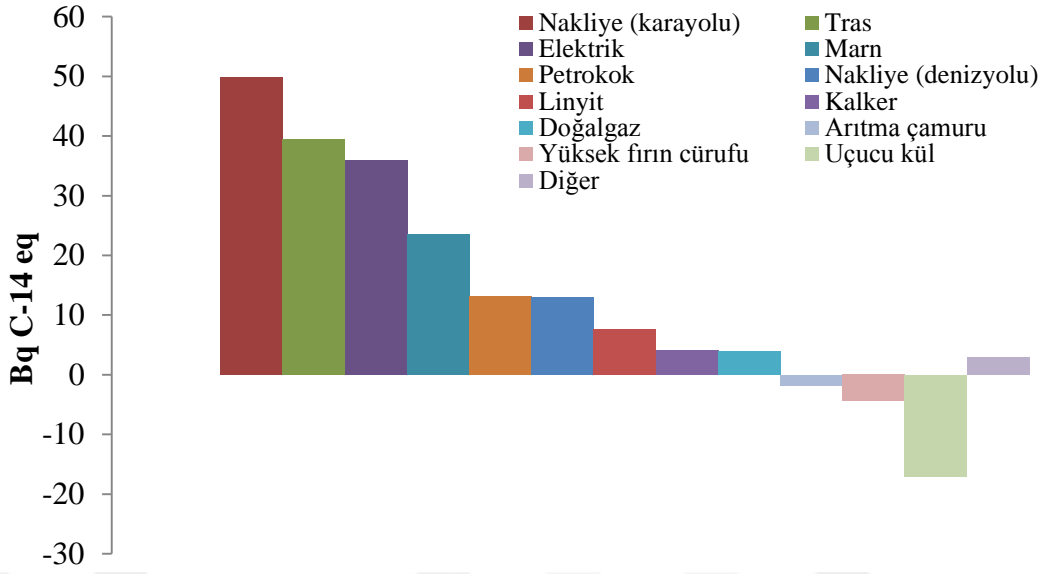
Alternatif hammadde ve yakıtların kullanıldığı 2013 yılındaki durumda, 1 ton CEM I, CEM II, CEM IV ve PK tipi imento üretimi sonucunda oluşan çevresel etkiler Şekil 3.25'de sunulmuştur.

Kanserojenler, solunabilir inorganikler, sucul ve karasal ekotoksosite, karasal asid./nütri., sucul asidifikasyon ve ötrofikasyon, küresel ısınma, yenilenemeyen enerji ve maden çıkarma etki kategorileri, 2007 yılında olduğu gibi 2013 yılında da CEM IV tipi imento üretimi için en düşük değerlerde bulunmuştur. İyonize radyasyon ve arazi kullanımı etkilerinde ise en yüksek katkı CEM IV tipi imentonundur. Bunu, CEM II tipi imento takip etmektedir. CEM II ve CEM IV tip çimentonun ortak özelliği, ikisinde de diğer imento tipleri üretiminden farklı olarak kullanılan trastır. Bahsedilen durum, katkı analizleri gerçekleştirilerek araştırılmış ve sonuçlar Şekil 3.26 ve Şekil 3.27'de sunulmuştur.

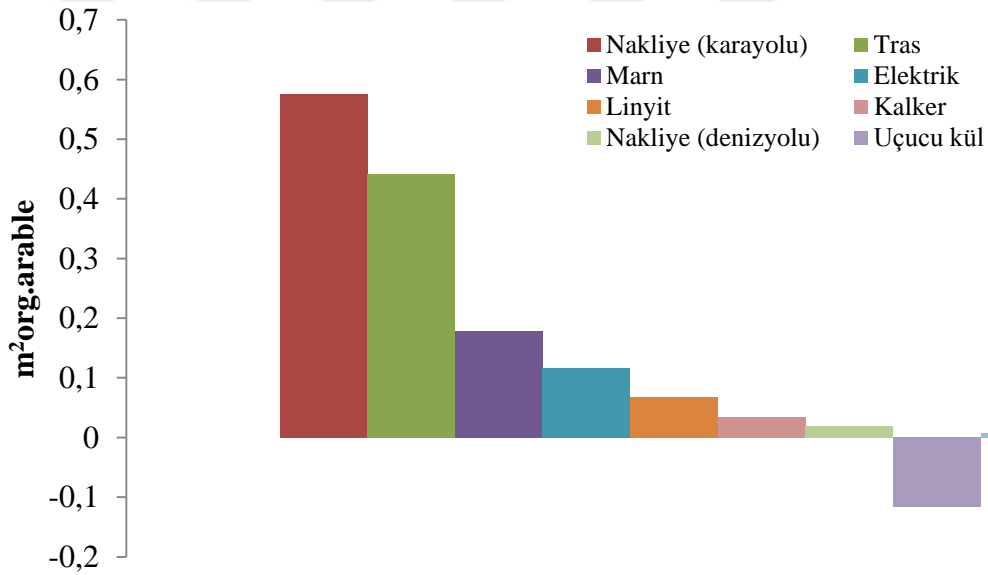




Şekil 3.25. 2013 yılı için farklı çimento türlerinin karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 3.26. CEM IV tipi çimentoda iyonize radyasyonu etkileyenler



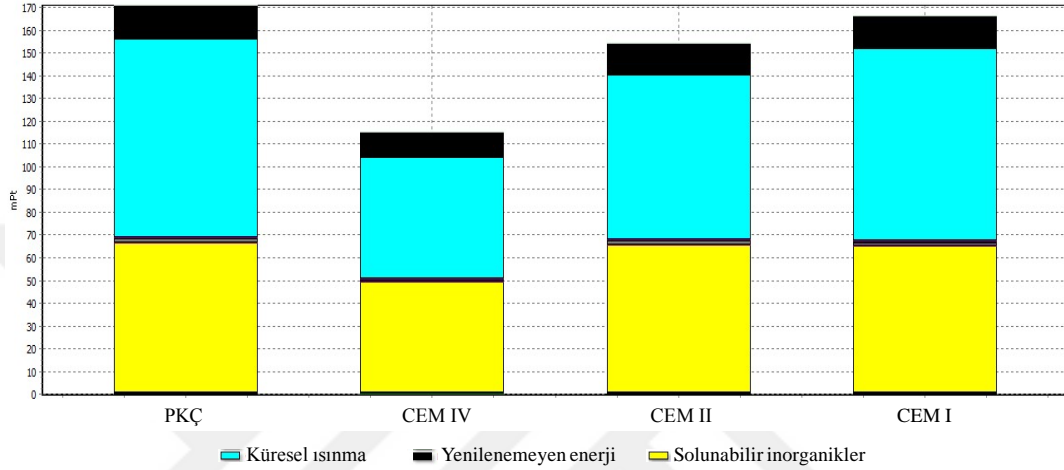
Şekil 3.27. CEM IV tipi çimentoda arazi kullanımını etkileyenler

Şekillerden, iyonize radyasyon ve arazi kullanımında en etkili proseslerin nakliye ve tras kullanımı olduğu görülmektedir.

Şekil 3.25 incelendiğinde, CEM II tipi çimentonun kanserojenler, ozon tükenmesi ve solunabilir organikler üzerindeki etkilerinin en yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca solunabilir inorganikler üzerindeki etkisinin de CEM I tipi çimentodan yüksek olması dikkat çekicidir. Çalışma kapsamındaki veri envanterleri incelendiğinde, çimento tipleri arasındaki en yüksek elektrik tüketiminin CEM II tipi çimento için olduğu belirlendiğinden (55 kWh/t.çimento), bu durumun elektrik

tüketiminin fazlalığı ile ilgili olduğu düşünülmektedir. CEM I, CEM IV ve PKÇ tipi çimento üretimi için tüketilen elektrik miktarları ise sırasıyla; 43,8 kWh/t.çimento, 40 kWh/t.çimento ve 44,5 kWh/t.çimento'dur.

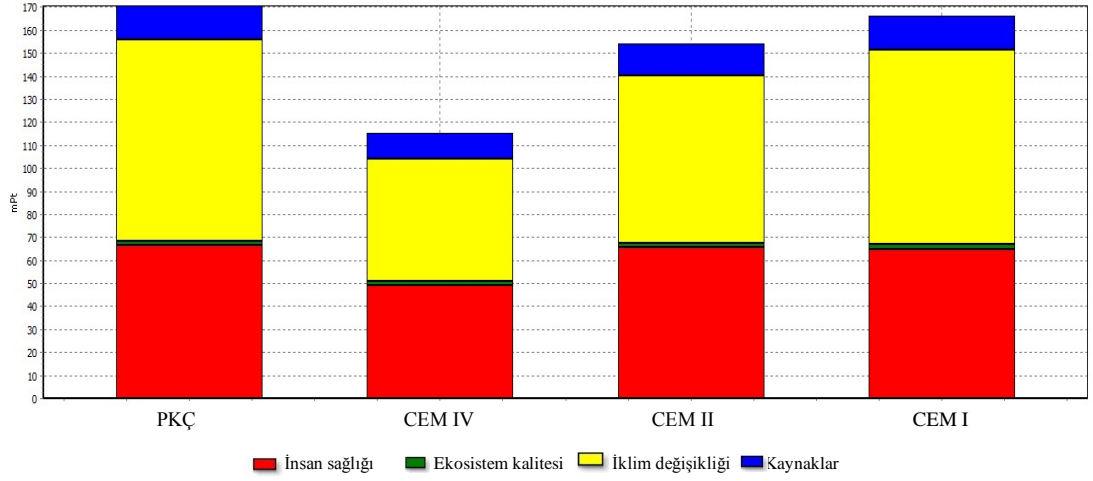
Orta nokta karakterizasyon sonuçları verilen çimento tiplerinin, en önemli etki kategorilerinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan grafik Şekil 3.28'de sunulmaktadır.



Şekil 3.28. 2013 yılındaki durum için orta nokta etkileri temelinde eko puan grafiği

Şekilde görüldüğü gibi, tüm çimento tipleri için en önemli orta nokta kategorileri sırasıyla; küresel ısınma, solunabilir inorganikler ve yenilenemeyen enerji kullanımınıdır.

Çevresel etkiler, son nokta etkileri açısından değerlendirildiğinde ise (zarar değerlendirmesi) Şekil 3.29'daki gibi bir grafik elde edilmektedir. Bu grafiğe göre, 2007 yılında olduğu gibi, 2013 yılında da CEM IV tipi çimentonun en çevre dostu çimento tipi olduğunu dikkat çekmektedir. Bir ton CEM I, CEM II, CEM IV ve PKÇ tipi çimento için hesaplanan eko puanları sırasıyla; 166, 154, 115 ve 171'dir.



Şekil 3.29. 2013 yılındaki durum için son nokta etkileri temelinde eko puan grafiği

PKÇ tipi ve CEM I çimentonun çevresel etkilerinin %51'i iklim değişikliği, %39'u insan sağlığı, %8,7'si kaynak kullanımı, yaklaşık %1,2'si ise ekosistem kalitesi ile ilişkilidir. CEM II tipi çimentonun çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin %47'sini iklim değişikliği, %42'sini insan sağlığı, %9'unu kaynak kullanımı ve %1,3'ünü ekosistem kalitesi etkileri oluşturmaktadır. Bu değerler CEM IV tipi çimento için ise sırasıyla; %46, %43, %9,7 ve %1,5 olarak bulunmuştur. Zarar kategorilerinin, toplam ekopuanlar içindeki payları incelendiğinde, çimento üretimine bağlı en önemli son nokta etkilerinin iklim değişikliği ve insan sağlığı olduğu sonucuna varılmıştır.

Çimento tipleri için belirlenen çevresel etkiler, iklim değişikliği açısından ele alındığında ise; alternatif hammadde ve yakıtlarla üretimin gerçekleştirildiği 2013 yılında, en yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip çimento tipinin PKÇ (Petrol kuyusu çimentosu) tipi çimento olduğu görülür. Bir ton PKÇ tipi çimento üretimine bağlı olarak 864 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri olduğu sonucuna varılmıştır. Bu değer CEM I, CEM II ve CEM IV tipi çimentolar için sırasıyla; 838 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri, 721 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri ve 529 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri olarak belirlenmiştir.

### 3.2.3. 2007 ve 2013 yıllarındaki çimento üretiminin çevresel etkilerinin karşılaştırılması

Tablo 3.3’de alternatif hammadde ve yakıtların kullanıldığı 2013 yılı ile geleneksel hammadde ve yakıtların kullanıldığı 2007 yılında üretimi gerçekleştirilen 4 farklı çimento tipine ait karakterizasyon sonuçları verilmiştir.

Yıllar bazında, çimento tiplerine bağlı oluşan etki kategorileri değerlendirildiğinde, maden çıkarma dışında tüm kategorilerde (özellikle kanserojen ve kanserojen olmayan etki kategorileri), alternatif hammadde ve yakıtların kullanıldığı yıl olan 2013 yılında, 2007 yılına göre azalmanın olduğu belirlenmiştir. Maden çıkarma etki kategorisinde ise 2013 yılında, %27 (CEM IV) ile %66 (PKÇ) arasında değişen oranlarda artış olduğu belirlenmiştir. Envanter analizleri ve proses katkıları araştırıldığında, maden çıkarmadaki artışın, klinker üretimi ile benzer şekilde, 1 ton çimento üretimi başına kullanılan boksit miktarının artması ile ilişkili olduğu belirlenmiştir.

Tabloda dikkat çeken bir diğer nokta ise, PKÇ tipi çimento için, 2013 yılında küresel ısınma ve sucul ötrofikasyon üzerindeki yaklaşık %2,5’luk artıştır. Bir ton PKÇ tipi çimento üretimine bağlı oluşan küresel ısınma etkisi 2007 yılında 840,7 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri iken; 2013 yılında 864,2 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri olarak bulunmuştur. Sucul ötrofikasyon etkisi ise 2007 yılında 0,106 kg PO<sub>4</sub> P-lim bulunurken; 2013 yılında 0,109 kg PO<sub>4</sub> P-lim bulunmuştur. Bu sonucun, PKÇ tipi çimento üretiminde kullanılan klinker, alçı taşı ve kalkerin, 2007 ve 2013 yılları arasındaki kullanım oranlarının farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir. 2007 yılında 1 ton PKÇ çimentosu üretimi için 0,92 ton klinker, 0,05 ton alçı taşı ve 0,03 ton kalker kullanılırken; 2013 yılında 0,95 ton klinker ve 0,05 ton alçı taşı kullanılmaktadır. Kullanılan alçı taşı oranı değişmemekle birlikte, klinker oranındaki artışa bağlı olarak, küresel ısınma potansiyeli yaklaşık %2,8 artmıştır.

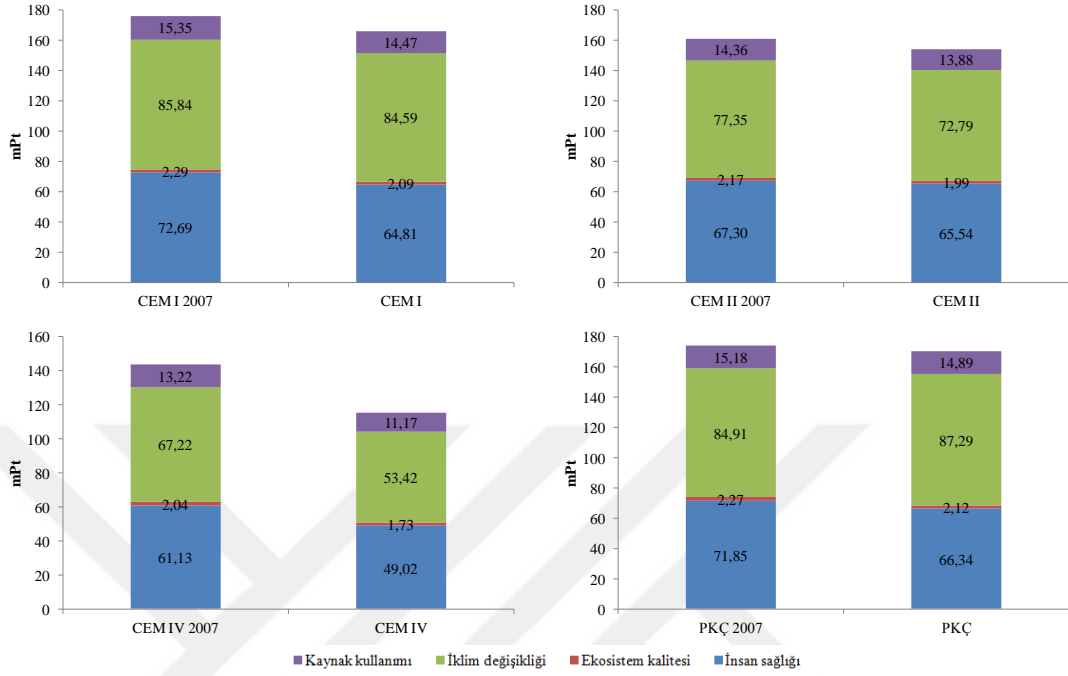
Tablo 3.3. Dört farklı çimento tipi için belirlenen çevresel etkiler

Etki kategorisi	Birim	PKÇ 2007	PKÇ	CEM IV 2007	CEM IV	CEM II 2007	CEM II	CEM I 2007	CEM I
<b>Orta nokta etkileri:</b>									
<b>Kanserojenler</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	2,34E+00	1,80E+00	2,10E+00	1,57E+00	2,24E+00	1,96E+00	2,36E+00	1,76E+00
<b>Kanserojen olmayanlar</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	5,70E-01	-9,29E-01	5,88E-01	-2,91E-01	5,79E-01	-6,01E-01	5,77E-01	-8,95E-01
<b>Solunabilir inorganikler</b>	kg PM <sub>2,5</sub> eq	7,16E-01	6,69E-01	6,08E-01	4,91E-01	6,70E-01	6,58E-01	7,25E-01	6,53E-01
<b>İyonize radyasyon</b>	Bq C-14 eq	1,84E+02	1,49E+02	1,94E+02	1,70E+02	1,90E+02	1,63E+02	1,88E+02	1,46E+02
<b>Ozon tükenmesi</b>	kg CFC-11 eq	2,67E-06	2,27E-06	2,67E-06	2,29E-06	2,68E-06	2,35E-06	2,71E-06	2,22E-06
<b>Solunabilir organikler</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	3,08E-02	2,72E-02	3,08E-02	2,74E-02	3,09E-02	2,84E-02	3,12E-02	2,67E-02
<b>Sucul ekotoksosite</b>	kg TEG water	9,99E+03	8,66E+03	8,63E+03	6,74E+03	9,39E+03	8,10E+03	1,00E+04	8,58E+03
<b>Karasal ekotoksosite</b>	kg TEG soil	2,65E+03	2,62E+03	2,41E+03	2,16E+03	2,55E+03	2,47E+03	2,67E+03	2,58E+03
<b>Karasal asid./nütri.</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	8,11E+00	6,90E+00	6,66E+00	4,67E+00	7,49E+00	6,01E+00	8,20E+00	6,71E+00
<b>Arazi kullanımı</b>	m <sup>2</sup> org.arable	1,08E+00	7,35E-01	1,40E+00	1,32E+00	1,23E+00	9,90E-01	1,11E+00	7,22E-01
<b>Sucul asidifikasyon</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	1,36E+00	1,18E+00	1,16E+00	8,70E-01	1,27E+00	1,09E+00	1,37E+00	1,15E+00
<b>Sucul ötrofikasyon</b>	kg PO <sub>4</sub> P-lim	1,06E-01	1,09E-01	8,51E-02	6,85E-02	9,73E-02	9,35E-02	1,08E-01	1,06E-01
<b>Küresel ısınma</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	8,41E+02	8,64E+02	6,66E+02	5,29E+02	7,66E+02	7,21E+02	8,50E+02	8,38E+02
<b>Yenilenemeyen enerji</b>	MJ primary	2,30E+03	2,25E+03	2,00E+03	1,69E+03	2,18E+03	2,10E+03	2,33E+03	2,19E+03
<b>Maden çıkarma</b>	MJ surplus	6,57E+00	1,09E+01	5,47E+00	6,95E+00	6,11E+00	9,17E+00	6,65E+00	1,06E+01
<b>Son nokta etkileri:</b>									
<b>İnsan sağlığı</b>	DALY	0,00051	0,00047	0,000434	0,000348	0,000477	0,000465	0,000516	0,00046
<b>Ekosistem kalitesi</b>	PDF.m <sup>2</sup> .yr	31,05468	29,10121	27,96735	23,74615	29,7369	27,25878	31,33507	28,63683
<b>İklim değişikliği</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	840,7388	864,2397	665,5409	528,883	765,8461	720,7201	849,8529	837,5508
<b>Kaynak kullanımı</b>	MJ primary	2307,301	2262,569	2008,392	1697,826	2182,32	2109,707	2332,889	2199,719

Etki kategorilerindeki değişimlerin oranları, çimento tipleri temelinde değerlendirildiğinde, önemli miktarda azalmaların genellikle CEM IV tipi çimentoda olduğu tespit edilmiştir. Küresel ısınma, sucul ötrofikasyon, yenilenemeyen enerji ve karasal ekotoksisite etkilerinin CEM IV tipi çimentodaki azalma oranları sırasıyla %21, %20, %16 ve %10 iken; bu oranlar diğer çimento tiplerinde %1 ile %5 arasında değişmektedir. Karasal asidifikasyon/nütrifikasyon, sucul asidifikasyon ve sucul ekotoksisite etkilerindeki azalma oranları ise CEM IV tipi çimento için sırasıyla %30, %25 ve %22 iken; diğer çimento tiplerinde %12 ile %20 arasında değişmektedir. Bu sonuçlar, bir ton çimento üretimi için kullanılan klinker miktarındaki azalmaya bağlı olarak, küresel ısınma, sucul ötrofikasyon başta olmak üzere; yenilenemeyen enerji, karasal ekotoksisite, karasal asidifikasyon/nütrifikasyon, sucul asidifikasyon ve sucul ekotoksisite etkilerinde azalmanın sağlandığını göstermiştir. Bununla birlikte; iyonize radyasyon ve arazi kullanımı etki kategorilerindeki en düşük azalma oranları CEM IV ve ardından CEM II tipi çimentolar için belirlenmiştir (sırasıyla; %12 ve %5). Bu durumun, daha önce de açıklandığı gibi (Bölüm 3.2.2.) sadece CEM IV ve CEM II tipi çimentoların üretiminde kullanılan tras ve nakliye işlemleri ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Özellikle CEM IV tipi çimento üretiminde önemli miktarda tras kullanımı mevcuttur. CEM II tipi çimentoda bir ton başına kullanılan tras miktarı 2007 yılında 0,10 ton iken 2013 yılında 0,15 tondur. CEM IV tipi çimentoda bu miktar 2007 yılında 0,23 ton iken; 2013 yılında 0,37 tondur.

Şekil 3.30'da, farklı çimento tipleri üretimine bağlı olarak ortaya çıkan son nokta etkileri, 2007 ve 2013 yılları için karşılaştırmalı olarak (eko puan cinsinden) verilmiştir. Şekil, 4 farklı zarar kategorisi temelinde (iklim değişikliği, insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynak kullanımı) incelenerek değerlendirildiğinde, iklim değişikliği etkisinin, PKÇ tipi çimento dışında diğer tüm çimento tiplerinde 2013 yılında azalmakla birlikte; en dikkat çekici azalmanın CEM IV tipi çimentoda olduğu (%21) tespit edilmiştir. CEM I ve CEM II tipi çimentolarda iklim değişikliği son nokta kategorisindeki azalmalar sırasıyla; %1,4 ve %5,8'dir. İnsan sağlığı etkisindeki azalmalar CEM I, CEM II, CEM IV ve PKÇ tipi çimentolar için sırasıyla; %11, %3, %20 ve %8 olarak belirlenmiştir. Ekosistem kalitesi etki kategorisindeki azalma CEM I, CEM II, CEM IV ve PKÇ tipi çimentolar için sırasıyla; %9, %8, %15 ve %6

bulunurken; kaynak kullanımındaki azalma ise sırasıyla; %6, %3, %15 ve %2 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.30. Farklı çimento tiplerinin son nokta etkilerinin yıllar bazında karşılaştırılması

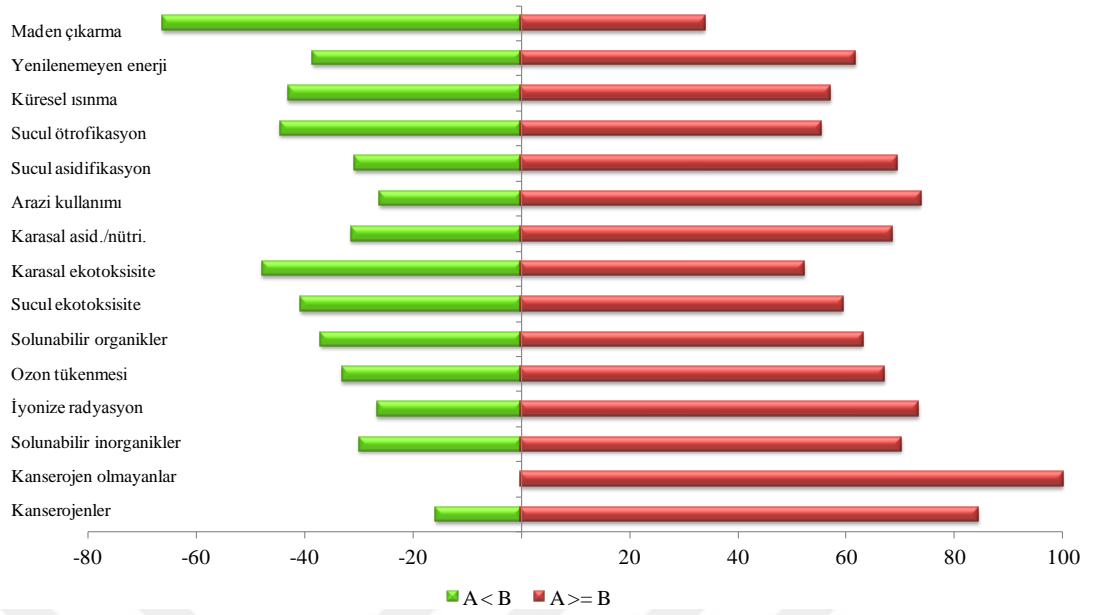
Farklı çimento tipleri, toplam çevresel etkileri açısından (eko puan cinsinden) değerlendirildiğinde ise; 2013 yılında tüm çimento tiplerinin eko puanlarının, 2007 yılına göre azaldığı görülmüştür. En önemli azalmanın ise beklenen bir durum olarak, CEM IV tipi çimentonun çevresel etkilerinde olduğu belirlenmiştir (%20). Bunun dışında; CEM I tipi çimentonun çevresel etkilerinin %6, CEM II tipi çimentonun çevresel etkilerinin %4, PKÇ tipi çimentonun çevresel etkilerinin ise %2 azaldığı tespit edilmiştir.

### 3.3. Belirsizlik Analizleri

#### 3.3.1. AHY ve GHY belirsizlik analizleri

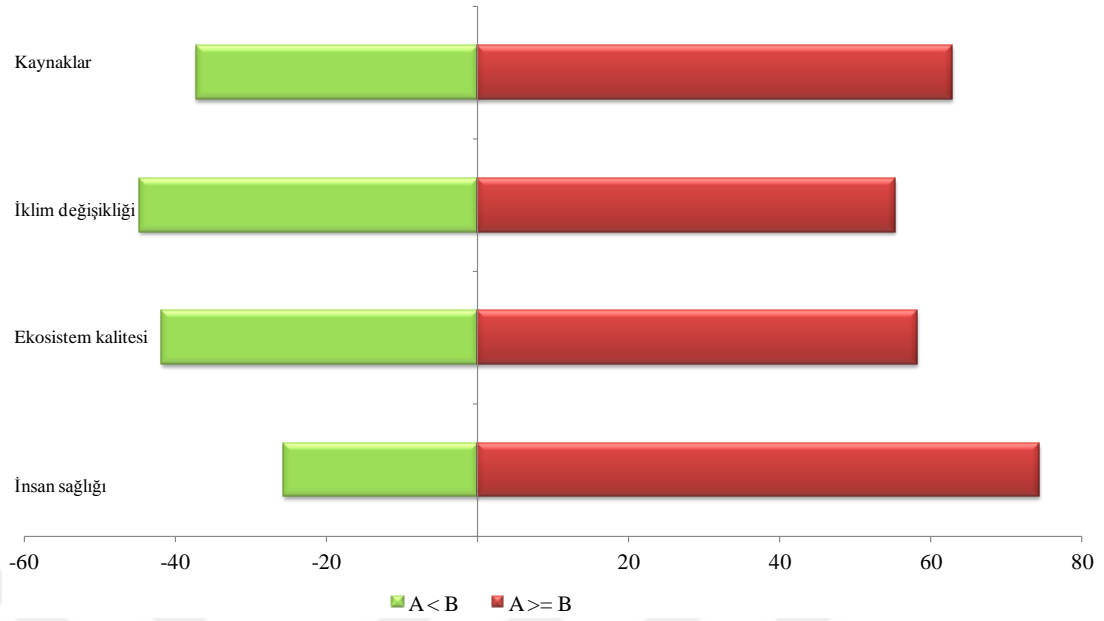
Geleneksel hammadde ve yakıtlar ile üretimin gerçekleştirildiği 2007 yılı ve alternatif hammadde ve yakıtlar ile üretimin gerçekleştirildiği 2013 yılları için gerçekleştirilen belirsizlik analizi karakterizasyon sonuçları Şekil 3.31’de verilmiştir.





Şekil 3.31. AHY ve GHY için belirsizlik analizi karakterizasyon sonuçları (A: GHY; B:AHY)

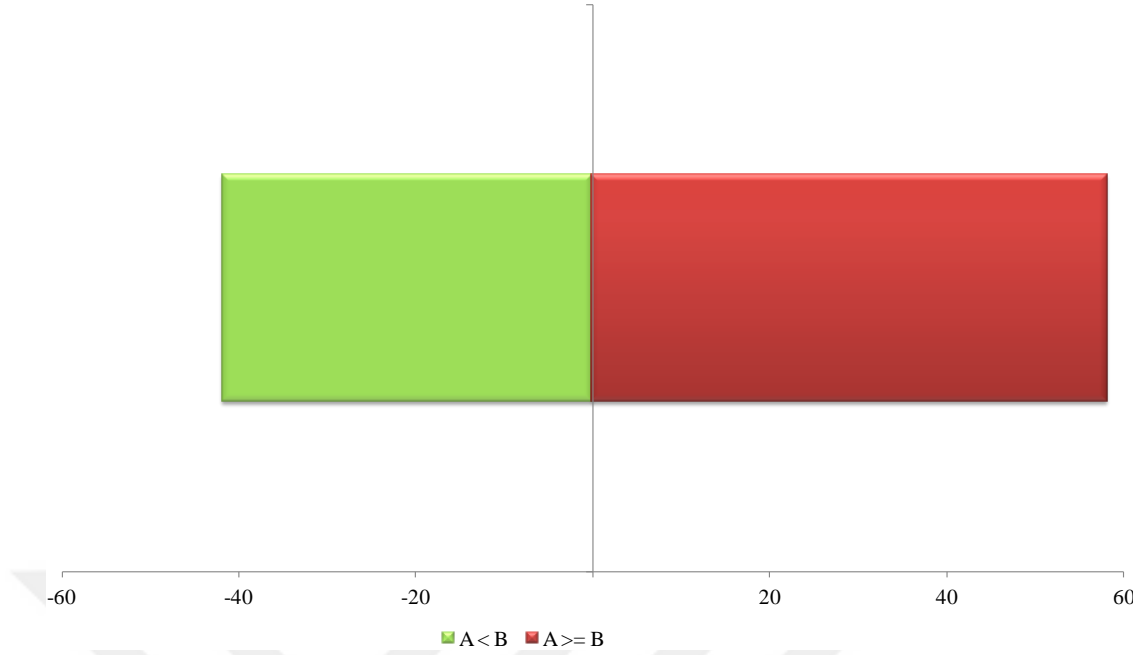
Belirsizlik analizi sonuçları, AHY (2013) durumunun kanserojen olmayanlar için her zaman en iyi olduğunu göstermiştir (%100). Kanserojenler (%85), arazi kullanımı (%73) ve iyonize radyasyon (%70) için de AHY senaryosunun daha üstün olduğunu göstermiştir. Maden çıkarma ve karasal ekotoksisite açısından AHY senaryosunun sadece %33 ve %49 oranında üstün olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer etki kategorileri için AHY senaryosunun üstünlüğü ise %52 (küresel ısınma) ile %67 (solunabilir inorganikler) arasında değişmektedir. Dolayısıyla, geleneksel hammadde ve yakıtların kullanıldığı durum ile alternatif hammadde ve yakıtların %3 oranında kullanıldığı durum çevresel etkileri açısından karşılaştırıldığında, alternatif hammadde ve yakıtların kullanılması halinde en önemli iyileşmelerin kanserojen olmayanlar başta olmak üzere, kanserojenler, arazi kullanımı ve iyonize radyasyon etki kategorilerinde olduğu söylenebilir. Aynı senaryolar için belirsizlik analizi zarar değerlendirmesi sonuçları da Şekil 3.32’de gösterilmektedir.



Şekil 3.32. AHY ve GHY için belirsizlik analizi zarar değerlendirme sonuçları (A: GHY; B:AHY)

Zarar değerlendirme sonuçları incelendiğinde, iklim değişikliği ve ekosistem kalitesi açısından üstün olan bir durum tam anlamıyla belirlenememekle birlikte; insan sağlığı (%68) açısından AHY durumunun üstün olduğu söylenebilir.

Geleneksel ve alternatif yöntemlerin kullanıldığı durumların belirsizlik analizi, toplam çevresel etkileri açısından kıyaslandığında ise, alternatif hammadde ve yakıtların kullanıldığı 2013 yılının, iterasyonların %58'inde daha iyi sonuç verdiği görülür (Şekil 3.33).

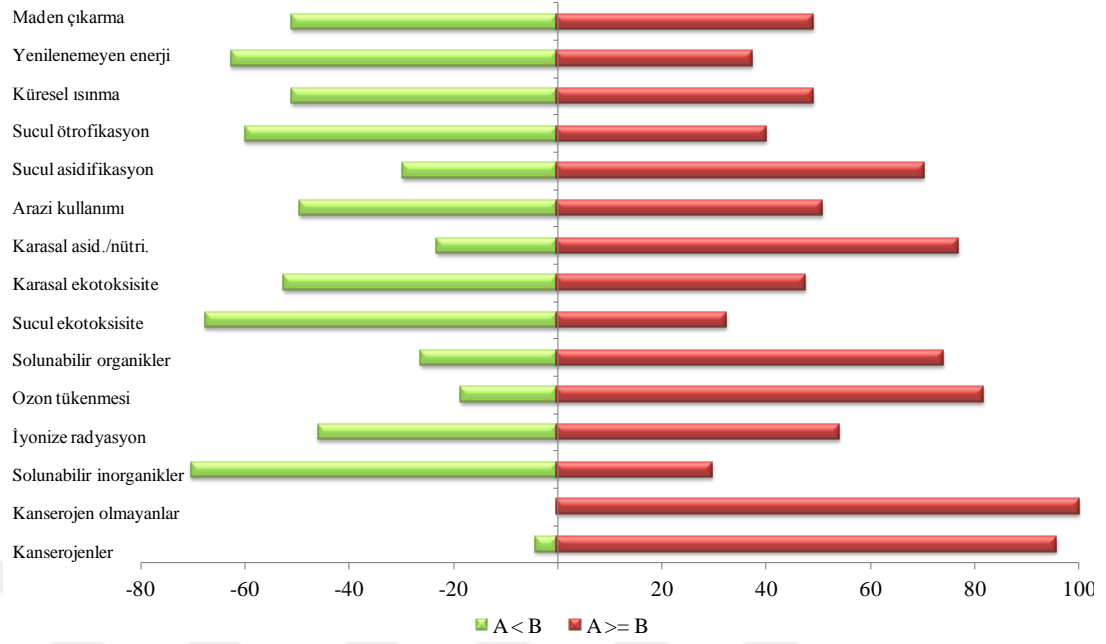


Şekil 3.33. AHY ve GHY senaryolarının tüm çevresel etkilerinin belirsizlik analizi sonuçları (A: GHY; B:AHY)

### 3.3.2. Senaryolar için belirsizlik analizi sonuçları

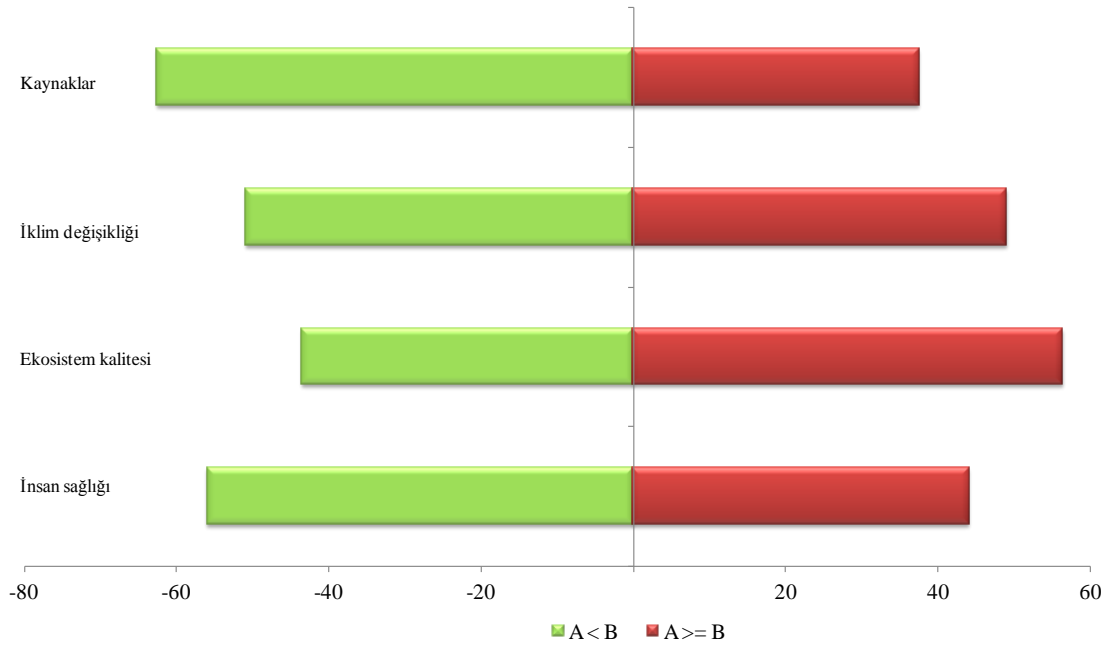
Belirsizlik analizleri, en çevre dostu senaryolar olarak belirtilen Senaryo 6 ve Senaryo 7 için de gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni, her iki senaryonun da toplam çevresel etkilerinin hemen hemen birbirine yakın çıkması ve önceliklerin tespit edilerek uygun olanın tercih edilmesi aşamasında kolaylık sağlayacağı düşüncesidir. Şekil 3.34'de Senaryo 6 ve Senaryo 7 için gerçekleştirilen belirsizlik analizlerinin karakterizasyon sonuçları gösterilmektedir.

Termal enerjinin %30'unun ATY ile sağlandığı Senaryo 6 ve %30'unun atık yağ ile sağlandığı Senaryo 7 için gerçekleştirilen belirsizlik analizi sonuçları, Senaryo 6'nın kanserojen olmayanlar için her zaman en üstün olduğunu göstermektedir (%100). Ayrıca Senaryo 6, kanserojenler, ozon tükenmesi, karasal asid./nütri., solunabilir organikler ve sucul asidifikasyon için iterasyonların sırasıyla; %96, %82, %77, %74 ve %70'i için üstündür. Bunlar dışındaki etki kategorileri için ise Senaryo 6'nın üstün olduğu iterasyonlar %29,8 (solunabilir inorganikler) ve %54 (iyonize radyasyon) arasında değişmektedir.



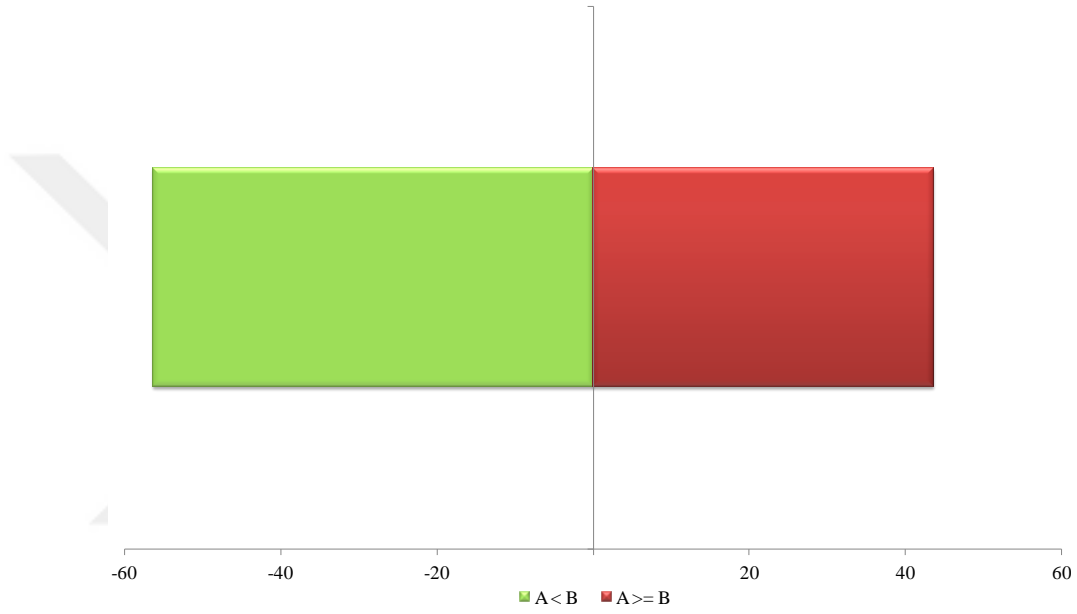
Şekil 3.34. Senaryo 6 ve Senaryo 7 için belirsizlik analizi karakterizasyon sonuçları (Senaryo 7: A, Senaryo 6: B)

İki senaryo için belirsizlik analizi zarar değerlendirmesi sonuçları Şekil 3.35’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, Senaryo 6 sadece ekosistem kalitesi için iterasyonların %56’sında üstün olarak belirlenmiştir. Diğer zarar kategorileri için Senaryo 7 üstündür.



Şekil 3.35. Senaryo 6 ve Senaryo 7 için belirsizlik analizi zarar değerlendirmesi sonuçları (Senaryo 7: A, Senaryo 6: B)

Şekil 3.36'da ise Senaryo 6 ve Senaryo 7'nin toplam etkilerinin üstün olduğu iterasyon oranlarının karşılaştırıldığı grafik verilmektedir. Tüm çevresel etkiler değerlendirildiğinde, Senaryo 6'nın sadece iterasyonların %44'ünde üstün olduğu dikkat çekmektedir. Bu durumda, iki senaryonun çevresel etkileri arasında göze çarpan üstünlük olmamakla birlikte, tüm çevresel etkiler açısından karar verilme aşamasında, Senaryo 7'nin tercih edilmesi daha çevreci bir yaklaşım olarak nitelendirilebilir.



Şekil 3.36. Senaryo 6 ve Senaryo 7'nin tüm çevresel etkilerinin belirsizlik analizi sonuçları (Senaryo 7: A, Senaryo 6: B)

### 3.4. Sonuçların Literatürdeki Benzer Çalışmalarla Karşılaştırılması

#### 3.4.1. İklim değişikliği açısından karşılaştırma

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar, literatürde konu ile ilgili benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Tablo 3.4). İncelenen çalışmalarda, geleneksel yöntemlerle üretimin gerçekleştirildiği durumlarda 1 ton klinker üretimi sonucu oluşan küresel ısınma potansiyellerinin 782 ile 1243 kg CO<sub>2</sub>-eşd. arasında değiştiği görülmektedir. Bu çalışmada da bu değer 890 kg CO<sub>2</sub>-eşd. olarak bulunmuştur. Klinker üretiminin alternatif yöntemler kullanılarak gerçekleştirildiği durumlarda ise, 1 ton klinker üretimi sonucu oluşan küresel ısınma potansiyelleri 626 ile 1123 arasında değişmektedir. Bu çalışmada, alternatif hammadde ve yakıtların kullanılması durumunda 1 ton klinker üretimi sonucu oluşan küresel ısınma

potansiyelinin 878 kg CO<sub>2</sub>-eşd. olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, bu çalışmanın sonuçlarının genel olarak literatürle uyumlu olduğu söylenebilir. Nitekim, klinker ve çimento üretim prosesi, kullanılan üretim yöntemi (kuru veya yaş sistem.vb.), üretilen çimento tipleri (CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V..vb), kullanılan alternatif hammadde ve yakıt türleri ve oranları ve geri kazanım faaliyetleri (atık ısı geri kazanımı..vb.) gibi parametrelerden dolayı işletmeden işletmeye göre çok değişmektedir. Dolayısıyla, değişen bu proses sonucu oluşan çevresel etkilerin de birebir aynı olması beklenemeyecektir.

Tablo 3.4. Literatürde yapılan çalışmalar sonucunda hesaplanan küresel ısınma potansiyelleri (kg.CO<sub>2</sub>-eşd/t.ürün)

Referans Çalışma	Klinker		Çimento		
	Temel Senaryo	Alternatif Senaryo	CEM I	CEM II	CEM IV
Valderrama ve diğ. (2012)	987	**938			
Valderrama ve diğ. (2013)	906	*898			
Panahandeh ve diğ. (2017)	790	*780-790			
Garcia-Gusano ve diğ. (2015b)		-	*626 **534		
Feiz ve diğ. (2014)	*850	-	*779		
Aranda-Uson ve diğ. (2012)	1243	1123			
Güreca ve diğ. (2015)	966	*932			
Chen ve diğ. (2010)			*782		
Chen ve diğ. (2015)			734		
Garcia-Gusano ve diğ. (2015a)	*929		*799		
Hacıyusufoğlu ve diğ. (2017)			907 *882	*751	
Stafford ve diğ. (2016a)			*632		
Song ve diğ. (2016)			678		
Moretti ve Caro, (2017)	*964		*972	*794	*711
Bushi ve Meil, (2014)			950		
Boesch ve Hellweg (2010)	946	861	903 *822	742 *675	628 *572
Boesch ve diğ. (2009)	944	941			
Huntzinger and Eatmon, (2009)			880	690	
Bu çalışma (2007)	890		850	766	666
Bu çalışma (2013)		878	838	721	529

\*: Alternatif hammadde ve/veya yakıt kullanımı var.

\*\* : Alternatif teknoloji kullanımı var.

Valderrama ve diğ. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada arıtma çamurunun farklı oranlarda (%5 ile %15 arasında) hammadde ve yakıt için ikame edildiği ve ikame

edilmediği durumlar farklı farklı değerlendirilmiştir. İkame olmayan temel durumda küresel ısınma potansiyeli 906 g CO<sub>2</sub>-eşd/kg.klinker bulunurken; hammaddeye ikame yapılan durumda bu değer %0,3; yakıtta ikame yapılan durumda ise %1 azalmıştır. Aranda-Uson ve diğ. (2012), çimento üretiminde, %5 olarak ikincil yakıt olarak yaş (nem içeriği %10 ve %40) ve kuru arıtma çamuru kullanımının çevresel etkilerini, yaşam döngüsü yaklaşımı ile değerlendirmişlerdir. Kuru arıtma çamuru kullanılması durumunda iklim değişikliği etkisi 1123 kg CO<sub>2</sub>-eşd; %10 nem içeriği olan çamur kullanılması durumunda 1125 kg CO<sub>2</sub>-eşd.; %40 nem içeriği olan çamur kullanılması durumunda ise 1132 kg CO<sub>2</sub>-eşd. olarak bulunmuştur. Çamur ikamesi olmadığı durum için ise 1 ton klinker için 1243 kg CO<sub>2</sub>-eşd. olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ise arıtma çamurunun kurutulup yakıt olarak kullanıldığı senaryoda (2013 yılı), 2007 yılına göre %1,4 azalma gerçekleştiği belirlenmekle birlikte; kuru arıtma çamurunun %15 ve %30 oranında kullanıldığı senaryolarda ise (Senaryo 1 ve Senaryo 5), küresel ısınma potansiyellerinde mevcut duruma (2013 yılı) göre artış olduğu dikkat çekmiştir (sırasıyla; 885 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri ve 882 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri). Bu durumun, çamur kurutma tesisinde, çamurun neminin %10'a kadar düşürülmesi için kullanılan elektrik tüketiminin fazlalığı ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Nitekim literatürde de bazı çalışmalarda pratik olarak arıtma çamuru besleme oranının, klinker üretimi kapasitesinin %5'inden fazla olmaması önerilmektedir. Yani, 2000 t/gün kapasiteli bir çimento fırınında, kullanılacak kuru çamur miktarı maksimum 1000 t/gün'dür (Werther ve Ogada, 1999; Zabaniotou ve Theofilou, 2008; Aranda-Uson ve diğ., 2013).

Panahandeh ve diğ. (2017), Strazza ve diğ. (2011) ve Stafford ve diğ.(2016a), klinker ve/veya çimento üretiminde alternatif yakıt olarak ATY kullanımının çevresel etkilerini araştırmışlardır. Panahandeh ve diğ. (2017), farklı oranlarda ATY ikamesi durumunda, klinker üretimine bağlı oluşan küresel ısınma potansiyelinin 780 (%30 ikame) ile 790 (%5 ikame) kg CO<sub>2</sub>/t.klinker arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Strazza ve diğ. (2011) ise alternatif yakıt olarak geri dönüştürülmüş plastik kullanan (%22 oranında) İtalyan çimento fabrikalarının çevresel performansını analiz etmişler ve küresel ısınma potansiyelindeki azalmayı %2 olarak belirlemişlerdir. Stafford ve diğ. (2016a), Güney Avrupa'da çimento üretiminde alternatif yakıt olarak ATY ve ömrünü tamamlamış lastik (ÖTL) kullanımının (toplam %43 oranında) etkilerini

yaşam döngüsü temelinde araştırmışlardır. Proseste kullanılan ÖTL'lerin ek sülfür kaynağı olduğu; ATY'de ise fosil yakıtlara oranla daha düşük sülfür konsantrasyonu olduğu belirtilen çalışmada, 1 kg çimento üretimine bağlı olarak 0,632 kg CO<sub>2</sub>-eşd. olduğu; fırından oluşan atmosferik emisyonların, küresel ısınma potansiyelinin %83'ünden sorumlu olduğu tespit edilmiştir. Güereca ve diğ. (2015), klinker üretiminde termal enerjinin %20'sinin ATY ile sağlandığı çalışmalarında, küresel ısınma potansiyelini 932 kg CO<sub>2</sub>/t.klinker olarak belirleyerek, temel senaryoya göre %3,6 azalma sağladığını belirtmişlerdir. Hacıyusufoğlu ve diğ. (2017), çimento üretiminde ATY ikamesinin çevresel etkilerini değerlendirdikleri çalışmalarında, 1 ton CEM I tipi çimento üretimine bağlı olarak küresel ısınma potansiyelini 907 kg CO<sub>2</sub>-eşd. olarak bulmuşlar ve çimento fırınında termal enerjinin %21'inin ATY ile sağlanması durumunda ise bu değeri 882 kg CO<sub>2</sub>-eşd olarak belirlemişlerdir. Bu değer, %3'lük azalmaya karşılık gelmektedir. Bu çalışmada da %15 ve %30 ATY ikamesi durumlarında (Senaryo 2 ve Senaryo 6), küresel ısınma potansiyelleri sırasıyla; 835 kg CO<sub>2</sub> eşd/t.klinker ve 783 kg CO<sub>2</sub>-eşd/t.klinker olarak bulunmuştur. Bu değerler 2013 yılındaki duruma göre sırasıyla, %5 ve %11'lik azalmaya karşılık gelmektedir.

Bazı çalışmalarda, çimento/klinker üretiminin çevresel etkileri sadece alternatif hammadde/yakıt kullanımı açısından değil; bunlara ek olarak termal enerji verimliliği, elektrik enerjisi verimliliği, klinker/çimento oranı gibi mevcut en iyi teknolojiler dökümanları baz alınarak da gerçekleştirilmiştir (Boesch ve Hellweg, 2010, Valderrama ve diğ., 2012; Garcia-Gusano ve diğ., 2015a, Garcia-Gusano ve diğ., 2015b; Song ve diğ., 2016). Garcia-Gusano ve diğ. (2015a), 2010 yılındaki mevcut durum (%15,8 alternatif yakıt ikamesi, 3536 MJ/klinker termal enerji gereksinimi, 130 kWh/t.çimento) ile 2030 yılında hedeflenen durum (%50 alternatif yakıt ikamesi, 3300 MJ/klinker termal enerji gereksinimi, 106 kWh/t.çimento elektrik tüketimi, ve 0,7 klinker/çimento oranı) için çimento üretiminin yaşam döngüsünü değerlendirdikleri çalışmada, 2030 yılı senaryosu için küresel ısınma potansiyelini 626 kg CO<sub>2</sub>-eşd/t.çimento olarak belirleyerek yaklaşık %22'lik bir azalma olduğu sonucuna varmışlardır. Bahsedilen çalışma, hem ikame miktarlarının artırılması hem de üretim prosesinde iyileştirmelere yönelik olması açısından önem taşımaktadır. Garcia-Gusano ve diğ. (2015b) tarafından yapılan bir başka çalışma da,



mevcut çimento üretim prosesinin ve iyileştirmeleri içeren senaryoların (termal enerji verimliliği-E1, elektrik verimliliği-E2, klinker/çimento oranı-E3, yakıt ikamesi-E4 ve ideal durum-E5) etkilerin karşılaştırmalı olarak değerlendirmesi açısından önemlidir. Hem E1, E2, E3 ve E4 senaryolarının her biri için, hem de bu metotların birleşimi olan E5 için yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar iklim değişikliği açısından ele alındığında, en iyi azaltım tekniğinin klinker/çimento oranını azaltmak, ardından da alternatif yakıtları fosil yakıtlar ile değiştirmek olduğu sonucuna varılmıştır. Boesch ve Hellweg (2010), mevcut en iyi teknolojiyi ve termal enerji ikame oranını %50 uygulayarak, 1 ton çimento üretimine bağlı oluşan sera gazı emisyonlarının Avrupa'da %9, Amerika'da ise %18 azaltılabileceğini belirtmişlerdir. Mevcut durum için, 1 ton Portland çimentosu üretimi sonucunda iklim değişikliği etkisi Avrupa'da 903 kg CO<sub>2</sub>-eşd. olarak belirlenmiştir. Geliştirilmiş senaryo için (enerji verimliliği, %50 yakıt ikamesi ve %4 hammadde ikamesi) ise iklim değişikliği etkisi 822 kg CO<sub>2</sub>-eşd. olarak tespit edilmiştir. CEM II ve CEM IV tipi çimentolar için ise bu değer sırasıyla; 675 kg CO<sub>2</sub>-eşd. ve 572 kg CO<sub>2</sub>-eşd. olarak bulunmuştur. Aynı çalışma grubu, %1 klinker ikamesinin, Amerikan çimentolarının CO<sub>2</sub> emisyonlarını 9,6 kg/t; Avrupa çimentolarının CO<sub>2</sub> emisyonlarını ise 8,7 kg/t azalttığını hesaplamıştır. Termal enerjinin %1'inin atıklarla sağlanması durumunda ise 1 ton çimento üretimine bağlı karbon ayak izinin 1,65 kg azaldığı sonucuna varmışlardır. Garcia-Gusano ve diğ. (2015b) ve Boesch ve Hellweg (2010)'in savunduğu gibi başka araştırmacılar da (Lei et. al. 2011; Van den Heede ve De Belie 2012), çimentonun çevresel etkileri küresel ısınma temelinde ele alındığında; klinker/çimento oranının azaltılmasının, yakıt ikamesinden daha önemli olduğu sonucuna varmışlardır (Galvez-Martoz ve Schoenberger, 2014). Boesch ve diğ. (2009) bir başka çalışmalarında, hem klinker üretiminde kullanılan farklı atık türlerinin (atık lastik, endüstriyel atık, kuru arıtma çamuru ve yüksek fırın cürufu) hem de klinker üretim metotlarının etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Song ve diğ. (2016), ısı geri kazanım ve kojenerasyon teknolojisi kullanımı, alternatif hammadde olarak karbür ve kalker çamuru ve alternatif yakıt olarak mısır kamışı kullanımı ile çimento üretiminin çevresel etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Temel senaryo için küresel ısınma potansiyeli 678 kg CO<sub>2</sub>-eşd./t.çimento bulunurken, alternatif hammadde ikamesi senaryolarında küresel ısınma potansiyelinin 667 – 674 kg CO<sub>2</sub>-

eşd./t.çimento arasında değiştiği belirlenmiştir. Alternatif yakıt olan mısır kamışının %50 ikamesi durumunda, küresel ısınma potansiyelinin temel duruma oranla %12,20 azaldığı tespit edilmiştir. Atık ısı geri kazanım teknolojisi kullanımında ise, temel senaryoya göre küresel ısınma potansiyelinde yaklaşık %4'lük bir azalma olduğu sonucuna varılmıştır. Benhelal ve diğ. (2013) ise çimento üretiminde atık ısı geri kazanımının, fosil yakıt kullanımını %20, CO<sub>2</sub> emisyonlarını ise %8'e kadar azalttığını belirtmiştir (Benhelal ve diğ., 2013; Salas ve diğ., 2016). Bu tez çalışmasında ise atık ısı geri kazanımı ile klinker üretimi için gerekli elektrik enerjisinin yaklaşık %25'ini sağlamakta, küresel ısınma potansiyelini ise %0,75 azaltmaktadır. Valderrama ve diğerleri (2012), eski çimento üretim hatlarının mevcut en iyi teknolojilere (Best available Technologies – BAT) uygun yeni üretim hattı ile değiştirilmesi ile beraber, küresel ısınma etkisinin %5 azaldığı; enerjide ise %13 tasarruf sağlandığı sonucuna varmışlardır.

Bazı çalışmalarda ise farklı çimento tipleri üretimine bağlı olarak oluşan çevresel etkilerdeki farklılıklar değerlendirilmiştir (Huntzinger and Eatmon 2009; Feiz ve diğ. 2014). Huntzinger and Eatmon (2009), farklı çimento üretim prosesleri (geleneksel portland çimentosu, katkılı çimento, %100 çimento fırın tozu ile üretilen çimento) için karşılaştırmalı yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirdikleri çalışmada, küresel ısınma potansiyeli en düşük olan çimentonun, katkılı çimento olduğunu (0,069) belirlemişlerdir. Geleneksel Portland çimentosu ve geri kazanılmış yüksek fırın tozu ile üretilen çimento için ise bu değerler 0,088 bulunmuştur. Çalışmada fonksiyonel birim olarak 20 adet torbalı çimento (yaklaşık 1 ton) seçildiği dikkate alınarak bu çalışma ile kıyaslandığında, bu çalışmada CEM I, CEM II ve CEM IV için bulunan değerlerin daha düşük olduğu dikkat çekmektedir. Feiz ve diğ. (2014) de klinker ve farklı çimento tipleri için (CEM I, CEM III/A ve CEM III/B) küresel ısınma potansiyellerini belirlemişlerdir. Klinker için küresel ısınma potansiyelini 850 kg CO<sub>2</sub>-eşd./t.klinker, CEM I için ise 779 kg CO<sub>2</sub>-eşd./t.çimento olarak bulmuşlardır.

Bu çalışmadaki alternatif yakıtların fosil yakıtlar yerine kullanılma oranı literatürdeki çalışmalara kıyasla oldukça düşük olmasına rağmen (%3), gerek klinker gerekse 3 farklı çimento tipi oluşumuna bağlı küresel ısınma potansiyeli sonuçları literatürde bulunan sonuçlarla kıyaslanabilir niteliktedir. Genel olarak, literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, küresel ısınma potansiyeli sonuçlarının,

klinker/çimento oranındaki azalmanın ve alternatif yakıt kullanımındaki artışın, üretilen 1 ton çimentonun karbon ayak izini azalttığı görülmektedir. Bununla birlikte, farklı azalma oranlarının, sistem varsayımları ve tanımlarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Galvez-Martoz ve Schoenberger, 2014).

#### **3.4.2. Diğer etkiler açısından karşılaştırma**

Çalışmanın sonuçları iklim değişikliği dışındaki çevresel etkiler (asidifikasyon, ötrofikasyon, solunabilir organik ve inorganikler..vb.) açısından karşılaştırılarak Tablo 3.5’de verilmiştir.

Sonuçlar 1 ton klinker ve 1 ton çimento bazında ayrı ayrı karşılaştırıldığında, klinker ve çimento üretiminin sucul asidifikasyon, ozon tükenmesi, solunabilir organikler ve sucul ötrofikasyon üzerindeki çevresel etkilerinin, literatürdeki diğer çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Tabloda yer almayan kanserojen etki kategorisi Chen ve diğ. (2015) tarafından yapılmış bir çalışmada 0,82 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl eşd./t.çimento; Boughrara ve diğ. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada ise 1,34 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl eşd./t.çimento olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada bulunan değer de (1,76 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl eşd./t.çimento) literatür ile uyumlu olduğu söylenebilir.

Tablo 3.5. Diğer etkiler açısından karşılaştırma

Referans	Solunabilir inorganikler	Ozon tükenmesi	Solunabilir organikler	Sucul asidifikasyon	Sucul ötrofikasyon	Yenilenemeyen enerji	Metot	Fonksiyonel birim
Güereca ve diğ. 2015	-	5,30E-05	9,60E-02	2,39E+00	3,90E-01	-	CML IO Baseline	1 ton klinker
Valderrama ve diğ. 2012	-	6,40E-08	1,00E-04	2,55E+00	3,72E-01	-	CML 2000	
Valderrama ve diğ. 2013	-	5,10E-08	8,90E-05	1,85E+00	2,43E-01	-	CML	
Panahandeh ve diğ. 2017	-	-	-	3,74E+00	3,29E-01	-	CML 2000	
Saade ve diğ. 2015	-	3,32E-07	1,95E-03	8,75E-03	2,86E-03	-	CML	
Georgiopoulou ve diğ. 2018	-	5,11E-04	6,10E-01	1,52E+01	6,99E-02	-	CML IO Baseline 2000	
Aranda Uson ve diğ. 2012	-	6,53E-05	-	-	3,89E-03	-	RECIPE	
<b>Bu çalışma</b>	<b>4,36E-01</b>	<b>1,92E-06</b>	<b>2,23E-02</b>	<b>1,05E+00</b>	<b>1,04E-01</b>	<b>1,93E+03</b>	<b>IMPACT 2002+</b>	
Hacıyusufoğlu ve diğ. 2017	-	-	5,80E-02	5,50E-01	1,41E-01	2,52E+03	CML 2001	ton çimento
Chen ve diğ. 2015	2,30E-01	1,28E-06	3,30E-02	8,90E-01	1,02E-02	3,27E+03	IMPACT 2002+	
CEMBUREAU, 2015	-	1,21E-07	1,42E-01	1,48E+00	2,11E-01	3,44E+03		
Song ve diğ. 2016	-	6,15E-07	1,28E-01	2,51E+00	1,59E-01	-	CML 2001	
Stafford ve diğ. 2016	-	-	1,58E-01	1,97E+00	3,54E-01	-	CML 2001	
Stafford ve diğ. 2016	3,23E+00 (kg PM10 eşd.)	2,54E-04	-	7,86E+00	1,38E-01 (kg P eq)	-	ReCiPe	
Li ve diğ. 2015	-	-	4,93E-02	1,31E+00	3,20E-01	-	CML	
Yang ve diğ. 2017	5,25E-01	-	1,49E-03	4,09E+00	5,90E-04	3,33E+03	IMPACT 2002+	
Moretti and Caro, 2017	-	5,19E-05	4,70E-01	2,00E+00	3,10E-01	-		
Bushi and Meil, 2014	3,70E-01	1,10E-08	-	4,10E+00	-	6,27E+03	TRACI 2.1	
Chen ve diğ. 2010	-	4,20E-05	1,11E-01	3,49E+00	5,04E-01	-	CML01	
Bouhrara ve diğ. 2015	1,99E-01	7,44E-06	4,95E-02	8,67E-01	7,86E-04	-	IMPACT 2000+	
<b>Birim</b>	kg PM <sub>2,5</sub> eşd.	kg CFC-11 eşd.	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	kg SO <sub>2</sub> eşd.	kg PO <sub>4</sub> P-lim	MJ		
<b>Bu çalışma</b>	<b>6,53E-01</b>	<b>2,22E-06</b>	<b>2,67E-02</b>	<b>1,15E+00</b>	<b>1,06E-01</b>	<b>2,19E+03</b>	<b>IMPACT 2002+</b>	

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, geleneksel yöntemler (2007 yılı) ve alternatif yöntemlerle (2013 yılı) çimento üretiminin gerçekleştirildiği durumların çevresel etkileri yaşam döngüsü yaklaşımıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar öncelikle çimentonun temel ara ürünü olan, enerji tüketiminin ve emisyon oluşumunun en yoğun olduğu klinker temelinde, ardından ise üretilen farklı çimento tipleri baz alınarak değerlendirilmiştir. Beşikten kapıya kapsamında gerçekleştirilen çalışmada, fonksiyonel birim olarak 1 ton klinker ve 1 ton çimento seçilmiş ve yaşam döngüsü etki değerlendirmesi IMPACT 2002+ metodu ile gerçekleştirilmiştir. Klinker üretiminin çevresel etkilerinin azaltılması amacıyla, farklı alternatif yakıt türlerini ve ikame oranlarını içeren senaryolar oluşturularak, en çevre dostu senaryo tespit edilmeye çalışılmıştır.

2007 yılı için sonuçlar değerlendirildiğinde, tüm çevresel etkilerin %60'ını klinkerleşme prosesinin (kalsinasyon ve yakıt yanması); %27'sini ise tüm elektrik tüketiminin oluşturduğu belirlenmiştir. 2013 yılı için ise bu değerler klinkerleşme için %67, elektrik tüketimi için ise %22 olarak belirlenmiştir. Her iki yıl için de klinkerleşme prosesinin küresel ısınma başta olmak üzere, karasal asidifikasyon/nütrifikasyon ve sucul asidifikasyon üzerinde olumsuz etkileri olduğu dikkat çekmiştir. Alternatif hammadde ve yakıtların kullanıldığı 2013 yılında, yenilenemeyen enerji ve kanserojen olmayan etki kategorisindeki elektrik tüketimi katkısının 2007 yılına göre daha az olduğu göze çarpmıştır. Bu durumun, WHR tesisi sayesinde elektrik enerjisinden yapılan çevresel tasarruf olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, 2013 yılında kurutulmuş arıtma çamuru, ATY ve atık yağ gibi alternatif yakıtların kullanılmasına bağlı olarak, kanserojen olmayan etki kategorisinde oldukça dikkat çeken bir azalma (%84) olduğu belirlenmiştir. 2013 yılı için çevresel etkiler zarar kategorileri temelinde değerlendirildiğinde, alternatif hammadde ve yakıt kullanımının, zarar kategorileri üzerindeki olumsuz etkileri, %1 ile %5 arasında

değişen oranlarda azalttığı tespit edilmiştir. Alternatif hammadde ve yakıt kullanımının, tüm çevresel etkiler üzerinde ise yaklaşık %3 pozitif etkisi bulunmaktadır. 2007 ve 2013 yıllarına ait karakterizasyon sonuçları karşılaştırıldığında, 2013 yılında maden çıkarma etki kategorisi hariç tüm etki kategorilerinde azalma olduğu görülmüştür. Maden çıkarma etki kategorisinde, 2013 yılında %61 artış olduğu tespit edilmiştir. Bu durum proses katkı analizlerinde araştırıldığında, maden çıkarma faaliyetlerinin en çok boksit madenciliğinden etkilendiği görülmüştür. Bu durumun nedeninin ise 2013 yılında 1 ton klinker için kullanılan boksit miktarının artışına bağlı olarak, boksit madenciliği faaliyetlerinin artması olduğu düşünülmektedir. Normalizasyon sonrasında ise, küresel ısınma, solunabilir inorganikler ve yenilenemeyen enerji kullanımının her iki 2 yıl için de klinker üretimine bağlı olarak oluşan en önemli etki kategorilerini oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Bir ton klinker üretimi nedeniyle oluşan küresel ısınma potansiyeli 2007 yılı için 890 kg CO<sub>2</sub>-eşdeğeri, 2013 yılı için ise 878 kg CO<sub>2</sub>-eşdeğeri olarak hesaplanarak, %3 oranında alternatif hammadde ve yakıt kullanımı ile 12 kg CO<sub>2</sub>-eşd./t.klinker tasarruf sağlandığı belirlenmiştir. 2007 ve 2013 yıllarındaki durum için gerçekleştirilen belirsizlik analizi sonuçları, 2013 yılındaki durumun kanserojen olmayanlar için her zaman en iyi olduğunu (%100), kanserojenler, arazi kullanımı ve iyonize radyasyon için ise iterasyonların sırasıyla; %85, %73 ve %70'inde üstün olduğunu göstermiştir. Maden çıkarma ve karasal ekotoksiste için iterasyonların çoğunda ise ise 2007 yılındaki durumun üstün olduğu belirlenmiştir. Belirsizlik analizi, tüm çevresel etkileri açısından karşılaştırıldığında ise, 2013 yılının, iterasyonların %58'inde daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

2013 yılında işletme, klinker ve çimento üretimi prosesi için gerekli olan elektrik enerjisinin yaklaşık %30'unu atık ısı geri kazanım tesisinden (WHR tesisi) sağlamaktadır. Bu durumun işletmeye sağladığı çevresel yararın değerlendirilmesi amacıyla, WHR tesisinin olmadığı durum için de bir modelleme yapılarak, WHR tesisinin etkisi değerlendirilmiştir. Buna göre işletmenin, üretim faaliyetleri için kullandığı elektrik enerjisinin yaklaşık %30'unu WHR tesisinden karşılayarak, kanserojen olmayanlar dışındaki tüm etki kategorilerinde %0,75 (küresel ısınma) ile %32 (kanserojenler) arasında değişen oranlarda azalmayı sağladığı tespit edilmiştir.

Klinker üretimi prosesinde alternatif yakıt kullanımının çevresel etkilerinin araştırılması için, alternatif yakıt ikame oranlarının %15 ve %30 olduğu ve farklı alternatif yakıt türlerinin (kurutulmuş arıtma çamuru, ATY ve atık yağ) kullanıldığı senaryolar geliştirilmiştir. Geliştirilen senaryolara ait sonuçlar, tüm çevresel etkileri açısından değerlendirildiğinde en çevre dostu senaryonun, termal enerjinin %30'unun atık yağlar ile sağlandığı 7. senaryo olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, termal enerjinin %30'unun ATY ile sağlandığı 6. senaryo da çevre dostu olması açısından alternatif yakıt kullanımında tercih edilebilecek senaryolar arasında nitelendirilebilir. Klinker ve çimento üretiminin en önemli etkilerinden olan iklim değişikliği etkisindeki azalma açısından olaya yaklaşıldığında ise iklim değişikliğindeki en önemli azalmanın termal Senaryo 6'da olduğu (%6,25), bunu Senaryo 7'nin takip ettiği belirlenmiştir (%6). Bahsedilen 2 senaryo ile çevresel etkilerdeki iyileştirme açısından birbirine çok yakın sonuçlara ulaşılmıştır. Bu senaryolardan hangisine karar verileceği hususunda bir seçime altyapı oluşturmak üzere, iki senaryo için belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. Belirsizlik analizi sonucunda, iki senaryonun çevresel etkileri arasında göze çarpan üstünlük olmamakla birlikte, Senaryo 6'nın sadece iterasyonların %44'ünde üstün olduğu, dolayısıyla; tüm çevresel etkiler açısından karar verilme aşamasında, Senaryo 7'nin tercih edilmesinin daha çevreci bir yaklaşım olacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte, orta nokta etki kategorileri açısından değerlendirildiğinde Senaryo 6'nın kanserojen olmayanlar için her zaman en üstün olduğu (%100); kanserojenler, ozon tükenmesi, karasal asid./nütri., solunabilir organikler ve sucul asidifikasyon için ise iterasyonların sırasıyla %96, %82, %77, %74 ve %70'inde üstün olduğu sonucuna varılmıştır.

Klinker üretiminin çevresel etkileri belirlendikten sonra, fonksiyonel birim olarak 1 ton çimento seçilmiş ve çalışmanın devamı buna göre modellenmiştir. Literatür ile uyumlu olacak şekilde klinker ikamesine bağlı olarak CEM IV tipi çimentonun üretiminde oluşan toplam çevresel etkinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Fakat etki kategorileri ayrı ayrı değerlendirildiğinde, kanserojen olmayanlar, iyonize radyasyon ve arazi kullanımı etki kategorilerinde CEM IV tipi çimentonun katkısının yüksek olması dikkat çekmiştir. Katkı analizlerinde, kanserojen olmayan etki

kategorisindeki artışın tras kullanımı; iyonize radyasyon ve arazi kullanımındaki artışın ise nakliye işlemleri ile ilişkili olduğu belirlenmiştir.

Çimento tipleri için belirlenen çevresel etkiler, iklim değişikliği açısından karşılaştırıldığında, 2007 yılında bir ton CEM I, CEM II, CEM IV ve PKÇ tipi çimento üretimine bağlı olarak oluşan küresel ısınma potansiyelleri sırasıyla; 850 kg CO<sub>2</sub>-eşd, 766 kg CO<sub>2</sub>-eşd, 666 kg CO<sub>2</sub>-eşd ve 841 kg CO<sub>2</sub>-eşd. olarak belirlenmiştir. 2013 yılında ise bu değer CEM I, CEM II, CEM IV ve PKÇ tipi çimento için sırasıyla; 838 kg CO<sub>2</sub>-eşd, 721 kg CO<sub>2</sub>-eşd, 529 kg CO<sub>2</sub>-eşd ve 864 kg CO<sub>2</sub>-eşd. olarak bulunmuştur.

IMPACT 2002+ metodunda, yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirilen prosesler, toplam çevresel etkilerinin belirlenmesi ve karşılaştırılması amacıyla puanlandırılmaktadır. Buna göre 2007 yılında CEM I, CEM II, CEM IV ve PKÇ tipi çimentolar için belirlenen eko puanlar sırasıyla; 176, 161, 144 ve 174 olarak belirlenmiştir. 2013 yılı için ise bu değerler; bir ton CEM I, CEM II, CEM IV ve PKÇ tipi çimento için sırasıyla; 166, 154, 115 ve 171 olarak hesaplanmıştır.

Farklı çimento tipi üretimine bağlı olarak oluşan orta nokta etki kategorilerindeki değişimler incelendiğinde, önemli miktarda azalmaların genellikle CEM IV tipi çimentoda olduğu tespit edilmiştir. Küresel ısınma, sucul ötrofikasyon, yenilenemeyen enerji ve karasal ekotoksiste etkilerinin CEM IV tipi çimentodaki azalma oranları sırasıyla %21, %20, %16 ve %10 iken; bu oranlar diğer çimento tiplerinde %1 ile %5 arasında değişmektedir. Çevresel etkilerdeki değişimler, zarar değerlendirmesi temelinde ((iklim değişikliği, insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynak kullanımı) araştırılarak değerlendirildiğinde ise, iklim değişikliği kategorisinde en önemli azalmanın CEM IV tipi çimentoda (%21) olduğu; bunu CEM II ve CEM I tipi çimentonun takip ettiği görülmüştür (sırasıyla; %5,8 ve %1,4). İnsan sağlığı kategorisindeki azalmalar CEM I, CEM II, CEM IV ve PKÇ tipi çimentolar için sırasıyla %11, %3, %20 ve %8, ekosistem kalitesi etki kategorisindeki azalmalar sırasıyla %9, %8, %15 ve %6, kaynak kullanımındaki azalmalar ise sırasıyla %6, %3, %15 ve %2 olarak bulunmuştur.

Çalışmanın sonuçları, çimento firmında beraber yakma faaliyetlerinin, hem kullanılan fosil yakıt miktarını azaltarak kaynak kullanımında gelişme sağlaması hem



de düzenli depolamaya gönderilecek atık miktarında azaltım sağlayarak çevresel gelişme sağlanması açısından avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Yaşam döngüsü değerlendirme metodu, tek bir ürün/hizmetin çevresel etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılabileceği gibi, sürdürülebilir ürün geliştirilmesinde karar verme mekanizması olarak veya farklı ürünlerin çevresel etkilerinin karşılaştırılmasında da kullanılmaktadır. Türkiye’de enerji ve hammadde tüketimi ve emisyon oluşumu yoğun bir sektör olan çimento üretiminde alternatif hammadde ve yakıt kullanımının ürün ve çevre üzerindeki etkileri araştırılmış olmakla birlikte, konuya yaşam döngüsü değerlendirmesi ile yaklaşan çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Bu çalışma ile ortaya konan sonuçların, çimento üretiminde geleneksel yöntemlerin ve alternatif hammadde/yakıtların kullanıldığı durumların iklim değişikliği, ekosistem kalitesi, kaynak kullanımı ve insan sağlığı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, farklı atık türlerinin ve ikame oranlarının çimento üretiminde kullanımının çevresel etkileri konusunda fikir sahibi olunması ve buna göre karar mekanizmalarının geliştirilmesi açısından literatüre katkı sağlayabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte, çalışma kapsamındaki girdi ve çıktılar sadece çevresel açıdan değerlendirilmiş, alternatif hammadde ve yakıt kullanımının ürün kalitesi üzerindeki etkisi ile ilgili bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Dolayısıyla, bu alanda yapılacak çalışmalar da karar vericiler için önem arz edecektir.

Ayrıca, CO<sub>2</sub> salımı yüksek bir sektör olan çimento üretiminde, sadece alternatif hammadde ve yakıt kullanımı ile küresel ısınma potansiyelinde önemli miktarda azalma sağlanamayacağı açıktır. Bu nedenle, karbon tutma ve depolama teknolojilerinin araştırılması ve uygulanması önem taşımaktadır

## KAYNAKLAR

Abuşoğlu A., Özahi E., Kutlar A.İ., Al-Jaaf H., Life Cycle Assessment (LCA) of Digested Sewage Sludge Incineration for Heat and Power Production, *Journal of Cleaner Production*, 2017, **142**, 1684-1692.

Akkapedi S., Alternative Solid Fuels for the Production of Portland Cement, Yüksek Lisans Tezi, Auburn University, Auburn, 2008.

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

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

Ali A.A.M., Negm A.M. Bady M.F., İbrahim M.G.H., Effect of Fuel Type on the Life Cycle of Egyptian Cement Industry: Environmental Impact Assessment Approach, *The Fourth Asian Conference on Sustainability, Energy and the Environment*, Osaka, Japonya, 12-15 Haziran 2014.

Ali A.A.M., Negm A.M., Bady M.F., İbrahim M.G.H., Suzuki M., Environmental Impact Assessment of the Egyptian Cement Industry Based on a Life-Cycle Assessment Approach: A Comparative Study Between Egyptian and Swiss Plants, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2016, **18**, 1053–1068.

Amrina E., Vilsi A.L., Key Performance Indicators for Sustainable Manufacturing Evaluation in Cement Industry, *Procedia CIRP - 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Emerging Potentials*, 2015, **26**, 19-23.

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

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

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

BAT (Best Available Techniques), Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries,

2010, [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/clm\\_bref\\_0510.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/clm_bref_0510.pdf), (Ziyaret Tarihi: 01.09.2018).

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

Benhelal E., Zahedi G., Hashim H., A Novel Design for Green and Economical Cement Manufacturing, *Journal of Cleaner Production*, 2012, **22**, 60-66.

Benhelal E., Zahedi G., Shamsaei E., Bahadori A., Global Strategies and Potentials to Curb CO<sub>2</sub> Emissions in Cement Industry, *Journal of Cleaner Production*, 2013, **51**, 142-161.

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

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

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

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

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

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

Bulut İ., Belediye Atıklarının Çimento Sektöründe Evsel Atı Olarak Kullanılması, *2017 Atık Yönetimi Sempozyumu*, Antalya, Türkiye, 26 Şubat – 02 Mart 2017.

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

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

Caruso H.G., Reduction of CO<sub>2</sub> Emissions from Cement Plants, Master Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Kanada, 2006.

CEMBUREAU (The European Cement Association), Environmental Benefits of Using Alternative Fuels in Cement Production: A life cycle approach, <http://www.cembureau.be/library/cembureau-publications>, 1999 (Ziyaret tarihi: 21 Temmuz 2018).

CEMBUREAU (The European Cement Association), Sustainable Cement Production: Co-processing of Alternative Fuels and Raw Materials in the European Cement Industry, <https://www.oficemen.com/wp-content/uploads/2017/05/Sustainable-cement-producti-on.pdf>, 2009 (Ziyaret tarihi: 2 Şubat 2018).

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

CEMBUREAU (The European Cement Association), Activity report 2016, <https://cembureau.eu/media/1635/activity-report-2016.pdf> (Ziyaret tarihi: 10 Mayıs 2018).

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

Chaudhary A., Verones F., de Baan L., Pfister S., Hellweg S., Land stress: Potential Species Loss From Land Use (Global; PSSRg), *LC-Impact, the Online Community for Life Cycle Impact Assessment*, 2016, [http://lc-impact.eu/downloads/documents/Land\\_stress\\_chapter\\_LC-Impact\\_July\\_17\\_2016.pdf](http://lc-impact.eu/downloads/documents/Land_stress_chapter_LC-Impact_July_17_2016.pdf) (Ziyaret tarihi: 29.08.2018).

Chen C., Habert G., Bouzidi Y., Jullien A., Environmental Impact of Cement Production: Detail of the Different Processes and Cement Plant Variability Evaluation, *Journal of Cleaner Production*, 2010, **18**, 478–485.

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

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

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

Demirer G.N., Yaşam Döngüsü Analizi, *Bölgesel Çevre Merkezi (REC Türkiye)*, 3-39, 2017.

Derinöz Gencil C., Çimento Sektöründe Tehlikeli Atıkların Alternatif Yakıt Olarak Kullanılması ve AB Uygulamaları, *2011 Atık Yönetimi Sempozyumu*, Antalya, 17-21 Nisan 2011.

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

Feiz R., Ammenberg J, Baas L, Eklund M, Helgstrand A., Marshall R., Improving the CO<sub>2</sub> Performance of Cement, Part I: Utilizing Life-Cycle Assessment and Key Performance Indicators to Assess Development within the Cement Industry, *Journal of Cleaner Production*, 2015, **98**, 272-281.

Finnveden G., Hauschild M.Z., Ekvall T., Jeroen Guine'e J., Recent Developments in Life Cycle Assessment, *Journal of Environmental Management*, 2009, **91**, 1–21.

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

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

García-Gusano D., Herrera I., Garraín D., Lecho'n Y., Cabal H., Life Cycle Assessment of the Spanish Cement Industry: Implementation of Environmental-Friendly Solutions, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2015a, **17**, 59–73.

García-Gusano D., Garraín D., Herrera I., Cabal H., Lechón Y., Life Cycle Assessment of Applying CO<sub>2</sub> Post-Combustion Capture to the Spanish Cement Production, *Journal of Cleaner Production*, 2015b, **104**, 328-338.

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

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

Grzesik K., Malinowski M., Life Cycle Assessment of Refuse-Derived Fuel Production from Mixed Municipal Waste, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2016, **38:21**, 3150-3157.

GTZ/Holcim, Guidelines on Co-Processing Waste Materials in Cement Production, <http://www.coprocem.org/>, 2006 (Ziyaret tarihi: 20.08.2018).

Guo M., Murphy R.J., LCA Data Quality: Sensitivity and Uncertainty Analysis, *Science of the Total Environment*, 2012, **435–436**, 230–243.

Güereca L.P., Torres N., Juarez-Lopez C.R., The Co-Processing of Municipal Waste in a Cement Kiln in Mexico. A Life-Cycle Assessment Approach, *Journal of Cleaner Production*, 2015, **107**, 741-748.

Gürsel A.P., Life-Cycle Assessment of Concrete: Decision-Support Tool and Case Study Application, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, 2014.

Hacıyusufoğlu B., Başar H.M., Cılız N., Farklı Çimento ve Betonların Karşılaştırmalı Yaşam Döngüsü Analizi ve LEED Sertifikalı Binalarda Etkilerinin Değerlendirilmesi, *Kalkınmada Anahtar Verimlilik*, 2017, **29**, 27-35.

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

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

Helftewes M., Flamme S., Nelles M., Greenhouse Gas Emissions of Different Waste Treatment Options for Sector-Specific Commercial and Industrial Waste in Germany, *Waste Management & Research*, 2012, **30**(4), 421–431.

Holt S.P., Life-Cycle Analysis of a Cement Manufacturing Plant Co-Firing Hazardous Waste in The USA, Yüksek Lisans Tezi, University of South Carolina, 2016.

Hong J., Hong J, Otaki M., Jolliet O., Environmental and Economic Life Cycle Assessment for Sewage Sludge Treatment Processes in Japan, *Waste Management*, 2009, **29**, 696–703.

Hoogmartens R., Van Passel S., Van Acker K., Dubois M., Bridging the Gap Between LCA, LCC and CBA as Sustainability Assessment Tools, *Environmental Impact Assessment Review*, 2014, **48**, 27–33.

Hossain M.D., Poon C.S., Lo I.M.C., Cheng J.C.P., Comparative LCA on Using Waste Materials in the Cement Industry: A Hong Kong Case Study, *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, **120**, 199–208.

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

Huijbregts M.A.J., Application of Uncertainty and Variability in LCA, *International Journal of LCA*, 1998, **3**, 273-280.

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

IEA, CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion Highlights, *International Energy Agency*, 1-152, 2017.

IFC, Environmental, Health, and Safety Guidelines for Cement and Lime Manufacturing, *World Bank Group*, 1-16, 2007.

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

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

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate Change 2014: Synthesis Report, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland, 151 pp, 2014.

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

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

Jolliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet J., Rebitzer G., Rosenbaum R., IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, **8**, 324-330.

Josa A., Aguado A., Cardim A., Byars E., Comparative Analysis of the Life Cycle Impact Assessment of Available Cement Inventories in the EU, *Cement and Concrete Research*, 2007, **37**, 781–788.

Kanokkantapong V., Kiatkittipong W., Panyapinyopol B., Wongsuchoto P., Pavasant P., Used Lubricating Oil Management Options Based on Life Cycle Thinking, *Resources, Conservation and Recycling*, 2009, **53**, 294–299.

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

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

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

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

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

Liu Y., Cui J., Cui S., Gong X. & Wang Z., Life cycle assessment of beneficial use of domestic waste for cement production in China, *Materials Research Innovations*, 2014, **18**, 62-66.

Loijos A., Life Cycle Assessment of Concrete Pavements: Impacts and Opportunities, Yüksek Lisans Tezi, Massachusetts Institute of Technology, San Diego, 2011.

Menoufi K.A.B., Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment Methodologies: A State of the Art, Yüksek Lisans Tezi, Universitat de Lleida, Maig, 2011.

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

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

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

Nuh Çimento, Faaliyet raporu 2017, <http://www.nuhcimento.com.tr/faaliyet-raporlari/> (Ziyaret tarihi: 28/08/2018).

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

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

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

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

Reza B., Soltani A., Ruparathna R., Sadiq R., Hewage K., Environmental and Economic Aspects of Production and Utilization of RDF as Alternative Fuel in



Cement Plants: A Case Study of MetroVancouver Waste Management, *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, **81**, 105– 114.

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

Saade M.R.M., da Silva M.G., Gomesa V., Appropriateness of Environmental Impact Distribution Methods to Model Blast Furnace Slag Recycling in Cement Making, *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, **99**, 40–47.

Salas D.A., Ramirez A.D., Rodriguez C.R., Petroche D.M., Boero A.J., Duque-Rivera J., Environmental Impacts, Life Cycle Assessment and Potential Improvement Measures for Cement Production: A Literature Review, *Journal of Cleaner Production*, 2016, **113**, 114-122.

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

Sharma B., Orr J.J., Improving the Sustainability of Concrete, In: Advances in Concrete Technology, *Materials & Construction Practices (CTMC)*, 2016.

Sharma H., Life-Cycle Assesment of Different Technologies to Process Sewage Sludge, Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology, Sustainable Energy Technology, 2017.

Song D., Yang J., Chen B., Hayat T., Alsaedi A., Life-cycle Environmental Impact Analysis of a Typical Cement Production Chain, *Applied Energy*, 2016, **164**, 916–923.

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

Stafford F.N., Raupp-Pereira F., Labrincha J.A., Hotza D., Life Cycle Assessment of the Production of Cement: A Brazilian Case Study, *Journal of Cleaner Production*, 2016b, **137**, 1293-1299.

Stajanča M., Eštokova A., Environmental Impacts of Cement Production, Lviv Polytechnic National University Institutional Repository, 2012.

Stranddorf H.K., Hoffmann L., Schmidt A., Impact Categories, Normalisation and Weighting in LCA, *Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency*, Environmental New, **78**, 2005.

Strazza C., Del Borghi A., Gallo M., Del Borghi M, Resource Productivity Enhancement as Means for Promoting Cleaner Production: Analysis of Co-İncineration in Cement Plants Through a Life Cycle Approach, *Journal of Cleaner Production*, 2011, **19**, 1615-1621.

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

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

TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu), Seragazi Emisyon İstatistikleri, 2016 <http://www.tuik.gov.tr/PdfGetir.do?id=27675> (Ziyaret tarihi: 29.08.2018).

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

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

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

Van Den Heede P., De Belie N., Environmental Impact and Life Cycle Assessment (LCA) of Traditional and 'Green' Concretes: Literature Review and Theoretical Calculations, *Cement & Concrete Composites*, 2012, **34**, 431-442.

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

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

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

Wei W., Larrey-Lassalle P., Faure T., Dumoulin N., Roux P., and Mathias J.D., How to Conduct a Proper Sensitivity Analysis in Life Cycle Assessment: Taking into Account Correlations within LCI Data and Interactions within the LCA Calculation Model, *Environmental Science and Technology*, 2015, **49**, 377-385.

Werther J., Ogada T., Sewage Sludge Combustion, *Progress in Energy and Combustion Science*, 1999, **25**, 55-116.

Worrell E., Price L., Martin N., Hendriks C., Meida L.O., Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry, *Annual Review of Energy and the Environment*, 2011, **26**, 303-329.

Yang D., Fan L., Shi F., Liu Q., Wang J., Comparative Study of Cement Manufacturing with Different Strength Grades Using the Coupled LCA and Partial LCC Methods—A Case Study in China, *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, **119**, 60–68.

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

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

Young S.B., Turnbull S., Russell A., Substudy 6:What LCA Can Tell Us about the Cement Industry, *World Business Council for Sustainable Development*, 2002.

Zabaniotou A., Theofilou C., Green Energy at Cement Kiln in Cyprus - Use of Sewage Sludge as a Conventional Fuel Substitute, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, **12**, 531–541.

Zbicinski I., John Stavenuiter J., Barbara Kozłowska B., van de Coevering H., *Product Design and Life Cycle Assessment*, The Baltic University Press, Uppsala, 2006.

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

URL-1: <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=54>, (Ziyaret tarihi: 28.08.2013)

URL-2: <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&cntID=204>, (Ziyaret tarihi: 17.04.2018).

URL-

3:[https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement\\_Roadmap\\_Foldout\\_WEB.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement_Roadmap_Foldout_WEB.pdf), (Ziyaret tarihi: 03.05.2018)

URL-4: [http://di.unfccc.int/time\\_series](http://di.unfccc.int/time_series), (Ziyaret tarihi: 16.04.2018).

URL-5: <https://cembureau.eu/cement-101/the-manufacturing-process/>, (Ziyaret tarihi : 03.04.2018).

URL-6:

(<http://www.cement.org.au/SustainabilityNew/ClimateChange/CementEmissions.aspx>), (Ziyaret tarihi: 05.02.2018).

URL-7: (<http://www.wbcdcement.org/index.php/key-issues/climate-protection>), (Ziyaret tarihi: 05.04.2018).

URL-8: <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&cntID=29> (Ziyaret tarihi: 26/08/2018).

URL-9: <http://webdosya.csb.gov.tr/db/ippc/icerikler/ulusal-met-kilavuzu-20180425132410.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 25.07.2018).

URL-10: <http://webdosya.csb.gov.tr/db/ippc/icerikler/n-ha--rapor-20180425132823.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 13.07.2018).





**EKLER**

**EK - A**

Etki Değerlendirme Metotları (Menoufi 2011; SimaPro 8.0.4).

Metodun ismi	Yöntem	Ülke	Yıl	İlgili orta nokta etki kategorileri	Birim
<b>CML (2001)</b>	Problem odaklı	Hollanda	1992	Asidifikasyon potansiyeli İklim değişikliği Ötrofikasyon potansiyeli Sucul ekotoksosite (tatlı su ve deniz) İnsan toksisitesi Arazi kullanımı Fotokimyasal oksidasyon Kaynaklar Stratosferik ozon tüketimi Karasal ekotoksosite Sediment ekotoksitesitesi (tatlı su/deniz) İyonize radyasyon	kg SO <sub>2</sub> -eşdeğeri kg CO <sub>2</sub> -eşdeğeri kg PO <sub>4</sub> -eşdeğeri kg 1,4-DCB-eşdeğeri kg 1,4-DCB-eşdeğeri m <sup>2</sup> a kg ozon oluşumu/etilen-eşd kg antimon eşdeğeri kg CFC-11-eşdeğeri kg 1,4-DCB-eşdeğeri kg 1,4-DCB-eşdeğeri DALYs
<b>Eco-indicator 99</b>	Zarar odaklı	Hollanda	1995	Kanserojenler Solunabilir organikler Solunabilir inorganikler İklim değişikliği Radyasyon Ozon tabakası Ekotoksosite Asidifikasyon/Ötrofikasyon Arazi kullanımı Mineraller Fosil yakıtlar	DALY DALY DALY DALY DALY DALY PAFm <sup>2</sup> y PDFm <sup>2</sup> y PDFm <sup>2</sup> y MJ surplus MJ surplus
<b>EDIP (Environmental Design in Product Development)</b>	Problem odaklı	Danimarka	1996	İnsan toksisitesi, hava Ekotoksosite, su (akut/kronik) Küresel ısınma İnsan toksitesitesi, su Asidifikasyon İnsan toksitesitesi, toprak Karasal ötrofikasyon Sucul ötrofikasyon Ozon tabakasının incelenmesi	kişi m <sup>3</sup> kg CO <sub>2</sub> eşdeğeri kişi m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> m <sup>2</sup> kg N, kg P kg CFC 11 eşdeğeri

**EK - A**

(Devam) Etki Değerlendirme Metotları (Menoufi 2011; SimaPro 8.0.4).

<b>EPS 2000 (Environmental Priority Strategy)</b>	Zarar odaklı	İsveç	1989	Ortalama yaşam süresi Ağır morbidite Morbidite Ağır rahatsızlık Rahatsızlık Mahsul gelişme kapasitesi Ahşap gelişme kapasitesi Balık ve et üretimi Toprak asidifikasyonu Sulama suyu üretim kapasitesi İçme suyu üretim kapasitesi Kaynak tükenmesi Türlerin yok olması	Kişi.yıl Kişi.yıl Kişi.yıl Kişi.yıl Kişi.yıl kg kg kg H + eşdeğeri kg kg ELU NEX
<b>Impact 2002+</b>	Zarar odaklı	İsviçre	2002	Kanserojenler Kanserojen olmayanlar Solunabilir inorganikler İyonize radyasyon Ozon tüketimi Solunabilir organikler Sucul ekotoksosite Karasal ekotoksosite Karasal asidifikasyon/nütrifikasyon Arazi kullanımı Sucul asidifikasyon Sucul ötrofikasyon Küresel ısınma Yenilenemeyen enerji Maden çıkarma	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl-eşdeğeri kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl-eşdeğeri kg PM <sub>2.5</sub> -eşdeğeri Bq C-14-eşdeğeri kg CFC-11-eşdeğeri kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eşdeğeri kg trietilen glikol su kg trietilen glikol toprak kg SO <sub>2</sub> -eşdeğeri m <sup>2</sup> org. sürülebilir arazi kg SO <sub>2</sub> -eşdeğeri kg PO <sub>4</sub> P-lim kg CO <sub>2</sub> -eşdeğeri MJ birincil MJ fazlalık
<b>IPCC</b>	Problem odaklı	Birleşmiş Milletler	2001	Küresel ısınma potansiyeli	kg CO <sub>2</sub> -eşdeğeri
<b>CED (Cumulative energy demand)</b>	Problem odaklı	-	-	Yenilenemeyen kaynaklar (fosil, nükleer, biyokütle) Yenilenebilir kaynaklar (biyokütle, rüzgar, güneş, jeotermal, su)	MJ

**EK - A**

(Devam) Etki Değerlendirme Metotları (Menoufi 2011; SimaPro 8.0.4).

<b>CExD</b> (Cumulative exergy demand)	Problem odaklı	-	-	Yenilenemeyen kaynaklar (fosil, nükleer, birincil, mineraller, metaller) Yenilenebilir kaynaklar (kinetik, güneş, potansiyel, biyokütle, su)	MJ
<b>TRACI</b>	Problem odaklı	A.B.D.	1999	Ozon tükenmesi Küresel ısınma Asidifikasyon Ötrofikasyon Fotokimyasal oksidasyon Ekotoksiste Kanserojenler, Kanserojen olmayanlar Kriter hava kirleticileri	kg CFC-11-eşdeğeri kg CO <sub>2</sub> -eşdeğeri H+ mol-eşdeğeri kg N-eşdeğeri kg NO <sub>x</sub> -eşdeğeri kg 2,4-D-eşdeğeri kg benzen-eşdeğeri kg toluen-eşdeğeri kg PM <sub>2,5</sub> -eşdeğeri
<b>ILCD</b>	Problem odaklı	AB	2012	İklim değişikliği Ozon tüketimi Kanserojenler Kanserojen olmayanlar Partikül madde İyonize radyasyon Fotokimyasal ozon oluşumu Asidifikasyon Karasal ötrofikasyon Tatlı su ötrofikasyonu Deniz ötrofikasyonu Tatlı su ekotoksitesitesi Arazi kullanımı Su kaynaklarının tüketimi Mineral, fosil kaynak tüketimi	kg CO <sub>2</sub> -eşdeğeri kg CFC-11-eşdeğeri CTUh CTUh kg PM <sub>2,5</sub> -eşdeğeri kBq U235-eşdeğeri kg NMVOC-eşdeğeri molc H+-eşdeğeri molc N-eşdeğeri kg P-eşdeğeri kg N-eşdeğeri CTUe kg C defisit m <sup>3</sup> su eşdeğeri kg Sb-eşdeğeri



**EK - A**

(Devam) Etki Değerlendirme Metotları (Menoufi 2011; SimaPro 8.0.4).

ReCiPe	Problem odaklı ve Zarar odaklı	Hollanda	2008	İklim değişikliği Ozon tüketimi Karasal asidifikasyon Tatlı su ötrofikasyonu Deniz ötrofikasyonu İnsan toksisitesi Fotokimyasal oksidasyon Partikül madde oluşumu Karasal ekotoksisite Tatlı su ekotoksisitesi Deniz ekotoksisitesi İyonize radyasyon Tarım arazisi kullanımı Kentsel arazi kullanımı Doğal arazi dönüşümü Su tüketimi Metal tüketimi Fosil kaynak tüketimi	kg CO <sub>2</sub> -eşdeğeri kg CFC-11-eşdeğeri kg SO <sub>2</sub> -eşdeğeri kg P-eşdeğeri kg N-eşdeğeri kg 1,4-DB-eşdeğeri kg NMVOC kg PM10-eşdeğeri kg 1,4-DB-eşdeğeri kg 1,4-DB-eşdeğeri kg 1,4-DB-eşdeğeri kBq U235-eşdeğeri m <sup>2</sup> a m <sup>2</sup> a m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> kg Fe-eşdeğeri kg yağ-eşdeğeri

**EK - B**

Oluşturulan senaryolar için hesaplanan karakterizasyon sonuçları

Etki kategorisi	Birim	Senaryo 8	Senaryo 7	Senaryo 6	Senaryo 5	Senaryo 4	Senaryo 3	Senaryo 2	Senaryo 1	AHY
<b>Kanserojenler</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	1,39E-01	7,75E-01	-1,20E+00	8,39E-01	6,01E-01	9,20E-01	-6,61E-02	9,51E-01	8,46E-01
<b>Kanserojen olmayanlar</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	-6,18E+00	-9,44E-01	-1,33E+01	-4,30E+00	-3,01E+00	-3,85E-01	-6,56E+00	-2,06E+00	-1,17E+00
<b>Solunabilir inorganikler</b>	kg PM <sub>2,5</sub> eq	5,07E-01	3,97E-01	4,82E-01	6,42E-01	4,64E-01	4,09E-01	4,51E-01	5,31E-01	4,36E-01
<b>İyonize radyasyon</b>	Bq C-14 eq	6,71E+01	9,52E+01	9,26E+01	1,34E+01	9,37E+01	1,08E+02	1,06E+02	6,69E+01	1,21E+02
<b>Ozon tükenmesi</b>	kg CFC-11 eq	1,13E-06	1,72E-06	9,72E-07	7,11E-07	1,57E-06	1,87E-06	1,49E-06	1,36E-06	1,92E-06
<b>Solunabilir organikler</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	1,60E-02	2,09E-02	1,44E-02	1,28E-02	1,96E-02	2,20E-02	1,88E-02	1,80E-02	2,23E-02
<b>Sucul ekotoksosite</b>	kg TEG water	6,42E+03	5,21E+03	6,50E+03	7,55E+03	7,28E+03	6,68E+03	7,32E+03	7,85E+03	7,99E+03
<b>Karasal ekotoksosite</b>	kg TEG soil	2,30E+03	2,41E+03	2,45E+03	2,05E+03	2,40E+03	2,45E+03	2,47E+03	2,27E+03	2,48E+03
<b>Karasal asid./nütri.</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	5,63E+00	6,36E+00	4,53E+00	5,99E+00	6,27E+00	6,63E+00	5,72E+00	6,45E+00	6,75E+00
<b>Arazi kullanımı</b>	m <sup>2</sup> org.arable	2,25E-01	4,48E-01	4,33E-01	-2,06E-01	4,17E-01	5,29E-01	5,21E-01	2,01E-01	5,80E-01
<b>Sucul asidifikasyon</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	9,17E-01	9,66E-01	7,75E-01	1,01E+00	9,90E-01	1,01E+00	9,19E-01	1,04E+00	1,05E+00
<b>Sucul ötrofikasyon</b>	kg PO <sub>4</sub> P-lim	4,84E-02	4,57E-02	5,19E-02	4,77E-02	7,82E-02	7,68E-02	7,99E-02	7,78E-02	1,04E-01
<b>Küresel ısınma</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	8,17E+02	7,85E+02	7,83E+02	8,82E+02	8,52E+02	8,36E+02	8,35E+02	8,85E+02	8,78E+02
<b>Yenilenemeyen enerji</b>	MJ primary	1,19E+03	1,10E+03	1,24E+03	1,24E+03	1,58E+03	1,54E+03	1,61E+03	1,61E+03	1,93E+03
<b>Maden çıkarma</b>	MJ surplus	1,08E+01	1,10E+01	1,10E+01	1,05E+01	1,10E+01	1,11E+01	1,11E+01	1,08E+01	1,12E+01

## **KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER**

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

**Çankaya S.**, Pekey B., Comparative Life Cycle Assessment of Clinker Production with Conventional and Alternative Fuels Usage in Turkey, *International Journal of Environmental Science and Development*, 2018, **9**, 213-217.

**Çankaya S.**, Pekey B., Determination of Greenhouse Gases (GHG) with a Life Cycle Approach in Machinery Manufacturing Industry, *3. International Conference on Civil and Environmental Engineering*, İzmir-Çeşme, 24-27 Nisan 2018.

**Çankaya S.**, Özdemir U., Çankaya S., Principles and Methodologies of Life Cycle Assessment (LCA) for Environmental Sustainability, *3. International Conference on Civil and Environmental Engineering*, İzmir-Çeşme, 24-27 Nisan 2018.

## ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Kocaeli’nde doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini Kocaeli’nde tamamladı. 2005 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nden 2009 yılında mezun oldu. 2010 – 2012 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi F.B.E. Çevre Mühendisliği A.B.D’da yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2010 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi’nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

