

**REFRAKTER TUĞLA ÜRETİMİNİN
YAŞAM DÖNGÜŐ ANALİZİ VE
YAŞAM DÖNGÜŐ MALİYETİ YÖNTEMLERİYLE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Gülden TOK

Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık – 2015

"Bu tez çalışması, TÜBİTAK tarafından 114Y525 nolu proje kapsamında desteklenmiŐtir."

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Güliden TOK' un "**Refrakter Tuğla Üretimini Yaşam Döngüsü Analizi ve Yaşam Döngüsü Maliyeti Yöntemleriyle Değerlendirilmesi**" başlıklı Çevre Mühendisliği Anabilim Dalındaki Yüksek Lisans tezi, 04/12/2015 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç. Dr. Aysun ÖZKAN
Üye	: Prof. Dr. Alpagut KARA
Üye	: Doç. Dr. Güray SALİHOĞLU

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET
YÜKSEK LİSANS TEZİ
REFRAKTER TUĞLA ÜRETİMİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ VE
YAŞAM DÖNGÜSÜ MALİYETİ YÖNTEMLERİYLE
DEĞERLENDİRİLMESİ

Gülden TOK
Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Aysun ÖZKAN

2015, 103 Sayfa

Bu çalışmada, üretimdeki kurutma ve sinterleme süreçlerinden dolayı oldukça yoğun enerji tüketen bir sektör olan refrakter üretim sektörü ele alınmış, Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Assessment, LCA) ve Yaşam Döngüsü Maliyeti (Life Cycle Cost, LCC) yöntemleri ile refrakter tuğla üretiminin çevresel ve ekonomik değerlendirmesi yapılmıştır. Bu amaçla, çalışmanın uygulanacağı bir tesis belirlenmiş ve fonksiyonel birim olarak bir ton manyezit spinel tuğla seçilmiştir. Refrakter tuğla üretiminin çevresel etkileri; lisanslı SimaPro 8.0.1 (PRe Consultants, Hollanda) yazılımında CML IA yöntemi kullanılarak, etki kategorileri bazında belirlenmiştir. LCC analizi ise, içsel (enerji, malzeme, nakliye, vb.) ve dışsal (çevresel faktörler) maliyetler için yine aynı yazılımda yeni bir maliyet modeli analizi oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, tesisin çevresel performansının malzemelerin yeniden kullanımı ya da geri kazanımı ve enerji tüketiminin azaltılmasıyla artırılacağı sonucuna varılırken, refrakter tuğla üretimi prosesinde, içsel maliyetlerin yanı sıra dışsal maliyetlerin de mutlaka göz önüne alınması gerektiği ortaya konulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Refrakter tuğla, Sürdürülebilirlik, Yaşam Döngüsü Analizi, Yaşam Döngüsü Maliyeti

ABSTRACT

Master of Science Thesis

EVALUATION OF REFRACTORY BRICK PRODUCTION THROUGH LIFE CYCLE ASSESSMENT AND LIFE CYCLE COST METHODS

Gülden TOK

Anadolu University

Graduate School of Science

Environmental Engineering Program

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Aysun ÖZKAN

2015, 103 pages

In this study, it was aimed to make an environmental and economic assessment of refractory brick production process by using LCA and LCC method together since refractory production is quite energy intensive sector due to drying and firing processes. For this purpose, firstly, a refractory plant in Turkey was chosen and one ton magnesite spinel refractory brick was selected as functional unit. CML IA method included in licensed SimaPro 8.0.1 software was employed for the assessment from the perspectives of impact categories. LCC analysis was carried out creating to a new economic method for internal cost (i.e. energy, materials, transport) and external cost (i.e. environmental) categories by using the same software. As a result, according to obtained data, environmental performance of refractory plant can be improved by reusing or recycling the materials and reducing energy consumption. Beside this, for the determination of refractory brick production sustainability strategies, external costs should be considered together with the internal costs.

Keywords: Refractory brick, Sustainability, Life Cycle Assessment, Life Cycle Cost

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı;

Çevre Mühendisliği'nde ikinci bir yüksek lisans yapma düşüncemin ne kadar doğru bir karar olduğunu bana bir kez daha hatırlatan, kendilerini tanımanın büyük bir şans olduğunu her ortamda dile getirdiğim, bana farklı bir bakış açısı kazandıran, çalışmam süresince bilgi, yardım ve desteklerini esirgemeyen, bana inanan, tez danışmanım Doç. Dr. Aysun ÖZKAN ve hocalarım Prof. Dr. Müfide BANAR ve Yard. Doç. Dr. Zerrin GÜNKAYA'ya,

Çevre Mühendisliği'nde Yüksek Lisans yapmamı her zaman destekleyen ve çalışmam süresince ilgi, destek ve sabrını esirgemeyen SERAMİK ARAŞTIRMA MERKEZİ A.Ş.'ye ve Ar-Ge Koordinatörüm Prof. Dr. Alpagut KARA'ya,

Çalışma süresince birlikte çalıştığım, teknik olarak büyük katkı sağlayan Lisans öğrencisi Levent KARACASULU'ya,

Tezin ortaya çıkmasında ve verilerin elde edilmesi konusunda destek veren SÖRMAŞ SÖĞÜT REFRAKTER SANAYİ A.Ş.'ye

Bu süreçte bana her zaman destek veren, sabır ve anlayış gösteren eşime ve biricik oğlum Kaan Alp'e

sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Gülden TOK

Aralık-2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
EKLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. AVRUPA VE TÜRKİYE’ DE REFRAKTER ÜRETİMİ	3
3. REFRAKTER MALZEMELERİN TANIMI VE SINIFLANDIRILMASI	5
3.1. Refrakter Malzemelerin Sınıflandırılması.....	6
3.2. Manyezit Refrakterler.....	6
4. REFRAKTER TUĞLA ÜRETİM PROSESİ VE ÇEVRESEL AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ	9
5. YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ (LCA)	14
5.1. LCA Standartları	15
5.2. LCA’nın Kullanım Alanları	16
5.2.1. Çevresel Ürün Beyanları	17
5.2.2. LCA’nın Kamusal Uygulamaları.....	19
5.3. LCA Yazılımları.....	19
5.4. LCA Sisteminin Yapısı	20
5.4.1. Hedef ve Kapsamın Belirlenmesi	21
5.4.1.1. Fonksiyonel Birim.....	21
5.4.1.2. Sistem Sınırları.....	22

5.4.2. Envanter Analizi	23
5.4.3. Etki Değerlendirmesi	25
5.4.4. Yorum	30
6. YAŞAM DÖNGÜŐ MALİYETİ ANALİZİ (LCC)	32
6.1. LCC Analizinin Karar Almada Kullanımı	33
6.2. LCC Analiz Yöntemi	33
6.2.1. İçsel Maliyetler	35
6.2.2. Dışsal Maliyetler	35
7. KONUYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR	36
7.1. LCA ile İlgili Yapılan Çalışmalar	36
7.2. LCC ile İlgili Yapılan Çalışmalar	40
8. MATERYAL VE METOD	41
8.1. Çalışmada Kullanılan SimaPro 8.0.1 Yazılımı	42
8.2. Refrakter Tuğla Üretim Süreci ve LCA Uygulaması	42
8.2.1. Hedef ve Kapsam Tanımı	42
8.2.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi	43
8.2.2.1. Veri Toplama	44
8.2.2.2. Varsayımlar	50
8.2.3. Etki Analizi	51
8.3. Refrakter Tuğla Üretim Süreci ve LCC Uygulaması	52
8.3.1. Hedef ve Kapsam Tanımı	52
8.3.2. Maliyet Bileşenlerinin Belirlenmesi	52
8.3.3. Maliyet Verilerine Ait Envanterin Oluşturulması	53
8.3.4. LCC Modelinin Oluşturulması ve Analizinin Yapılması	53
9. BULGULAR VE DEğERLENDİRME	56
9.1. Refrakter Tuğla Üretiminin LCA Sonuçları ve Değerlendirilmesi	56

9.2. Hassasiyet Analizi	68
9.3. Refrakter Tuğla Üretiminin LCC Sonuçları ve Değerlendirilmesi	73
10. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER	78
KAYNAKLAR	80
Ek-1 Yaşam Döngüsü Analizi Envanteri - 1	86
Ek-2 Meksika' da Üretilen Deniz Suyu Sinter Manyezit Hesaplamaları	88
Ek-3 Sinter Spinel Üretimi için Yapılan Hesaplamalar	89
Ek-4 Yaşam Döngüsü Analizi Envanteri - 2	96
Ek-5 Yaşam Döngüsü Maliyet Envanteri	102

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Refrakter ürünlerin son kullanıcı uygulamalarının dağılımı.....	3
3.1. 2005 yılı verilerine göre dünya manyezit kaynakları.....	7
3.2. 2004 yılı verilerine göre üretilen manyezitin ülkelere göre dağılımı.....	7
4.1. Refrakter tuğla üretim süreci.....	10
4.2. Hammadde hazırlama ve harman hazırlama proseslerinin çevreye etkileri...	11
4.3. Presleme ve kurutma aşamalarındaki işlemlerin çevreye etkileri.....	12
5.1. LCA süreci	14
5.2. LCA' nın kullandığı sistem sınırları	23
6.1. LCC Yöntemi	34
6.2. Maliyet dağılım yapısı	34
8.1. SimaPro 8.0.1 yazılımı ekranı.....	42
8.2. LCA analizindeki sistem sınırları.....	43
8.3. Sörmaş Söğüt Refrakter Malzemeleri A.Ş. tuğla üretim sistemi	46
8.4. Hollanda' da üretilen deniz suyu sinter manyezit üretim akış şeması	47
8.5. Çin' de üretilen Sinter Spinel üretim akış şeması	50
8.6. LCC modeline maliyet kategorilerinin eklenmesi	54
8.7. Proseslere ait ekonomik verilerin girilmesi.....	55
8.8. LCC modelinin analizinin yapılması	55
9.1. 1 ton refrakter tuğla üretimi için LCA karakterizasyon sonuçları	59
9.2. Abiyotik kaynakların tükenme potansiyeline etki eden prosesler	60
9.3. Abiyotik kaynakların tükenme(fosil yakıt)potansiyeline etki eden prosesler.	61
9.4. Asidifikasyon potansiyeline etki eden proseslerin dağılımı.....	62
9.5. Fotokimyasal sise etki eden proseslerin dağılımı	62
9.6. Küresel ısınma potansiyeline etki eden proseslerin dağılımı	63
9.7. Ozon tabakasının tükenme potansiyeline etki eden proseslerin dağılımı	64
9.8. Ötrofikasyon potansiyeline etki eden proseslerin dağılımı.....	64
9.9. İnsan toksisitesine etki eden proseslerin dağılımı	65
9.10. Deniz suyu toksisitesine etki eden proseslerin dağılımı	66
9.11. Yüzey suları toksisitesine etki eden proseslerin dağılımı	67
9.12. Kara ekosistemi toksisitesine etki eden proseslerin dağılımı.....	68
9.13. 1 ton refrakter tuğla üretimi için hassasiyet analizi sonuçları.....	71

9.14. 1 ton refrakter tuğla üretimi için LCC karakterizasyon sonuçları.....	74
9.15. Manyezit-spinel refrakter tuğlanın maliyet bileşenlerinin dağılımı.....	75
9.16. Çevresel maliyetlerin proseslere göre dağılımı.....	75
9.17. Etki kategorileri bazında çevresel maliyetler	76
9.18. Refrakter tuğla üretiminde harcanan enerjinin proseslere göre dağılımı	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

3.1. Oksitli malzemelerin kimyasal reaksiyon davranışına göre karakterizasyonu	6
3.2. Spinel türlerinin özellikleri	8
4.1. Farklı refrakter ürünleri için gaz emisyonları	13
5.1. LCA analizi için kullanılan yazılımlar	20
5.2. LCA çalışmalarında sıklıkla kullanılan etki kategorileri	26
8.1. LCA bileşenlerinin sınıflandırılması	45
8.2. Refrakter üretim tesisinde üretilen manyezit – spinel tuğlanın özellikleri	45
8.3. Hollanda deniz suyu sinter manyezit üretimi için gaz emisyonları	48
8.4. Hollanda deniz suyu sinter manyezit üretim tesisi atıksu deşarjları	48
8.5. Meksika deniz suyu sinter manyezit üretim tesisi gaz emisyonları	49
8.6. LCC bileşenlerinin sınıflandırılması	53
9.1. Refrakter tuğla üretiminin toplu karakterizasyon sonuçları	57
9.2. Refrakter tuğla üretiminin toplu normalizasyon sonuçları	58
9.3. Manyezit refrakter tuğla üretimi için enerji tüketim verileri	68
9.4. Farklı refrakter ürünler için baca gazı değerleri	69
9.5. Manyezit spinel refrakter tuğla için yeniden hesaplanan emisyon verileri	69
9.6. 1 ton refrakter tuğla üretimi için hassasiyet analizi toplu sonuçları	72
9.7. 1 ton manyezit spinel tuğla üretiminin LCC karakterizasyon sonuçları	73
Ek-1.1. Refrakter üretim tesisinin sinterleme sırasındaki gaz emisyonları	86
Ek-1.2. Hollanda deniz suyu sinter manyezit üretim tesisi atık su deşarjları	87
Ek-3.1. Spinel üretimi için gereken standart oluşum entalpileri	89
Ek-3.2. MgO ısı kapasitesi katsayıları	90
Ek-3.3. MgCO ₃ ısı kapasitesi katsayıları	90
Ek-3.4. CO ₂ ısı kapasitesi katsayıları	91
Ek-3.5. MgAl ₂ O ₄ ısı kapasitesi katsayıları	91
Ek-3.6. Spinel üretimindeki maddelerin molekül ağırlıkları	92
Ek-3.7. Spinel üretiminde kullanılan HFO'nun bileşeni	94
Ek-3.8. Spinel üretiminde varsayılan emisyon faktörleri	94
Ek-3.9. Spinel üretiminde oluşan emisyonlar	95
Ek-4.1. Refrakter üretim tesisinin malzeme ve enerji envanteri	96
Ek-4.2. Refrakter üretim tesisinin emisyon envanteri	97

Ek-4.3. 1 ton MgO için Hollanda deniz suyu sinter manyezit üretim tesisi envanteri	98
Ek-4.4. 1 ton MgO için Meksika deniz suyu sinter manyezit üretim tesisi envanteri	99
Ek-4.5. 983 kg MgAl ₂ O ₄ için sinter spinel üretim tesisi envanteri	100
Ek-4.6. Deniz suyu sinter manyezit üretim tesislerinin aynı kabul edilen verileri.....	101
Ek-5.1. İçsel maliyet envanteri	102
Ek-5.2. Dışsal maliyet envanteri	103

SİMGELER KISALTMALAR DİZİNİ

- ADP : Abiyotik Kaynakların Tükenme Potansiyeli (Abiotic Depletion Potential)
- AP : Asidifikasyon Potansiyeli (Acidification Potential)
- CE : Avrupa'ya Uygunluk Belgesi (European Conformity)
- CEN : Avrupa Standardizasyon Komitesi (European Committee for Standardization)
- CFC : Kloroflorokarbon (Chlorofluorocarbon)
- EPD : Çevresel Ürün Beyanı (Environmental Product Declaration)
- DIN : Alman Standardizasyon Enstitüsü (German Institute for Standardization)
- FAETP : Yüzey Sularına Olan Ekotoksisite Potansiyeli (Fresh Water Aquatic Ecotoxicity Potential)
- GWP : Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential)
- HFO : Ağır Yakıt (Heavy Fuel Oil)
- HTP : İnsanlar Üzerine Olan Toksik Etki Potansiyeli (Human Toxicity Potential)
- IEC : Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
- ISO : Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu (International Organization for Standardization)
- LCA : Yaşam Döngüsü Analizi/Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment)
- LCIA : Yaşam Döngüsü Etki Analizi (Life Cycle Impact Assessment)
- LCC : Yaşam Döngüsü Maliyeti (Life Cycle Cost)
- NIST : Ulusal Standart ve Teknoloji Enstitüsü (National Institute of Standards and Technology)
- ODP : Ozon Tabakasının Tükenmesi Potansiyeli (Ozone Layer Depletion Potential)
- PRE : Avrupa Refrakter Üreticileri Federasyonu (European Refractories Producers Federation)

SİMGELER KISALTMALAR DİZİNİ (DEVAM)

- POP : Fotokimyasal Sis Potansiyeli (Photochemical Oxidation Potential)
- SCR : Seçici Katalitik İndirgeme Prosesi (Selective Catalytic Reduction Process)
- SEREF : Teknik Seramik ve Refrakter Üreticileri Derneği (Technical Ceramics and Refractories Manufacturers Association)
- SETAC: Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği (Society of Environmental Toxicology and Chemistry)
- TEP : Kara Ekosistemine Olan Toksik Etki Potansiyeli (Terrestrial ecotoxicity Potential)
- UNEP : Birleşmiş Milletler Çevre Programı (United Nations Environment Programme)

1. GİRİŞ

Refrakter üretimi, içindeki kurutma ve pişirme işlemlerinden dolayı, oldukça yoğun enerji tüketen bir sektördür. Üretim proseslerine, kullanılan hammaddelere ve yakıtlara bağlı olarak, bu tesisler gaz emisyonlarının yanı sıra, su ve toprağa da çeşitli deşarjlara neden olabilmektedirler. Bu bağlamda, ülkemizde, 25 Nisan 2012’de yayımlanan “Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik” gereğince de refrakter üretimi yapan tesislerin karbondioksit emisyonlarını takip etmesi ve azaltması zorunluluk haline gelmiştir.

1989’da yürürlüğe giren ve en son 1 Temmuz 2013’de yenilenen “Avrupa Yapı Malzemeleri Yönetmeliği” ile, bir yapı malzemesinin taşınması gereken mekanik dayanım, yangın durumunda emniyet, enerji ve ısı tasarrufu özelliklerinin yanı sıra, malzemelerin üretiminde doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımının sağlanması da bir gereklilik haline gelmiştir. Sürdürülebilirlik kavramının yeni yönetmeliğe eklenmesi ile diğer Avrupa ülkelerinin olduğu gibi Türkiye’nin de bazı yükümlülükleri vardır. Söz konusu yönetmelik tuğla ve yapı kiremitleri, sağlık gereçleri, duvar ve yer karoları, teknik seramikler ve refrakter malzemeler gibi yapı malzemelerini kapsamakta ve Avrupa’da kullanılacak ürünlerin Avrupa’ya Uygunluk (CE, European Conformity) belgesinin yanı sıra Çevresel Ürün Beyanı (EPD, Environmental Product Declaration) belgesine de sahip olmasını öngörmektedir. Bu nedenle, Avrupa’ya ihraç edilen malzemelerin EPD belgelerinin olması ülkemizde de zorunlu hale gelmiştir. Malzemelerin çevresel performanslarını nicel değerler olarak beyan eden ve çevresel performansını şeffaf bir şekilde yansıtan EPD belgeleri, sürdürülebilir sistemlerin oluşumunda büyük bir önem taşımaktadırlar. EPD belgeleri ancak, malzemenin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment, LCA) yapılarak alınabilmektedir. Çünkü LCA, bir eylemin/bir ürünün tüm çevresel boyutlarını; ham maddenin doğadan eldesinden, tüm atıklar tekrar doğaya dönene kadar değerlendiren bir sistemdir. Refrakter tuğla üretiminin tüm yaşam döngüsü boyunca maliyetlerinin öngörülebilmesi açısından önemli olan, Yaşam Döngüsü Maliyeti (Life Cycle Cost, LCC) Analizi ise, bir sistem, donanım ya da tesisin, tedarikten, işletme, bakım onarım ve elden çıkarmaya kadar ki tüm aşamalarında

ortaya çıkan maliyetleri, LCA analizi ile bütünsel olarak değerlendiren bir analizdir.

Dolayısıyla bu çalışmada, seramik sektörünün önemli bir parçasını oluşturan refrakter tuğla üretim prosesinin, çevreye olan etkilerini değerlendirmek amacı ile Sörmaş Söğüt Refrakter Sanayi A.ř.'de Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) ve Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) alışmalarının gerçekleştirilmesi planlanmış olup, bu çalışma, ölkemizde ve literatürde refrakter üretiminin LCA ve LCC analizlerinin birlikte yapılacağı ilk çalışma niteliğini taşımaktadır.

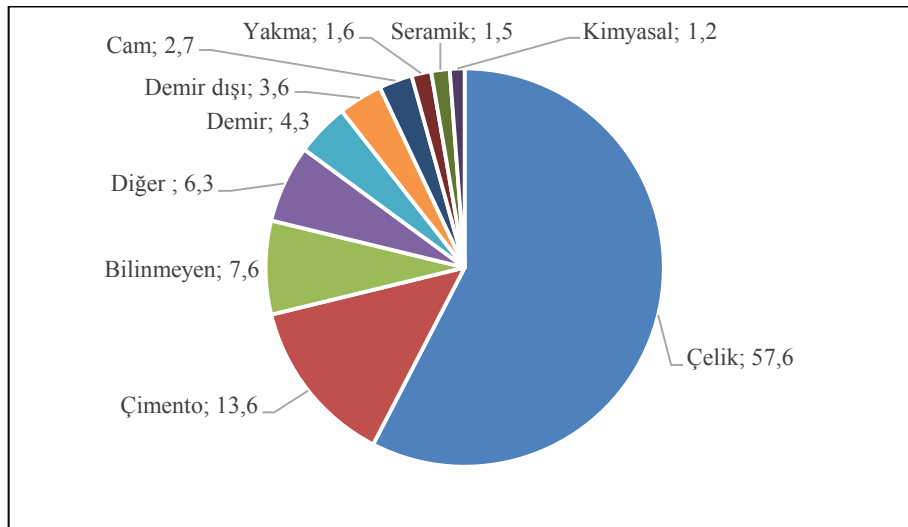
Çalışmada, refrakter tuğla üretiminin LCA ve LCC analizlerinin sonuçları birlikte yorumlanarak, firmanın çevresel performansının iyileştirilmesine yönelik öneriler sunulmuş ve refrakter pazarında rekabet ortamı sağlayacak EPD evresel Ürün Beyanı belgesi alımı için bir altyapı oluşturulmuştur.

2. AVRUPA VE TÜRKİYE’ DE REFRAKTER ÜRETİMİ

Avrupa Refrakter Üreticileri Derneği verilerine göre, Avrupa’da 2012 yılı itibariyle toplam refrakter malzeme üretimi 4 milyon tona ulaşmıştır (PRE Annual Report, 2013). Avrupa Refrakter malzemelerinin 2012 yılı toplam satışları bir önceki yıla göre %12 büyüyerek 4.232 Milyon (4,23 Milyar) Euro olarak gerçekleşmiştir.

Bu rakamların içerisinde AB ülkelerinin yanı sıra Türkiye de bulunmaktadır. Avrupa seramik sanayi içerisinde refrakterler %16,5 pay ile üçüncü sırada gelmektedir. Birinci sırada %32,2 pay ile yer ve duvar karoları, ikinci sırada ise %20,9 pay ile tuğlalar ve çatı kiremitleri gelmektedir. Avrupa refrakter sanayi ihracatının %52’si AB dışına yapılmakta olup; %11,3 ile birinci hedef pazar Rusya, %8,8 pay ile ikinci hedef pazar ABD, %5,3 pay ile Ukrayna üçüncü hedef pazar, %5,1 pay ile Hindistan dördüncü hedef pazar ve %4,8 pay ile Türkiye beşinci hedef pazar olmuştur. Avrupa’ya yapılan ithalatta değer cinsinden sırasıyla %41,3 pay ile Çin (miktar olarak %60,7 pay), %19,0 pay ile ABD (miktar olarak %4,4 pay), %13,1 pay ile Japonya (miktar olarak %1,6 pay) ve %3,3 pay ile Türkiye (miktar olarak %6,7 pay) gelmektedir (SEREF, 2014).

Avrupa’da üretilen refrakter ürünlerin yarısından fazlası çelik endüstrisinde kullanılmakta olup, bunu çimento endüstrisi takip etmektedir. Refrakter ürünlerin son kullanıcı sektörlerinin dağılımı Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Refrakter ürünlerin son kullanıcı uygulamalarının dağılımı (PRE Annual Report, 2013)

Türkiye’de ise yaklaşık 20 adet refrakter malzeme üreten firma bulunmakta olup, refrakter malzeme üretimi özellikle demir çelik teknolojisindeki ilerleme ile yön bulmaktadır. Bu firmaların toplam yıllık üretim kapasitesi 500 bin ton civarında olup, üretimin bir kısmı Avusturya, Ukrayna, Almanya, Yunanistan, Mısır, İsveç, İtalya, Makedonya ve Cezayir’ e ihraç edilmektedir (Türkiye seramik sektörü strateji belgesi ve eylem planı, 2012).

3. REFRAKTER MALZEMELERİN TANIMI ve SINIFLANDIRILMASI

Geleneksel olarak; yüksek sıcaklıkta çalışan fırın ve benzeri ünitelerin yapımında veya içinin kaplanmasında kullanılan, sıcaklık altında fiziksel ve kimyasal nitelikte çeşitli aşındırıcı etkilere karşı ergimeden ve fiziksel-kimyasal özelliklerini koruyarak dayanabilen malzemelere “Refrakter Malzemeler” denilmektedir.

Refrakter malzemeler, yüksek sıcaklıklarda her türlü ergimiş metal, cüruf, asit vb. korozif maddelere dayanıklı, mekanik darbe ve sürtünme etkilerine karşı fiziksel ve kimyasal özelliğini kaybetmeyen, yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerdir. Bu özellikleri nedeniyle refrakterler, endüstride yüksek sıcaklığın gerekli olduğu tüm proseslerde, konstrüksiyonu koruma ve izole etme amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Routschka, 1997).

Refrakter Malzemeler, ISO tarafından “ Bünyelerinin tamamı metal veya alaşım olmayan fakat metalik bir bileşime sahip olabilen ve refrakterliği 1500°C olan malzeme ve mamuller” şeklinde tanımlanmaktadır (Kaya, 2014).

DIN 51060 standardına göre, refrakter malzemeler üç grupta toplanabilir:

- Refrakter (min. 500°C)
- Ateşe dayanıklı (1500°C)
- Yüksek refrakter (min. 1800°C) (Kaya, 2014).

Refrakter malzemeler; seramik, cam, çimento gibi metalik olmayan anorganik malzeme sınıfına girer.

Refrakter malzemeler yüksek sıcaklığın gerekli olduğu proseslerde kullanıldığından dolayı refrakter bir malzemedan beklenen en temel özellik yüksek sıcaklıklarda deforme olmadan, ergimeden uzun süre dayanmasıdır. Sıcaklığın yanında refrakter malzemenin kullanıldığı atmosfer de malzemenin özelliklerini etkiler. Dolayısıyla refrakter malzeme yüksek sıcaklıklarda bulunduğu fırın atmosferinde biçimini ve rijitliğini korumalı, mekanik etkilere veya fiziksel aşınmalara karşı dirençli olmalıdır. Bunun yanı sıra yüksek ısılarda yüklendiği ağırlığı deforme olmadan taşımalı, ısıl şoklara dayanmalı, devamlı doldurulup boşaltılan şarjlardan doğan sürtünmeye ve erozyona karşı dirençli olmalıdır. Bir refrakter malzeme bulunduğu ortamın kimyasal etkilerine direnç göstermeli, pişme ve ergime sırasında oluşan ergimiş metal, metal buharları SO₂,

SO₃, CO, CO₂, CO₃ gibi gazlara, su buharı, klor gibi malzeme ve kimyasalların etkilerine karşı dayanıklı olmalıdır (Kyokai, 1998).

3.1. Refrakter Malzemelerin Sınıflandırılması

Refrakter malzemeler kimyasal bileşimlerine göre asidik, nötr veya bazik olarak sınıflandırılabilirler (Routschka, 1997).

Çizelge 3.1. Oksitli malzemelerin kimyasal reaksiyon davranışına göre karakterizasyonu

Refrakterin Sınıfı	Reaksiyon	Refrakter Malzeme
Asidik	Oksit + H ₂ O → Asit	Silika, Al ₂ O ₃ – SiO ₂ ürünleri, zirkon-silikat
Bazik	Oksit + H ₂ O → Baz (Hidroksit)	Magnezya ve dolomit esaslı malzemeler
Hemen hemen Nötr	Reaksiyon asidik değil, bazik de değil	Alümina, kromit, spinel, pikromit, fosterit

Asidik refrakterler yüksek miktarda SiO₂ içerirler ve yüksek sıcaklıklarda cüruflar ve ergiticiler ve bazik refrakterler ile reaksiyona girerler. Bazik refrakterler, CaO ve MgO veya her ikisini içerirler ve yüksek sıcaklıklarda cüruflar ve asitlerle reaksiyona girerler. Nötr refrakterler ise ne asidik ne de bazik karakterli olmalarıyla bilinmelerinin yanı sıra, yüksek sıcaklıklarda asidik ve bazik malzemelere, cüruflara ve ergiticilere (flux) karşı dayanıklıdır (Routschka, 1997).

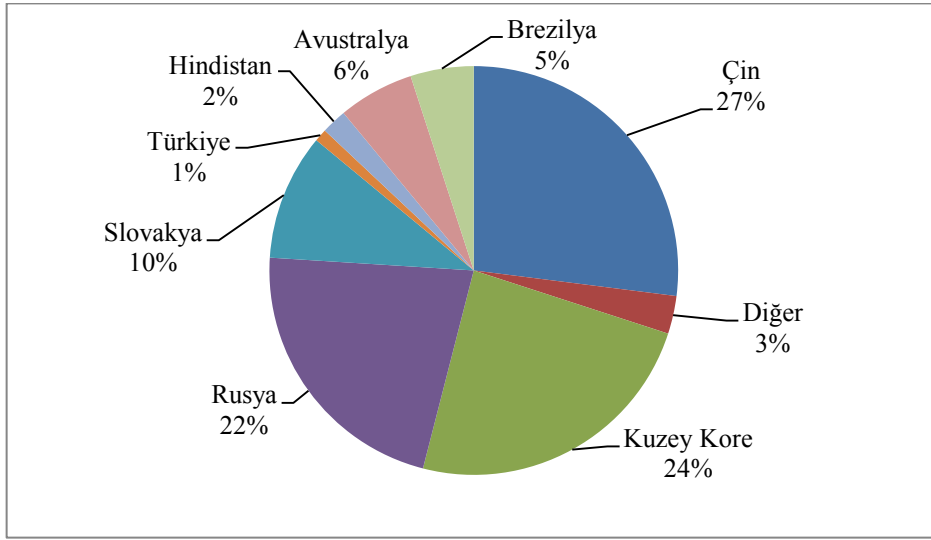
3.2. Manyezit Refrakterler

Bu tez çalışmasının konusu olan ve bazik refrakter malzemeler grubuna giren manyezit refrakterler, manyezit cevherinden veya deniz suyu manyezitinden üretilen periklas (MgO)'dan yapılmaktadır. Doğal manyezit veya deniz suyu manyeziti 1600-2000°C arasında sinterlenerek sinter manyezit veya refrakter özellikte manyezit elde edilmektedir. Şekillendirilen manyezit refrakterler emprenye edilerek veya katran ya da reçinelerle bağlanarak cüruf etkilerine dayanımları artırılır.

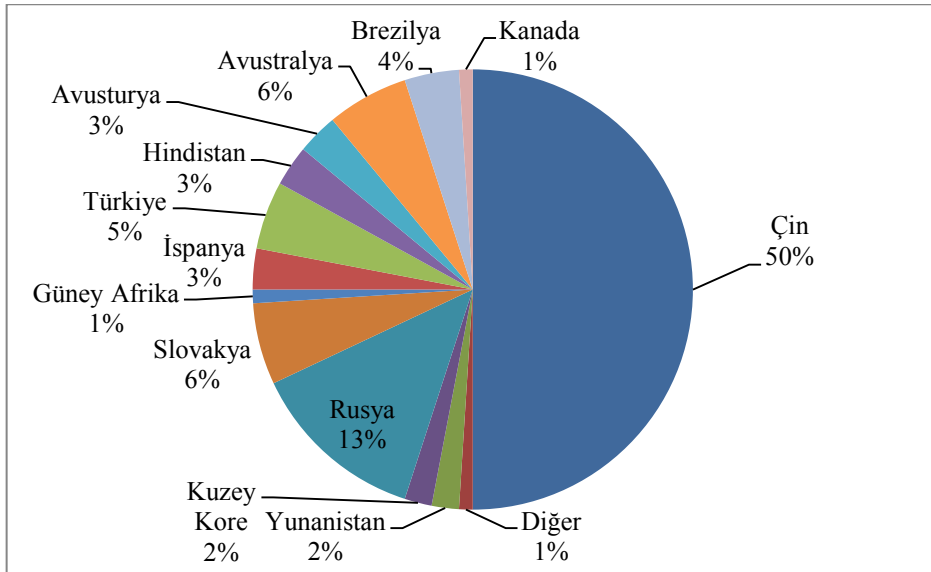
Bu mineral pişirme esnasında manyezit, MgO ve CO₂'ye dönüşür. Bu sırada, hammaddenin takriben %50'si CO₂ olarak uçar. Şartlara bağlı olarak CO₂'nin ayrışma sıcaklığı 350-580°C'dir. Manyezit, döner fırınlarda, CO₂ çıkışı

bittikten sonra uygun bir hacim sabitliğine erişebilmek için 1700°C'nin üzerinde sinterlenir (Kaya, 2014).

Manyezit, kimyasal olarak magnezyum karbonat yapısındadır ve manyezitin cevher halini oluşturmaktadır. Daha sonra çıkarılan cevher çeşitli proseslerden geçirilerek refrakter malzeme hammaddesi olan manyeziti meydana getirmektedir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de dünya manyezit kaynakları ve üretilen manyezit oranları ülkelere göre verilmiştir (PRE Annual Report 2011).



Şekil 3.1. 2005 yılı verilerine göre dünya manyezit kaynakları (>150 milyon ton) (PRE Annual Report 2011).



Şekil 3.2. 2004 yılı verilerine göre üretilen manyezitin ülkelere göre dağılımı (8 milyon ton) (PRE Annual Report 2011).

Manyezit, cevherden 3 farklı tipte ürün olarak sentezlenebilir:

- Doğal Sinter Manyezit; Cevher olarak magnezit çıkarıldıktan sonra döner fırınlarda sinterlenerek elde edilen manyezittir.
- Deniz Suyu Sinter Manyezit; Çekilmiş deniz suyundan kalan MgCl tuzundan ekstrakte edilmesi sonrasında döner fırında sinterleme ile üretilir. Menşei büyük ölçüde Hollanda olmakla birlikte Meksika ve İsrail'dir. Günümüzde artık İsrail'den elde edilememektedir.
- Fused Manyezit; Elektrik ark ocaklarında ergitilerek elde edilen bu manyezit türünde proses sıcaklığı 3000°C civarlarındadır (Kaya, 2014).

Çimento sanayinde en çok kullanılan refrakter malzemeler manyezit krom ($MgO-Cr_2O_3$) refrakterler olmasına rağmen bu tuğlalar bünyelerindeki krom mevcudiyetinden dolayı insan sağlığını tehdit eden toksik özelliklere sahiptir. Bu nedenle Cr_2O_3 içermeyen alternatif refrakter kullanma ihtiyacı doğduğundan, manyezit spinel ($MgO-MgAl_2O_4$) tuğlalar, krom içeren refrakterlere alternatif olarak üretilmiştir. Bunun yanı sıra, manyezit spinel refrakterlerin, manyezit krom refrakterlere göre önemli bir diğer avantajı da 1,5 - 2 kat daha uzun ömürlü olmasıdır (Gruver, 2001).

Manyezit spinel refrakterin diğer bir hammaddesi olan spinel, kristalografik olarak özel bir yapıyı temsil etmekte olup. $A(II)O.B(III)_2O_3$ genel formülü ile temsil edilir. Magnezyum alümina spinel ($MgAl_2O_4$), magnezya kökenli refrakter malzemelerin önemli bir bileşenidir ve MgO bakımından zengin, stokiyometrik ve alümina bakımından zengin olmak üzere üç gruba ayrılır. Spinel türlerinin özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Magnezyum alümina spinel üretimi için, sinter spinel, ergitme (fused) spinel ve pişirme ile spinel oluşumu yöntemleri kullanılmaktadır (Kaya, 2014).

Çizelge 3.2. Spinel türlerinin özellikleri (Kaya, 2014).

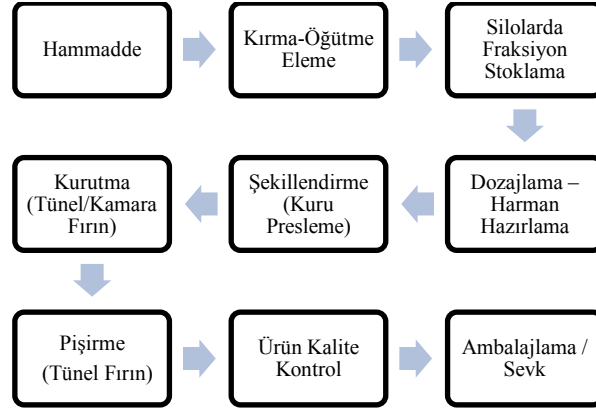
Spinel Özellikleri	Kromit	Spinel	Hersinit
Üretim Prosesi	Doğal	Sinter/Fused	Fused
Menşei	Türkiye	Çin	Çin
Al_2O_3 (%)	15	66	58
Fe_2O_3 (%)	14	0,3	41
Cr_2O_3 (%)	48
MgO (%)	16	33	...

4. REFRAKTER TUĞLA ÜRETİM PROSESİ VE ÇEVRESEL AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Refrakter ürünler mineral bazlı ürünler olmakla birlikte, hem doğal hem de sentetik olarak hazırlanmış hammaddelerden oluşmaktadır. Refrakter endüstrisinde kullanılan mineral esaslı hammaddeler genellikle karmaşık jeolojik prosesler sonucu oluşmuş inorganik metalik olmayan kristalin katı şeklindedir. Hammaddeler toplam üretim maliyetinin %60-70'ini oluşturduğundan dolayı hammadde refrakter sektöründe önemli rol oynamaktadır (CPCB, 2007).

Manyezit özellikli hammaddeler özelliklerine ve üretimde kullanılacak gruplarına göre hammadde sahasındaki yerlerine depolanırlar. Manyezit içerikli hammaddeler üretim aşamasında kullanım durumuna göre kırma – öğütme ünitesinde boyut küçültme işlemine tabi tutulurlar. Çeneli kırıcıda kırılan hammaddeler taşıyıcı bant vasıtasıyla darbeli kırıcıya gelir. Burada da kırılan hammaddeler eleğe taşınır ve elekte elendikten sonra elek altında kalan malzeme farklı boyutlarda olmak üzere pnömomatik hava sevkiyatı ile silolara alınır. Siloya alınan malzemeler taşıyıcı bantlar ile bilyalı değirmenlere taşınır. Tekrar boyut küçültme işleminden geçirilen hammadde tekrar silolara gönderilir.

Harman hazırlama aşamasında, hammaddeler üretimde kullanılacak ürün kompozisyonları çerçevesinde belirli oranlarda silolardan tartım bunkerine alınır. Tartımı yapılan hammaddeler miksera sevk edilir. Katkı malzemeleri de ilave edildikten sonra karıştırılarak hazırlanan harman transfer arabası ile preslere gönderilir. İstenilen boyutlarda preslenen refrakter tuğlalar kurutulur ve yüksek sıcaklıkta sinterlenir. Refrakter tuğla üretim süreci ana hatları ile Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Refrakter tuğla üretim süreci

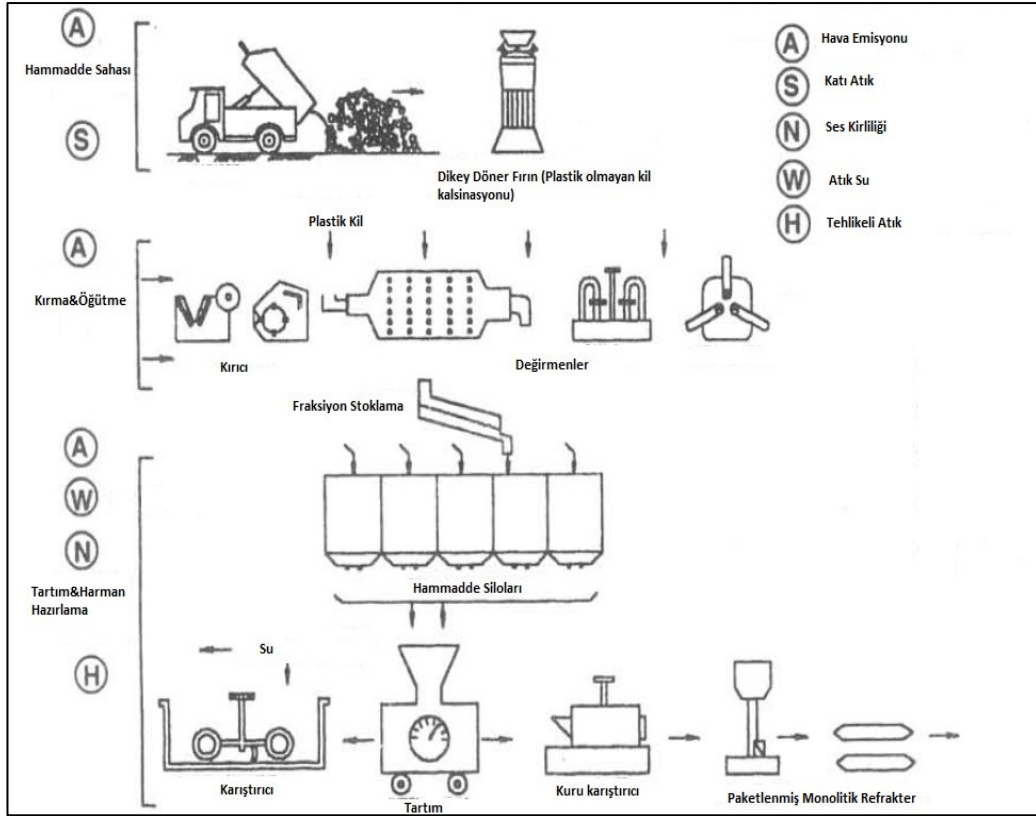
Refrakter tuğla üretimi sırasında bütün proseslerde çevreye etki söz konusu olabilmektedir.

Refrakter malzemeler tipi ve kalitesine göre farklı hammaddelerden imal edilebilmektedir. Hammaddeler farklı olmasına rağmen üretimde hammaddelerin tabi olduğu işlemler genellikle benzer olmakla birlikte, kullanılan ateş kili, kyanit, boksit ve manyezit gibi hammaddeler yüksek sıcaklıklarda kalsinasyon işlemine tabi tutulurlar. Kalsinasyon sırasında çeşitli hava emisyonları ve hammaddelerin depolanmaları sırasında da toz emisyonları ortaya çıkabilmektedir (CPCB, 2007).

Refrakter tuğla üretiminde kırma-öğütme-eleme aşamaları prosesin ilk aşamalarıdır. Hammaddeler istenilen refrakter kompozisyonunun sağlanması için farklı tane dağılımlarının elde edilmesi amacıyla kırma ve öğütme aşamasından geçirilirler. Farklı hammaddelerin tane boyutlarının küçültme işlemi sonucunda 100 µm ve daha küçük tane boyutlu taneler elde edilebilmektedir. Hava tarafından taşınan bu taneler havada uzun bir süre kalmakta ve insan sağlığına ciddi zararlar verebilecek toz emisyonuna neden olmaktadır.

Boyutu küçültülen hammaddeler istenilen refrakter türünün üretimi için farklı fraksiyonlara ayrılırlar. Fraksiyonlara ayırma işlemi büyük tane boyutları için titreşimli elekler vasıtasıyla yapılırken, daha küçük tane boyutları için hava sınıflandırıcılar kullanılabilir. Hava ile ayırma işleminde büyük taneler sirkülasyona tabi olurken küçük taneler hammadde silolarına aktarılmaktadır. Bu işlem sırasında ortaya çıkan toz ise kullanılan toz önleme sistemleri ile kontrol altına alınmaktadır.

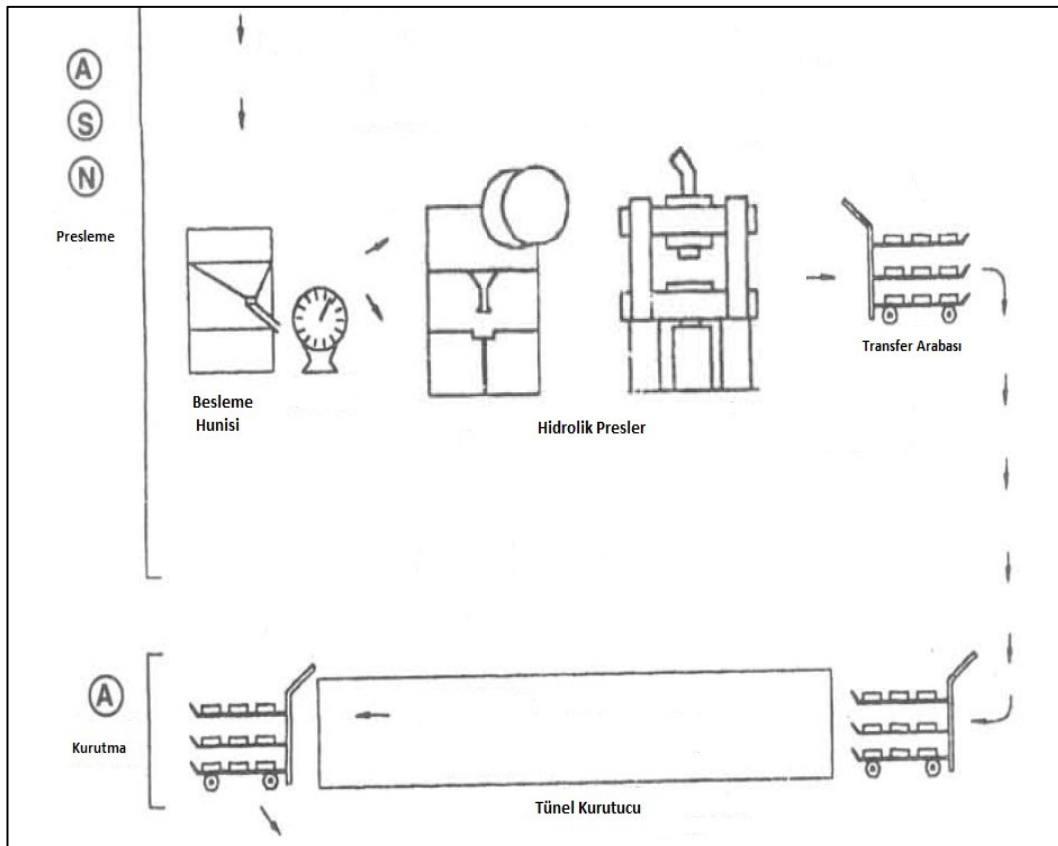
Harman hazırlama aşamasında farklı tane boyutlarında elde edilen hammaddeler istenilen miktarlarda tartılırlar. Tartım işlemi tartım arabalarıyla veya manuel olarak tartım makineleri kullanılarak yapılabilmektedir. Tartım arabaları hammaddelerinin karıştırıcıya aktarımı sırasında tahliye noktasındaki toz genellikle toz tutucular ile tutulmaktadır. Karıştırma işlemi uygun bir karıştırıcı kullanılarak yapılır. İşlem sonunda boşaltım noktasında ortaya çıkan toz için uygun toz tutucular kullanılmaktadır. Harman hazırlama sırasında ünitelerin temizlenmesi için kullanılan atık su genellikle tekrar kullanılmaktadır. Hammadde hazırlama aşamasından harman hazırlama aşamasına kadar olan işlemlerin çevreye olası etkileri Şekil 4.2’ de verilmiştir.



Şekil 4.2. Hammadde hazırlama ve harman hazırlama proseslerinin çevreye olası etkileri (CPCB, 2007)

Tartım yapılarak karıştırılan hammaddeler istenilen boyutlarda üretilmek üzere presleme ünitesine gönderilir. Presleme işlemi plastik şekillendirme (ekstrüzyon), yarı kuru presleme ya da kuru presleme şeklinde olabilmektedir. Kuru presleme sırasında çıkan toz emisyonu ve gürültünün yanı sıra kullanılmış, ömrü tükenmiş kalıp gibi katı atıklar ve atık yağ gibi tehlikeli atıklar ortaya çıkabilmektedir.

Şekillendirilmiş tuğlalarda presleme sonrası nem oranı %4-%15 arasında değişmekte olup sinterleme işleme için tünel fırına girmeden önce nem oranının %1 in altına düşürülmesi gerekmektedir. Kurutma işlemi genellikle tünel fırınlarda 150°C - 250°C arasında gerçekleştirilir. Kurutma işlemi su buharı ile birlikte çeşitli gaz emisyonlarına neden olmaktadır. Çoğu refrakter üretim tesisinde pişirme işlemi sırasında çıkan atık sıcak hava kurutma amaçlı kullanılmaktadır. Kullanılmadığı takdirde organik ve inorganik kirletici emisyonlar oluşabilmektedir. Kurutma ve presleme proseslerinin çevreye olası etkileri Şekil 4.3' te verilmiştir.



Şekil 4.3. Presleme ve kurutma aşamalarındaki işlemlerin çevreye olası etkileri (CPCB, 2007)

Refrakter üretim tesislerinde refrakter tuğlaların pişirme sürecinde çoğunlukla fırın içerisindeki sıcaklığın homojen dağılımını sağlaması açısından tünel fırın kullanılmaktadır. Tünel fırınlar ön ısıtma, pişirme ve kurutma olmak üzere 3 kısımdan oluşmaktadır. Gaz emisyonu ve toz emisyonları özellikle pişirme sırasında ortaya çıkmaktadır.

Hammaddenin kalsinasyonu ya da tuğlanın pişirimi sırasında ortaya çıkan SO₂ genellikle kullanılan yakıttan ya da hammaddeden kaynaklanmaktadır.

Refrakter üretim sektörünün ticari olarak kanıtlanmış bir kontrol sistemi bulunmadığından dolayı SO₂ emisyonunun havaya en iyi şekilde deşarjı baca uzunluğunu minimuma indirme gibi önlemlerin alınmasıyla mümkün olabilmektedir. NO_x emisyonunun azaltılması için seçici katalitik indirgeme prosesi (SCR) veya nonkatalitik indirgeme prosesi gibi prosesler kullanılabilir. Ancak daha az yakıt tüketimi ya da en uygun yakıt brülörünün seçimi gibi mevcut en iyi teknolojilerin kullanımı NO_x emisyonunu minimize etmeye yardımcı olacaktır. Farklı refrakter ürünler için gaz emisyonları Çizelge 4.1’de verilmiştir (CPCB, 2007).

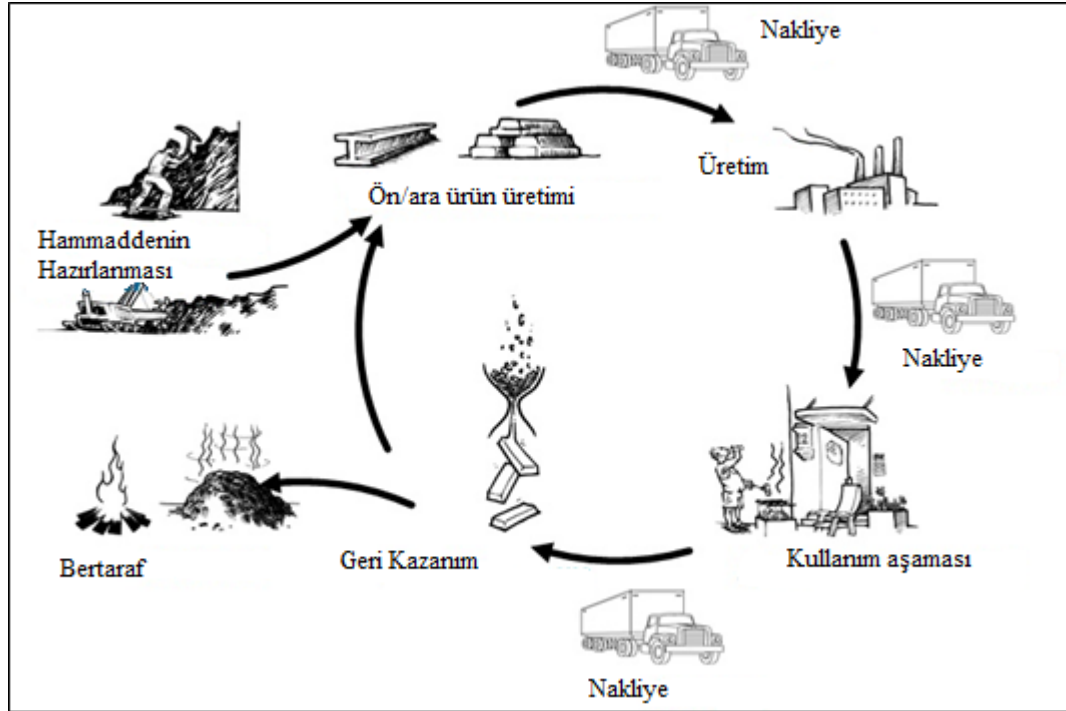
Çizelge 4.1. Farklı refrakter ürünleri için gaz emisyonları (EIPPCB, 2007a)

Emisyon Bileşeni	Konsantrasyon (mg/m ³)		
	Manyezit	Yüksek Alüminyum Oksit içeren Ürünler	Silika
Toz	8-35	5-80	10-25
NO ₂ (NO _x)	110-470	30-250	5-100
SO ₂ (SO _x)	90-580	10-430	20-150
CO	12-180	30-150	10-50
HF (inorganik gazlı flor bileşikleri)	0,5-1,5	5-50	1-3

5. YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ (LCA)

Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) bir ürün ya da hizmet üretiminde kullanılan hammaddelerin elde edilmesinden başlayarak, ilgili tüm üretim, sevkiyat, tüketici tarafından kullanım ve kullanım sonrası atık olarak bertarafını da kapsayan yaşam döngüsünün farklı aşamalarındaki çevresel etkilerini belirlemek, raporlamak ve yönetmek için kullanılır. Söz konusu çevresel etkiler iklim değişikliği, stratosferik ozon tabakasındaki incelme, ötrofikasyon, asidifikasyon, toksik emisyonlar gibi kategoriler bazında değerlendirilir.

LCA, bir ürün ya da sürecin tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkabilecek çevresel etkileri kapsadığından, değerlendirilen bu çevresel etkileri tüm boyutlarıyla ve kapsamlı olarak yansıtır (Şekil 5.1). LCA ile gerçekleştirilebilen kapsamlı ve bütünsel değerlendirme, söz konusu ürün ya da sürece ilişkin yapılacak olası modifikasyonların yol açacağı çevresel etkilerin farklı senaryolar için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesini ve ilgili karar alma süreçlerine yansıtılabilmesinin yanı sıra belirli bir tesisteki endüstriyel bir prosesin çevreye olan etkilerinin belirlenmesi ile birlikte firmanın tedarikçileri ve müşterileri arasındaki ilişkileri de ele almaktadır (EPA, 2006; Çokaygil, 2005).



Şekil 5.1. LCA süreci

Amerika’ da LCA ile ilgili ilk temel düşünceler 1960’ların sonunda 1970’lerin başında ortaya çıkmıştır. Coca Cola firmasının yöneticisi Teasley, hammadde kullanımının enerji ile ilişkisini görmüş ve farklı paketleme opsiyonları kullanmanın etkilerini ortaya koymuştur. 1969 yılında Coca Cola şirketinin destekleriyle ABD’deki Midwest Araştırma Enstitüsünde Kaynak ve Çevre Profil Analizi (REPAs) isimli projeye farklı içecek kapları karşılaştırılarak, hangisinin çevreye ve doğal kaynaklara daha az zarar verdiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır (Hunt ve ark., 1996).

Beşikten - mezara terimi ise 1980’li yılların sonları ve 1990’lı yılların başlarından itibaren malzemelerin ve ürünlerin değerlendirilmesinde kullanılmaya başlanmıştır. LCA’nın çevresel yönetimde yaygın bir şekilde kullanılması gerektiği, 1992 yılındaki Birleşmiş Milletler Dünya Zirve Toplantısında bildirilmiş, 1993 yılında da geniş kapsamlı bir “The LCA Sourcebook: A European Guide to Life Cycle Assessment” isimli kitap yayınlanmıştır (Hunt ve ark., 1996).

5.1. LCA Standartları

Uluslararası standardizasyon örgütü (ISO) çok sayıda ülkenin ilgili ulusal kurumunun katılımı ile birçok ürün ve etkinliğin standartlaştırılmasına yönelik faaliyet gösteren bir kuruluştur. ISO’nun daha çok 14001 Çevre Yönetim Sistemleri ile tanınan 14000 serisi standartları arasında LCA’ya ilişkin 14040 sayılı serisi de bulunmaktadır. ISO’nun 1994 yılından bu yana geliştirmekte olduğu 14040 standart serisi LCA’nın hem teknik hem de organizasyonel yapısı ile ilgilidir. LCA sonuçlarının kritik değerlendirilmesi, sonuçlarının kamuoyu ile paylaşılması ve paydaş katılımı süreçleri LCA’nın organizasyonel boyutu kapsamında yapılan çalışmalar arasında yer almaktadır. ISO ile Çevre Toksikoloji ve Kimya Derneği’nin (SETAC) paralel ve birbirini destekleyen çalışmaları LCA yönteminin içerdiği belirsizliklerin önemli ölçüde azaltılmasına ve uluslararası düzeyde çok daha kabul edilebilir bir duruma gelmesine önemli katkılarda bulunmuştur (Kyokai, 2004).

ISO 14000 serisi kapsamında yer alan TS EN ISO 14040, TS EN ISO 14041, TS EN ISO 14042, TS EN ISO 14043 ve TS EN ISO 14044 standartları LCA'yı kapsamlı bir şekilde anlatan standartlardır.

TS EN ISO 14041 standardı 2005 yılında, TS EN ISO 14042 standardı ise 2007 yılında yürürlükten kaldırılmıştır. Şu an yürürlükte olan ve Türk Standartları Enstitüsü tarafından "Hayat Boyu Değerlendirme" adı altında yayınlanan standartlar ise şunlardır:

TS EN ISO 14040: Hayat Boyu değerlendirme – İlkeler ve Çerçeve:

Ürünlerin hammaddelerinin elde edilmesi, üretilmesi, kullanılması ve kullanımının sona ermesinden sonra geri dönüşümü ya da yok edilmesi gibi süreçleri içine alan bir döngü boyunca oluşmuş ve olası çevre etkilerinin değerlendirildiği çevre yönetim tekniklerinden birisidir. Bu standartların uygulanması zorunlu değildir, ancak kurumlar tarafından gönüllü olarak uygulanmaktadır.

TS EN ISO 14044: Hayat Boyu Değerlendirme – Gereklere ve Kılavuz:

Bu standart, LCA'nın amaç ve kapsam tarifi, analizlerin yapılması, yorumlanması ve raporlanması gibi işlemler ve şartları kapsamaktadır (Özdemir 2012).

5.2. LCA'nın Kullanım Alanları

LCA'nın uygulandığı alanlar uluslararası standart ISO 14040'da tanımlanmakta olup, dört ana başlık altında toplanmaktadır. Buna göre LCA;

- Kamuya yaşam döngüsünde çeşitli noktalarda ürünlerin çevresel yönlerini geliştirmek için olasılıkları belirlemede,
- Stratejik planlama, öncelik belirleme, ürün ve hizmetlerin tasarımı ve mevcut tasarımların yenilenmesi konularında kamuda ve özel sektörde karar verilmesinde,
- Ölçüm tekniklerini de içerecek şekilde çevresel performans göstergeleriyle ilgili kamu politikası oluşturulmasında,
- Pazarlamada (örnek çevresel ürün beyanları ve çevre etiketi) kullanılmaktadır (Paulsen, 2001).

LCA'nın uygulama alanlarını yedi maddede ele alan Nebel, LCA sonuçlarının aşağıda belirtilen çeşitli uygulamaları desteklemek için kullanıldığını belirtmiştir.

- Ürün tasarımı ve ürün geliştirme,
- Kamuya yasa çıkarma,
- Pazarlama,
- Stratejik planlama,
- Ürün zincir yönetimi,
- Karşılaştırma,
- Etiketleme ve ürün beyanları için kullanım.

LCA'nın sonuçlarından yararlanılarak hazırlanan çevresel ürün beyanları ve çevre etiketleri ürünlerin çevresel özellikleri hakkında bilgiler sunmaktadır (Nebel, 2006).

5.2.1.Çevresel ürün beyanları (Environmental Product Declarations-EPD)

Çevresel ürün beyanları, ISO 14025'e göre tanımlanan, bir ürünün veya servisin çevre performansını ISO 14040/44 Yaşam Döngüsü Analizi standartları çerçevesinde belirli etki kategorilerine göre (hammadde eldesi, enerji kullanımı ve verimliliği; malzeme ve kimyasal madde içeriği; hava, su ve toprağa verilen emisyonlar; atık oluşumu) nicel olarak beyan eden belgelerdir. Ticaret odaklı olup, üreticiden toplanan verilerle hesaplanan ve bağımsız olarak doğrulanan belgelerdir. EPD Belgeleri, ürünün teknik tanımı, üretici firma detayları ve LCA sonuçlarından meydana gelir.

Avrupa'da yapılarda sürdürülebilirlik normunda tanımlanan ve EN 15804 uyumlu EPD belgeleri Avrupa Yapı Ürünleri Yönetmeliği tarafından 2013 yılından itibaren talep edilmeye başlanmıştır. Yapı malzemelerine CE işareti koyabilmek için üretimde kaynakların sürdürülebilir kullanımı gerekliliği EPD ile yerine getirilmektedir.

Bir ürünün çevresel etkileri ile ilgili bilgi verilmesi, kullanıcıların ürünü seçerken, diğer kriterlerin yanında bu etkilere göre de değerlendirme yapabilmesi için oldukça önemlidir. Bu bilgiler sayesinde çevresel beyana sahip ürünler arası

karşılaştırma yapmak mümkün olabilmekte ve ürünün çevresel özellikleri bir ticari rekabet unsuru haline gelebilmektedir (Şentürk, 2008)

Çevresel ürün beyanlarında:

- Üretici, ithalatçı, toptancı ve şirket ya da organizasyonca yürütülen çevresel işler,
- Üretim süresi ve hizmet etkinlikleri,
- Ürünün içeriği,
- Malzeme ve enerji akışı için envanter verileri,
- Olası çevresel etkiler,
- Hizmet, bakım ve geri dönüşüm,
- Belgelendirme süreci, hakkında bilgiler içerilmektedir (Şentürk, 2008).

EPD belgeleri; kullanım alanına göre karbon ayak izi, enerji ve su tüketimi gibi nicel çevresel göstergeleri belgeleyebilmektedir. Yapı ürünleri üreticileri bu belgeler ile çevreye olan etkilerini beyan ederek çevreye duyarlılığı bir kurumsal sorumluluk olarak da gösterebilmektedirler. EPD belgelendirmesinin temeli olan LCA çalışmaları sonucunda yapı ürünlerinin üretimindeki süreçleri ve tedarik zincirinden kaynaklanan çevresel etkileri detaylı bir şekilde irdeleme fırsatı bularak yeni politikalar geliştirme fırsatı elde edilmektedir. EPD belgeleri, Enerji ve kaynak verimliliği konusunda eko-tasarım yaklaşımlarının temelini oluşturmaktadır (Anonim, 2014).

Avrupa Komisyonu, Avrupa genelinde eşdeğer bir uygulama sistemi oluşturulması ve ticari bariyerlerin ortadan kaldırılması için EPD sistemlerinin harmonize edilmesi amacıyla EN 15804 normunu geliştirmiştir. Avrupa Yapı Malzemeleri Yönetmeliğinde yenilenen CE markası gerekliliklerine EPD belgesi gerekliliği de eklenmiştir. Bu gerekliliğin Avrupa'da kullanılan tüm yapı malzemelerinde harmonize bir şekilde uygulanabilmesi için Construction Products Europe tarafından ECO Platform kurulmuştur. ECO Platform Avrupa'da EPD belgeli yapı malzemelerini kayıt altına almaya başlamıştır.

EPD Belgeleri Avrupa'da yerleşik EPD Kurumlarından veya Türkiye'de EPD Türkiye kanalıyla alınabilir. EPD Türkiye kurumu EPD International (The International EPD System) ile yaptığı anlaşma sonucu EPD belgelerini Türkiye'de verebilen tek kurumdur. EPD International ve EPD Türkiye

hem tüm dünyada geçerli hem de EN 15804 normu uyumlu yapı malzemeleri EPD belgelendirmesini yapabilmektedir (Anonim, 2014).

5.2.2. LCA'nın kamusal uygulamaları

LCA, ürünlere ve süreçlere ilişkin doğrudan kullanılabilmesi gibi, daha genel yaklaşımlı çalışmalar için de kullanılabilir. Ürün ve hizmet eldesi süreçlerinin tasarımı, iyileştirilmesi, optimizasyonu gibi iş geliştirme stratejileri, üretim ve tüketim alanlarındaki kamu politikalarının geliştirilmesi bu kapsamda değerlendirilebilir. Aşağıda bu tür kullanımlara örnekler verilmiştir:

- Çeşitli paketleme alternatiflerinin Avrupa Birliği'nin Paketleme Direktifi'ne uygunluğunun değerlendirilmesi,
- Belediyelerin farklı atık yönetimi yaklaşımlarını değerlendirerek kendilerine uygun olanı seçmeleri,
- Farklı biyokütle çeşitlerinin belli bir kullanım için (örneğin elektrik eldesi) karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek, çevresel avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesi,
- Yapılacak bir kamusal yatırıma yönelik kararın verilebilmesi için alternatifler arasında stratejik karşılaştırma yapılması. Örneğin; belli bölge veya sektöre ait ürün sevkiyatı için çeşitli nakliye yöntemlerinin (karayolu, demiryolu, denizyolu) değerlendirilmesi.
- İnşaat sektörünün çevre ile uyumlu hale getirilmesi. Örneğin; Hollanda'da yeni yapılacak binalarda kullanılacak malzemelerin sadece enerji verimliliği bazında değil, çevresel emisyonlar için de belirli standartlara uygun olduğu LCA çalışmaları ile gösterilmek zorundadır (Kyokai, 2004).

5.3. LCA Yazılımları

LCA yazılımları ile ilgili Siegenthaler ve ark. (2005) yaptıkları bir araştırmada yaklaşık 27 adet LCA yazılımının mevcut olduğunu ve bunların kullanıldıkları sektörleri belirlemişlerdir (Çizelge 5.1). Bu çizelgede SimaPro'nun tüm endüstriyel sektörlere yönelik olduğu ve %17 oranında tercih edildiği, bunu LCAiT, Umberto ve Gabi'nin takip ettiği görülmektedir.

Çizelge 5.1 LCA analizi için kullanılan yazılımlar (Siegenthaler ve ark, 2005).

LCA Yazılımı	İlgili Sektör	Tercih edilme(%)
AUDIT/APCC	Kağıt ve Çelik	3
Boustead Model 5.0	Metal, cam, polimer, kimyasal	1
CEDA	Tüm endüstriyel sektörler	1
CMLCA	Tüm endüstriyel sektörler	1
EcoScan Life	Elektrik elektronik, inşaat	4
EIME	Elektrik elektronik, mekanik, otomotiv	1
EIO-LCA	Tüm endüstriyel sektörler	1
EMIS	Genel üretim, hizmet sektörü	1
EPS	Genel Üretim	1
Gabi	Otomobil, kimya, plastik, elektronik, enerji, inşaat, metal	8
GEMIS	Tüm endüstriyel sektörler	1
JEMAI-LCA	Malzeme ve Enerji	1
KCL-ECO	Tüm endüstriyel sektörler	2
LCAiT	Tüm endüstriyel sektörler	12,5
LEGEP	İnşaat	3
NIRE-LCA	Elektrik, otomotiv	13
OGIP	İnşaat	3
REGIS	Tüm endüstriyel sektörler	3
Sima Pro Analyst	Tüm endüstriyel sektörler	17
SimaPro Compact	Tüm endüstriyel sektörler	
SimaPro Developer	Tüm endüstriyel sektörler	
SIMBOX	Belirli bir sektör yok	1
TEAM	Enerji, hammadde, kimya, inşaat	7
TEAM Web Simulator	Enerji, hammadde, kimya, inşaat	
Umberto	Otomotiv, çelik, metal, kağıt, gıda	12,5
WISARD	Evsel ve endüstriyel atıklar	1
WWLCAW	Tüm endüstriyel sektörler	1

5.4. LCA Sisteminin Yapısı

LCA sistemi, temel olarak, bir ürün ya da hizmet eldesi sürecinde kullanılan enerji, su ve diğer hammaddeler ile doğal kaynakları ve bunlarla birlikte ortaya çıkan çevresel emisyonların bir envanterinin çıkartılması, bu girdi ve çıktılara bağlantılı olarak çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve sonuçların

sistematik ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek, karar vericilere sunulmasını kapsamaktadır. ISO 14040 standartlarına göre, LCA sistemi, hedef ve kapsamın belirlenmesi, yaşam döngüsü envanter analizi, yaşam döngüsü etki değerlendirmesi ve yorumlama olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır (EPA, 2006).

5.4.1. Hedef ve kapsamın belirlenmesi

LCA çalışmasının ilk aşaması olan hedef ve kapsam belirleme, yapılacak çalışmanın amacını ve yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkacak olan çevresel etkilerin karar verme sürecine nasıl katılacağına dair yöntemin belirlendiği bir aşama olması nedeniyle kritik bir bölüm olarak ele alınmaktadır.

Bu aşama aynı zamanda ne kadar zaman ve kaynağa ihtiyaç duyulacağını ortaya çıkaracağı gibi değerlendirme tamamlandığında en anlamlı sonuçların alınabilmesini sağlayacak şekilde tüm analiz aşamalarına yol gösterir. Bir LCA çalışmasında hedef ve kapsam tanımı, fonksiyonel birim ve sistem sınırları bileşenlerini bileşenleri içermektedir (EPA, 2006; Özdemir, 2012).

5.4.1.1. Fonksiyonel birim

Fonksiyonel birimin amaç ve kapsam tanımı aşamasında belirlenmesi iki veya daha fazla ürünün veya sistemin geliştirilmesini sağlamak üzere karşılaştırma yapabilmek için bir ölçü olması nedeniyle önem taşımaktadır. ISO 14040 standardında fonksiyonel birim, LCA çalışmasında örnek bir birim olarak kullanılan ürün sisteminin nicelendirilmiş performansı olarak tanımlanmaktadır (EN ISO 14040). Bu nedenle sistemin fonksiyonel birimi, açıkça belirlenmeli ve aynı zamanda ölçülebilir olmalıdır.

Fonksiyonel birim cinsinden ifade edilen veriler, referans akışı verir. ISO 14040 standardında, referans akış, fonksiyonel birimin fonksiyonu olarak ifade edilen ve verilen bir ürün sistemindeki işlemlerden elde edilmesi gereken çıktılarının miktarı olarak tanımlanmıştır.

LCA çalışmasında, envanter analizi aşamasında toplanan tüm veriler fonksiyonel birim ile ilişkilendirilmeli ve aynı fonksiyonel birim tarafından eşit referans akış baz alınarak yapılmalıdır (Çokaygil, 2005, EPA 2006).

Referans akış birimleri; m^2 , m^3 , kg , lt vb. olabilir. Örneğin; bir yapı malzemesinde yapı ürününün kendisi değil fonksiyonel özelliği karşılaştırılacaksa; bir duvar yüzeyinin boyanmasında kullanılacak 1 lt hacmindeki iki farklı boyanın karşılaştırılmasında performans özellikleri aynı olmayabilir. Bu durumda bu iki boyanın karşılaştırılması için fonksiyonel birim “1 m² boyanmış yüzey ve 10 yıllık bir hizmet ömrü” olarak tanımlanabilir (Paulsen, 2001).

Çevreye etkileri açısından iki farklı duvar yalıtım malzemesi karşılaştırılmasında aynı fonksiyon temel alınmalıdır. Örneğin malzemenin ısı akışını ne kadar azalttığı bu değerlendirmede kullanılabilir. Aynı yüzey alanı ve kalınlığa sahip iki farklı malzeme ısı akışını aynı düzeyde azaltamayacağından yapılacak LCA çalışmasında, bu iki malzemenin aynı koşullar için aynı miktarda ısı akışını azaltan miktarları fonksiyonel birim olarak kullanılmalıdır (EPA, 2006).

5.4.1.2. Sistem sınırları

LCA bir ürünün veya prosesin yaşam döngüsünün genellikle 4 aşamasını içerir:

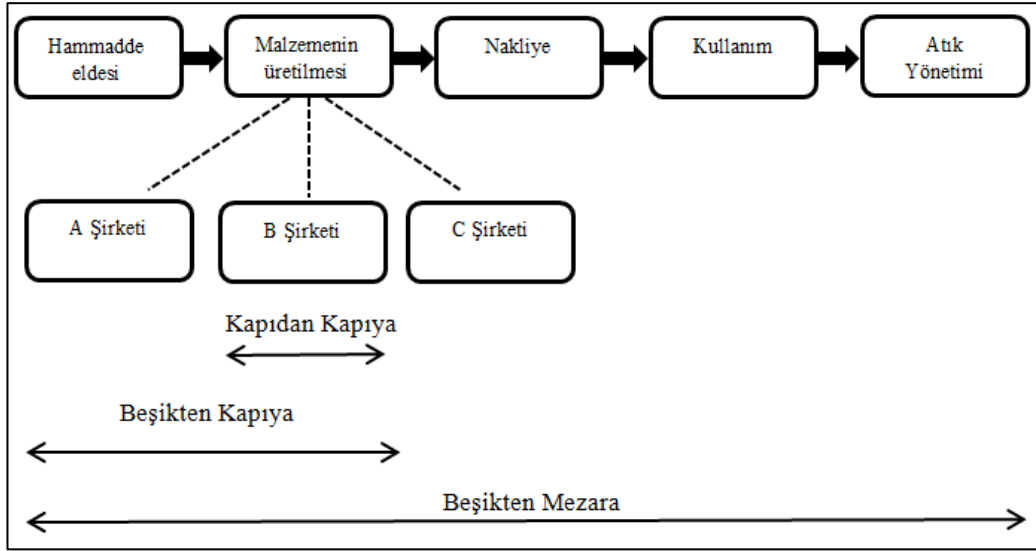
- Hammadde temini,
- Üretim,
- Kullanım/yeniden kullanım/bakım ve onarım
- Geri dönüşüm/atık yönetimi.

Sistem sınırları ise LCA çalışmasında bu işlemleri tanımlamaktadır. Bu işlemlerden hangilerinin LCA çalışmasına dahil edileceğine karar verilirken, çalışmanın amacı, sonuçlarda gerekli olan hassasiyet ile var olan zaman ve kaynak göz önünde bulundurulmalıdır.

LCA çalışmaları yaşam döngüsünün hangi aşamasında yapıldığına bağlı olarak “beşikten mezara”, “beşikten kapıya”, “beşikten beşiğe” ve ”kapıdan kapıya” olmak üzere gruplandırılabilir. “Beşikten mezara” bir ürün ya da sürecin tüm yaşam döngülerini kapsayan analiz çalışmaları için kullanılan bir tanımlama olup hammadde eldesinden ortaya çıkan atıkların bertarafına kadar geçecek tüm süreçleri içine alır. “Beşikten kapıya” bir ürün ya da süreci, hammadde eldesinden itibaren fabrikaya iletiildiği aşamaya kadar olan süreçleri yani yaşam döngüsünü

kısmen kapsar. “Beşikten mezara” yaklaşımının en son yaşam döngüsü olan atık bertarafı aşamasında atıkların geri kazanımı söz konusu ise bu “beşikten beşiğe” yaklaşımı olarak anılmaktadır. “Kapıdan kapıya” bir ürün ya da sürecin tek bir aşamasına ait yaşam döngüsünün ele alındığı bir yaklaşımdır (Jimenez-Gonzalez, 2000).

LCA'nın genel olarak kullandığı sistem sınırları Şekil 5.2 de verilmiştir.



Şekil 5.2 LCA'nın kullandığı sistem sınırları (Özdemir, 2012).

5.4.2. Envanter Analizi

Yaşam döngüsü envanter analizi ve değerlendirilmesi sistemdeki girdi ve çıktılarla ilgili veri toplama yöntemlerinin belirlenmesi, sistem sınırlarının gözden geçirilmesi, hesaplama yöntemlerinin oluşturulması, verilerin doğrulanması ve paylaşım olmak üzere 5 ana adımdan oluşmaktadır (Özdemir, 2012; Gültekin, 2006).

Veri toplama yöntemlerinin belirlenmesi: LCA çalışmasında amaç ve kapsamda tanımlanan sistem sınırları ve sisteme ait proseslere ait girdi ve çıktılarla ilgili verilerin toplanması gerekmektedir. Sistemdeki girdiler enerji, su, malzeme gibi kaynaklar; çıktılar ise hava, su ve toprağa salınımlar, sıvı atıklar, katı atıklar ve yan ürünler olabilmektedir (Özdemir, 2012; Gültekin, 2006).

Kapsamlı bir çalışmada yeterli kalitede ve miktarda verinin toplanması için, uzun zaman ve fazla kaynak söz konusu olabileceğinden çalışmalarda veri toplama yöntemleri oluşturulabilir. Verilerin toplanması sırasında çalışmanın

devam etmesini engelleyen kısıtlar veya yeni gereksinimleri ortaya çıkarabilecek durumlar oluşabildiğinden amaç ve kapsam tekrar şekillendirilebilir.

Sistem sınırlarının gözden geçirilmesi: Sistem sınırları, LCA çalışmasının ilk aşamasında tanımlanan sınırlar, birim işlemler ve bu aşamada toplanan verilere göre yeniden gözden geçirilerek kesinleştirilebilir. Sistemdeki prosesleri içeren bir akış şemasının oluşturulması sistem sınırlarının gözden geçirilmesini ve kesinleştirmesini kolaylaştırabilir (Gültekin, 2006).

Hesaplama yöntemlerinin oluşturulması: ISO 14040'a göre, tanımlanan amaç ve kapsama göre oluşturulan veri toplama yöntemiyle elde edilen veriler fonksiyonel birim ile ilişkilendirilerek fonksiyonel birim başına veriler onaylanabilir. Sistem sınırlarının kesinleştirilmesi için onaylanan verilerin çalışmanın amaç ve kapsamına uygun olarak derlenmesi ve niceliksel olarak hesaplanması gerekir (Gültekin, 2006).

Verilerin doğrulanması: Veri toplama sürecinde her adımda veri doğrulamasının yapılması gerekmektedir. Kütle ve enerji denkliği ve karşılaştırmalı emisyon faktör analizleri yapılarak verilerin doğrulanması yapılabilir.

Paylaştırma: Paylaştırma, sistem sınırlarındaki girdi ve çıktı akışlarının, bu sınırlardaki birim işlemlere dağıtılması anlamına gelmektedir. Diğer bir deyişle çevresel yüklerin dağılımını ifade eder. Tek bir ürün üreten bir imalat işlemi ele alınırsa, tüm çevresel etkiler bu üründen kaynaklanacağından, burada herhangi bir ayırma kriteri olmayacaktır. Fakat, çoğu imalat sektöründe olduğu gibi, aynı tesiste birden fazla ürün üretilmekte dolayısıyla, bu farklı ürünlere göre çevresel yüklerin dağıtılması için bir ayırma kriterine ihtiyaç duyulmaktadır.

Örneğin; bir cam şişe fabrikasında bir günde, aynı işlemde farklı boyutlarda şişeler (1 L, 500 mL, 250 mL) üretilir. Bu durumda ayırma kriteri, şişe sayısı değil, hacim olacak ve şişe türlerinin çevresel yükleri bu hacimlere göre paylaştırılacaktır. Fakat bu işlem hata getirebileceği için sistem sınırları genişletilerek mümkün olduğunca ayırmadan kaçınılmalıdır. Bu genişletme işlemi ise, işlemde çıkan her bir ayrı ürün için ayrı verilerin toplanması ve bunun da kapsam tanımında belirtilmesiyle yapılabilir (Eren, 2011).

Girdi ve çıktı akışlarının birim işlemler arasında ayrıştırılması için farklı ülkelerde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Örnek: kütle dengesi, ekonomik değerler) (Paulsen, 2001).

Paylaştırma aşağıdaki durumlarda uygulanabilir:

- Birden çok ürün üretildiğinde ve bu ürün akışlarından bazıları sistem sınırlarıyla çakıştığında (Çoklu çıkış “kara kutu” prosesleri),
- Atık arıtımı gibi emisyonlar ve girişler arasında sıkı bir sayısal neden sonuç ilişkisi bulunduğu (Çoklu giriş prosesleri),
- Bir sistemden çıkan atık malzemenin, sınırlar dışındaki bir başka sistem tarafından hammadde olarak kullanılmasında (Açık döngü geri dönüşümü)(Çokaygil, 2005).

5.4.3. Etki değerlendirme

Etki değerlendirme aşamasında yaşam döngüsü envanteri sırasında tanımlanan olası çevresel salınımların insan sağlığı ve çevresel değerler üzerindeki etkileri değerlendirilmesinin yanı sıra, ürün/proses ve bunun çevresel etkileri arasında da bir bağlantı kurulur. Etki değerlendirme, çevresel etkilerin sınıflandırılması ve kategorize edilmesi için sistematik bir prosedür sunar.

Yaşam döngüsü etki değerlendirme aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır.

1. Etki kategorilerinin seçilmesi ve tanımlanması: Etki değerlendirmesinin ilk aşamasıdır. Bu aşamada envanter analizinde elde edilen veriler çevresel kategorilere göre gruplandırılır (örneğin, küresel ısınma, asidifikasyon, ozon tabakasının tükenmesi vb.). Kategorilerin seçimi yapılan çalışmanın hedef ve kapsamı ile tutarlı olmalıdır. ISO 14040 ve ISO 14044’ye göre bu aşama, etki kategorilerinin (impact categories) seçimini, kategori göstergelerinin (category indicator) saptanmasını ve tanımlama modellerinin (characterization model) oluşturulmasını kapsamaktadır. Çizelge 5.2, LCA çalışmalarında sıklıkla kullanılan etki kategorilerini göstermektedir.

Çizelge 5.2. LCA çalışmalarında sıklıkla kullanılan etki kategorileri (EPA, 2006)

Etki Kategorisi	LCA veri örnekleri	Karakterizasyon Faktörü	Karakterizasyon faktörünün açıklaması
Abiyotik kaynakların tükenmesi	Kullanılan mineral miktarı Kullanılan fosil yakıt miktarı	Kaynak tüketimi potansiyeli	LCA verisini kullanılan kaynağın miktarına karşın rezervde kalan kaynağın miktarına dönüştürür.
Asidifikasyon	SO _x , NO _x , HCl, HF, NH ₄	Asidifikasyon potansiyeli	LCA verisini hidrojen iyonu eşdeğerine dönüştürür.
Fotokimyasal Sis	Metan olmayan hidrokarbon (NMHC)	Fotokimyasal oksidan oluşturma potansiyeli	LCA verisini metan eşdeğerine dönüştürür.
Küresel Isınma	CO ₂ , NO ₂ , CH ₄ CFSc, HFCFs, CH ₃ Br	Küresel ısınma potansiyeli	LCA verisini karbondioksit eşdeğerine dönüştürür.
Ozon Tabakasının Tükenmesi	CFSc, HFCFs, halonlar, CH ₃ Br	Ozon tüketimi potansiyeli	LCA verisini trikloroflorometan (CFC-11) eşdeğerine dönüştürür.
Ötrofikasyon	PO ₄ , NO, NO ₄ , Nitratlar, NH ₄	Ötrofikasyon potansiyeli	LCA verisini fosfat eşdeğerine dönüştürür.
İnsan toksisitesi	Havaya, suya ve toprağa yapılan toplam salınımlar	LC ₅₀ *	LCA verisini LC ₅₀ eşdeğerine dönüştürür.
Deniz ekosistemine olan toksik etki	Balıklara olan öldürücü derişimi raporlanmış zehirli kimyasallar	LC ₅₀ *	LCA verisini LC ₅₀ eşdeğerine dönüştürür.
Kara ekosistemine olan toksik etki	Kemirgenlere olan öldürücü derişimi raporlanmış zehirli kimyasallar	LC ₅₀ *	LCA verisini LC ₅₀ eşdeğerine dönüştürür.

* LC₅₀ : %50 Öldürücü derişim

2. Sınıflandırma – LCA sonuçlarının etki kategorileri ile ilişkilendirilmesidir. Örneğin; tüm karbondioksit emisyonlarını, küresel ısınmaya katkılarını gösterecek şekilde sınıflandırmak gerekir. Etkilerin birbirine bağlı olduğu durumlarda etki kategorilerinin içinde yer alan LCA sonuçları etki ettikleri kategorilere paylaştırılır. Etkiler birbirinden bağımsız ise LCA sonuçlarının ilişkili oldukları tüm etki kategorilerine eklenir. Örneğin; azot dioksit, hem asidifikasyona hem de yer seviyesi ozon oluşumuna etki ettiğinden ve bu iki etki birbirinden bağımsız olduğundan, azot dioksit emisyonu (%100) her iki etki kategorisine de eklenir.

3. Karakterizasyon – Bilimsel karakterizasyon faktörleri kullanarak her bir etki kategorisinin modellenmesidir. Bu aşamada karakterizasyon faktörleri kullanılarak

LCA sonuçları insan sağlığı ve çevresel etkileri temsil eden indikatörlere dönüştürülür (örneğin; kg CO₂ eşdeğeri, kg SO₂ eşdeğeri vb.)

- **Abiyotik kaynakların tükenmesi**, tüketim sonucu doğal kaynak stoklarının azalması olarak tanımlanabilir. İnsanlar her zaman düşük kaliteli kaynağı ileriye bırakarak en iyi kaynağı en önce tüketme eğiliminde olmuşlardır. Doğal kaynaklara verilen zararlar sonucunda gelecek nesiller etkilenebileceğinden insanlar kalan kaynakları kullanabilmek için daha fazla çaba harcayacaktır. Bu çaba “fazla enerji” (surplus energy) olarak açıklanmaktadır. Fosil yakıtlar, düşük kaliteli kaynakların kullanımı sonucu, 1 kg veya 1 m³ fosil yakıtı elde etmek için harcanan fazla enerji, MJ fazla enerji/kg olarak ele alınmaktadır. Örn: kömür, doğal gaz gibi (Jensen ve ark, 1997; Özdemir, 2012).
- **Asidifikasyon**, daha çok fosil yakıtların yanmasıyla oluşan asit gazlarının havaya, suya ve toprağa salınmasıyla oluşmaktadır. Protonların yeryüzü ya da su ekosistemine serbest kalmasından kaynaklanmaktadır. Protonların serbest kalmasına neden olan maddeler SO₂, NO_x, NH₃ ve HCl ve bunun dışında sülfür bileşikleri ve diğer asitler olabilir. Asidifikasyon potansiyeli (AP) SO₂⁻denkliği veya hidrojen (H⁺) ile hesap edilmektedir (Gültekin, 2006; Jensen ve ark, 1997).
- **Fotokimyasal sis**, uçucu organik bileşenler ve azot oksitlerin gün ışığında salınmasıyla yeryüzünde sis oluşmasıdır. Fotokimyasal sis oluşumunun biyolojik etkisi reaktif ozon bileşiklerine biyokimyasal etki olarak tanımlanabilir. Bitkilerin bu ozona maruz kalması yüzeylerinde bozulmaya, yapraklarda renk değişikliklerine, yapraklarda ve son olarak tüm bitkide kurumaya neden olabilir. İnsanların maruz kalması ise gözde tahrişe, solunum problemlerine ve solunum sistemlerinde kronik hasarlara yol açabilir (Gültekin, 2006; Jensen ve ark, 1997).
- **Küresel ısınma**, fosil yakıtların yanması ve çeşitli tarımsal/endüstriyel uygulamalar sonucu sera gazlarının atmosfere salınmasıyla dünya iklim sisteminde meydana gelen önemli değişiklikler olarak tanımlanabilir. Alt atmosferde sera gazları etkisiyle ısının artması sonucu oluşmaktadır. Alt atmosfer genellikle dış atmosferden (güneşten) gelen ışınım ile

ısınmaktadır. Bu ışınlardan bir kısmı toprak yüzeyi tarafından yansıtılmaktadır. Ancak atmosferdeki karbondioksit ve diğer sera gazları (örneğin; metan ve NO₂), sera etkisine neden olacak kızılötesi ışınları yansıtmakta ve alt atmosferdeki ısı artarak normal seviyenin üzerine çıkmaktadır. Küresel ısınma, ısı ışınımı yansımaları sırasında CO₂ etkisine sahip olan ürünler için küresel ısınma olasılığı (global warming potential-GWP) ile nicelendirilmektedir. Sera gazları için küresel ısınma olasılığı CO₂-denkliği ile ifade edilmekte olup, etkileri CO₂'in etkisine göre göreceli olarak tanımlanmaktadır (Gültekin, 2006; Jensen ve ark, 1997).

- **Ozon tabakasının tükenmesi**, çeşitli ozon tüketici bileşiklerin salımıyla stratosferin zarar görmesi ve ozon deliklerinin oluşmasıdır. Bunun sonucunda da artarak gelen UV ışınları insan sağlığına ve ekosisteme zarar vermektedir. Stratosferik ozon katmanı 10-40 km yükseklikte, 15-25 km arasında maksimum yoğunlukta ortaya çıkmaktadır. Stratosferik ozonun (O₃) en yüksek oluşumu 40 km yükseklikte stratosferin en üstünde moleküler oksijen (O₂) ile atomik oksijenin (O) reaksiyonu sonucu meydana gelmektedir. Reaksiyon, oksijenin ayrışmasında kullanılan UV ışınlarına ve ayrışmadan dolayı fazla enerjinin emiliminde kullanılan diğer moleküllerin varlığına bağlıdır. Ozondaki bozulma halojen bileşiklerin stratosfere girmesinden kaynaklanmaktadır (örn. CFC, HCFC gazları vb.).
- **Ötrofikasyon**, sularda ekosistemi bozacak miktarda besin maddesi birikmesi, böylece canlıların yaşaması için gerekli oksijenin azalması olarak tanımlanabilir. Ekosistemdeki besin birikimine fazla azot, fosfor ve bozunabilir organik maddeler neden olmaktadır. Sularda fazla miktarda azot ve fosfor bulunmasının başlıca etkisi yosunların büyümesidir. İkincil etkiler ise organik malzemelerin ayrışmasıdır. Organik maddelerin ayrışması oksijen tüketen bir işlemdir ve oksijen doygunluğunda azalmaya neden olmaktadır. Ötrofikasyon potansiyeli (Eutrophication Potential-EP) PO₄⁻ denklikleri ile ifade edilmektedir (Gültekin, 2006; Jensen ve ark, 1997).
- **İnsan toksisitesi**, insanların havaya, suya ve toprağa salınan toksik maddelere maruz kalmasıdır. Bu etki ile insanlarda kanser, alerjik

reaksiyonlar, tahriş, genler üzerinde değişiklik ve bedensel rahatsızlıklar görülebilmektedir. Toksik etkileri değerlendirecek birçok metot günümüzde uygulanmakta ve birçoğu da halen geliştirilmektedir.

- **Ekotoksosite**, zehirli maddelerin doğal ortamdaki bitki, hayvan ve diğer canlılar üzerindeki etkileridir. Ekosistem üzerindeki bu potansiyel etkiler belirli malzemelerin çevreye bıraktığı salımlara bağlıdır. Kimyasal etkileri tanımlayacak ve maruz kalınılan zehirlilik etkilerini değerlendirecek birçok metot geliştirilmiştir (Gültekin, 2006; Jensen ve ark, 1997).

Etki kategorileri genellikle aşağıdaki formül kullanılarak karakterize edilir (EPA, 2006).

Envanter Verisi * Karakterizasyon Faktörü = Etki Göstergesi

Örneğin; bir sistemde salılanan bütün sera gazları, bunlara ait envanter sonuçlarının karbondioksit karakterizasyon faktörleriyle çarpılması ile karbondioksit eşdeğeri cinsinden ifade edilebilir. Daha sonra aynı birime (karbondioksit eşdeğeri) dönüőtürülmüő olan etki göstergeleri toplanarak var olan toplam küresel ısınma potansiyeli hesaplanır.

Normalizasyon - Karşılaştırılabilen potansiyel etkileri açıklamak için kullanılmaktadır. Normalizasyon bir LCA çalışmasında zorunlu olmamakla birlikte sınıf gösterge sonuçlarının büyüklüklerinin hesaplanmasında kullanılır. Normalizasyonda etki göstergeleri seçilmiş referans değerlere bölünerek normalize edilir. Referans değer, belli bir alan için ya da belli bir kiői için söz konusu olan emisyon veya kaynak kullanımı referans değer olarak seçilebilir. Normalize edilen veriler sadece bir etki kategorisi için karşılaştırılabilir. Örneğin asidifikasyon ile toksisite farklı karakterizasyon faktörleri kullanılarak hesaplandıkları için birbirleri ile doğrudan karşılaştırılmaz (EPA, 2006).

4. Gruplandırma – Göstergelerin yerel, bölgesel ve küresel bazda başka bir deyişle konuma göre sınıflandırılması ve sıralanmasıdır.

5. Ağırlıklandırma – En önemli potansiyel etkileri vurgulamadır. Ağırlıklandırma aşaması LCA çalışmasında zorunlu olmamakla birlikte bu aşamada, farklı etki kategorilerine algılanan önem ya da konuyla ilişkilerine bağlı olarak sayısal değerler verilir. Örnek olarak havayı kirleten bir hava kirleticisi hava kalitesinin düşük olduğu yerde daha büyük etkiye ve öneme sahiptir.

Kullanılan ağırlıklandırma yönteminin açık bir şekilde anlaşılabilmesi için LCA raporunda ağırlıklandırılmış veriler ham verilerle birlikte sunulmalıdır. ISO 14044'e göre bir etki kategorisinin diğerine göre önemini belirlemede kullanılan ve tercih yapılmasını gerektiren bir değerlendirme yöntemi ile elde edilen sonuçlar görece olduğundan zamana ve lokasyona bağlı olarak değişebilecektir (EPA, 2006).

5.4.4. Yorum

Yorumlama aşamasında yaşam döngüsü envanteri ve yaşam döngüsü etki değerlendirmesi aşamalarında elde edilen sonuçlar uygun tekniklerin yardımıyla değerlendirilir. LCA'nın son aşaması olan yorumlamada amaç; önceki aşamalarda elde edilen bulguların değerlendirilmesi, sonuçların belirlenmesi, kısıtların tanımlanması, önerilerin yapılması ve LCA çalışması sonuçlarının amaç ve kapsam bölümü ile uyumlu şeffaf, kolay anlaşılabilir bir biçimde raporlanması eksiksiz ve tutarlı bir şekilde sunulmasıdır (EPA, 2006).

ISO standardına göre LCA sonuçları aşağıda özetlenen üç aşamada yorumlanır:

1. Önemli çevresel konuların LCA ve LCIA aşamaları ile bağlantılı olarak tanımlanması,
2. Çalışmanın eksiksiz olarak gerçekleştirildiği, başlangıç hipotezleriyle sonuçların tutarlı olduğu ve hassasiyet analizlerinin gerekli görülen her aşamada yapıldığının genel değerlendirme ile gösterilmesi,
3. Ana sonuçların ve önerilerin hedef ve kapsam tanımındaki gereksinimlerle uyumluluğunun kontrolü.

Önemli çevresel konuların belirlenmesi: Analizi yapılan her ürün/proses için gerçekleştirilen LCA ve LCIA çalışmalarına girdi sağlayan veriler ve yorumlama aşamasındaki önemli noktalar konuların belirlenmesine yardımcı olur. Önemli konular belirlenirken LCA'nın bütününe bakılmalı ve verilerin tutarlığı, hassasiyeti de değerlendirilmelidir. LCA çalışmalarında karar aşaması için önem taşıyan başlıca konular arasında enerji kullanımı, atık oluşumu, emisyon miktarları, kaynak kullanımı ve bu kullanım sonucu oluşan çevresel etkiler yer almaktadır.

Veri Tutarlılığı ve Hassasiyetinin Değerlendirilmesi: LCA'nın yorumlama aşamasında kullanılan verilerin eksiksiz ve tutarlı olduğu ve hassasiyet analizlerinin yapıldığı kontrol edilmelidir. Hassasiyet analizi yapılırken simülasyonlar (örneğin; Monte Carlo simülasyonu) kullanılarak giriş parametreleri değiştirilebilir. Sonuçları en fazla etkileyen veriler tespit edilerek bu verilerde değişiklik yapıldığında sonucun ne kadar değişeceği tartışılmalıdır. Tutarlılık analizinde ise, verilerin bütün çalışma ile olan ilişkisi tekrar gözden geçirilmelidir.

Çalışma sırasında yapılan ölçümler, hesaplamalar ve varsayımlar gözden geçirilerek tutarlılık analizi yapılabilir (EPA, 2006; Özdemir, 2012).

Sonuç ve Önerilerin Oluşturulması: Yorumlama aşamasının en önemli basamağı olmakla birlikte yapılan çalışma sonuçları şeffaf bir şekilde anlatılır. Bu aşamada LCA'nın amaç ve kapsamına bağlı olarak ürünün, prosesin veya hizmetin alternatifleri arasından çevreye en az olumsuz etkiye sahip olanı vurgulanarak öneriler de bu kapsamda sıralanır. Sonuçlar her bir etki kategorisi için normalize edilmemiş, ağırlıklandırılmamış göstergeler olarak sunulabileceği gibi normalize edilerek de sunulabilir (EPA, 2006)

6. YAŞAM DÖNGÜSÜ MALİYETİ ANALİZİ (LCC)

İşletmeler içinde buldukları pazarda etkin bir rekabet yapabilmek için kendi maliyetlerini bilmek zorundadır. İşletmelerde herhangi bir ürün ya da proses ile ilgili ayrıntılı maliyetlerin hesaplanması; üretilecek olan ürün cinsine, işletmenin kapasitesine, üretim maliyet analizlerinde inceleme konusu olan maliyetin onu oluşturan ve etkileyen bileşenlerinin özelliğine bağlı olarak değişir.

Yaşam döngüsü (LCC) maliyeti analizi süreci, bir projenin veya herhangi bir sistem alternatifinin kavram geliştirme aşamasından, araştırma-geliştirme, kullanım ve kullanımdan çıkarılması da dâhil olmak üzere tüm süreçte ortaya çıkabilecek maliyetleri hesaplamaya yönelik geliştirilmiş bir metot ve işlemler zinciridir (Çalık 2014).

Yaşam döngüsü maliyeti (LCC) terimi, 1960'ların ortalarında ABD'nin devlet kurumlarının özellikle savunma sistemleri için ekipmanların ve diğer malzemelerin satın alımlarında maliyet optimizasyonu sağlamak için ortaya çıkmıştır.

2000'li yılların başında standardizasyon metodolojisinin kullanımı ile çalışmaların sonuçlarının güvenilirliği artmış, yaşam döngüsü maliyetinin (LCC) kullanımı Avrupa, Kuzey Amerika ve Asya'da sanayileşmiş ülkelerde sanayi ve hükümetler arasında yaygınlaşmıştır. Hükümetler bugün sanayi, pazarlama, çevresel performans belgeleri, ürün geliştirme alternatiflerinin karşılaştırılması ve çevre yönetiminde karar verme desteği için LCC Eko-Etiket programlarına odaklanmışlardır.

Buna karşın, gelişmekte olan ülkelerde LCC'nin kullanımı yaygın olmadığından dolayı ürünlerin çevresel performansına farkındalığı artırmak ve küresel olarak yaygınlaştırılmasını desteklemek amacıyla, 2002 yılında Birleşmiş Milletler Çevre Programı, SETAC ile işbirliği içinde, UNEP Programı kapsamında "Sürdürülebilir tüketim için yaşam döngüsü girişimi" ni başlatmıştır. Bu girişimin, "Fırsatlar, riskler ve yaşam döngüsü boyunca ürün ve hizmetler ile ilgili dengeleri değerlendirmek için pratik araçlar geliştirmek ve yaymak" gibi bir misyon yüklenmiştir (Çalık 2014).

IEC 60300 standardı, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission, IEC) tarafından yaşam döngüsü

maliyetleri ile ilgili önerilerin ve standartların sunulduğu, 1996 yılında yayınlanan bir standarttır. Daha sonra, IEC 60300 standardına ait “IEC 60300-3-3(2004) kılavuzu, “Yaşam Döngüsü Maliyet, Uygulama Kılavuzu” başlığı ile yayınlanarak son halini almıştır. IEC 60300-3-3 standardına göre, yaşam döngüsü maliyet analizinin aşamaları aşağıdaki gibi oluşturulmuştur (Özdemir, 2012).

- Araştırma ve geliştirme maliyeti
- Yapım ve üretim maliyeti
- İşletme maliyeti
- Elden çıkarma maliyeti

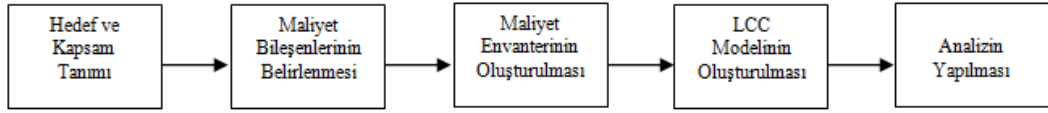
6.1. LCC Analizinin Karar Almada Kullanımı

LCC analizi bir bütün olarak sistemlerin tasarım sürecini etkileyerek sistemin bütün yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan maliyetleri en aza indirecek kararların alınmasında bir araç olarak kullanılabilir. LCC analizi işletmelerde aşağıdaki amaçlar için uygulanabilir:

- Alternatif tasarımların seçimi, değerlendirilmesi ve karşılaştırılması,
- Altyapı ve ekipmanın eskiyen parçalarının yenileri ile değiştirilmesi veya bakım onarımla ömrünün uzatılması seçeneklerinin seçimi, değerlendirilmesi ve karşılaştırılması,
- Maliyet iyileştirmelerinin tanımlanması,
- Ürün veya proseslerin ekonomik canlılığının değerlendirilmesi,
- Alternatif stratejilerin, üretim yöntemlerinin değerlendirilmesi ve karşılaştırılması.
- Gelecekteki kaynak ihtiyacının tahmin edilmesi
- Bir ürün/parça için alternatif tedarikçilerin seçilmesi (Aytok 2006).

6.2. LCC Analiz Yöntemi

LCC analizinin yöntemi, bir ürünün/prosesin kavram olarak ortaya çıkması ile başlayıp, ürün/prosesin üretilmesi, işletilmesi ve elden çıkarmaya kadar olan tüm aşamalarında harcanan kaynakların toplam maliyeti olarak tanımlanmış olup, prosedürü Şekil 6.1’de verilmiştir.

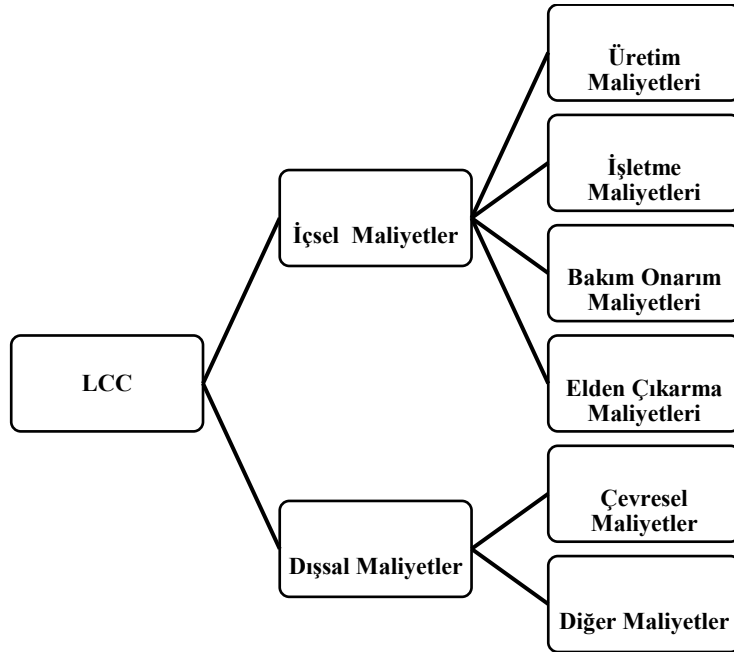


Şekil 6.1. LCC Yöntemi (Woodward, 1997).

LCC çalışması geleneksel bir maliyet muhasebesi çalışması değildir. Çevresel bir yaşam döngüsü maliyeti ürünün yaşam döngüsü sürecine katılan tedarikçi, üretici, kullanıcı, müşteri ve bertaraf edici de dahil olmak üzere bütün oyuncularını ve çevresel etkileri dikkate alır (Işın, 2009).

Son yıllarda yapılan farklı uygulamalar analizi ayrı amaçlar ve uygulama yöntemleri için üç tip yaşam döngüsü maliyeti tanımlanmaktadır: Bunlar; *İşletme açısından (ekonomik) LCC*, *Çevresel açıdan LCC* ve *Sosyal açıdan LCC* dir (Çalık, 2014).

Yaşam döngüsü maliyeti, şirket/üretici maliyeti, kullanıcı maliyeti (içsel) ve toplumsal (dışsal) maliyetlerden oluşmaktadır (Asiedu ve Gu, 1998). Bir sistem için yapılabilecek en kapsamlı maliyet dağılım yapısı Şekil 6.2’ de verilmektedir. Bu model kullanılarak ürün tasarımı, satın alma ve üretim aşamalarındaki maliyetlerin gruplandırılması yapılabilmektedir.



Şekil 6.2. Maliyet dağılım yapısı (Özdemir, 2012).

6.2.1. İçsel maliyetler

Yaşam döngüsü analizindeki içsel maliyet kategorisi; yapım ve üretim maliyeti, işletme ve bakım onarım maliyeti ve elden çıkarma maliyetlerinden oluşmaktadır. Yatırım maliyetleri; üretilecek sistemlerin yapım, montaj ve test maliyetleri, işletme ve bakım maliyetleri, başlangıç lojistik destek maliyetleri, üretim ve inşaat aşamasının maliyetlerinden oluşmaktadır. İşletme maliyetleri; personel ve bakım desteği, yedek parça/tamirat parçası ve test ve destek donanım bakımı maliyetlerini kapsar. Hizmet dışı bırakma ya da elden çıkarma maliyeti ise; sistem/ürünün yaşam döngüsü boyunca tamir edilemeyen parçalarının elden çıkarılması, sistemin/ürünün hizmet dışı bırakılması sonucu bu parçaların artımı veya bertarafı için oluşan maliyetlerdir (Özdemir,2012).

6.2.2. Dışsal maliyetler

Ürün ve hizmet son kullanıcılarının talep ve ihtiyaçlarının artması ve üretim sektörünün alanının genişlemesi, tüketim sürecinin sonunda çevreye etkilerin artmasını bunun sonucunda çevresel sorunların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Çevresel maliyetlerin artması da şimdi ve gelecekte kaynakların tükenebileceği farkındalığının varılması ve bu konuda önlemlerin alınmasını da gerekli kılmaktadır. Bunun yanı sıra, bir üreticinin ürettiği ürün sadece kendi kullandığı girdilere bağlı olmayıp başka bir üreticinin faaliyetlerine de bağlı olabilmektedir. Böyle bir durumda “dışsal zarar” ortaya çıkmaktadır. Dışsal zarar, bir üreticinin karşılığında bir şey almadan veya vermeden başka bir üreticiye neden olduğu fayda veya zarar olarak tanımlanmaktadır.

Dışsal maliyetler, ürünün/hizmetin üretilmesi, gerçekleştirilmesi ve tüketilmesi sırasında meydana gelen çevresel kirleticilerin (küresel ısınma, toksisite, asidifikasyon vb.) oluşturduğu maliyetlerdir (Özdemir,2012).

7. KONUYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

7.1. LCA ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Nicoletti et al., (2002) İtalya’da yaptıkları bir çalışmada, kaplama malzemesi olarak üretilen seramik yer karosu ile mermerin üretiminin neden olduğu çevresel etkileri karşılaştırmalı LCA çalışması yaparak belirlemiştir. İki farklı üretimin sisteminin sınırları belirlenerek sıcak noktalar (hot point) tespit edilmiştir. İki üretimin çevresel performansları karşılaştırıldığında seramik karo üretiminin mermer üretiminden iki kat daha fazla çevresel etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Yaşam döngüsü puanı mermer için 1.90E-12 olarak, seramik karo için ise 4.21E-12 olarak belirlenmiştir. Her iki üretim için en önemli etki kategorileri küresel ısınma, insan toksisitesi ve asidifikasyon olarak öne çıkarken mermer üretiminde kullanılan fosil yakıtların elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve seramik karo üretiminde kurutma ve pişirme prosesleri ile hammaddeler içerisindeki uçucu kirleticilerin yüksek miktarda olması başlıca emisyon kaynakları olarak belirlenmiştir.

Koroneos ve ark., (2006) Yunanistan’ da üretilen ve yapı sektörünün önemli bir malzemesi olan tuğlanın üretim sürecindeki bütün aşamaların beşikten mezara bir LCA analizini yapmışlardır. Çalışmada yaşam döngüsünün bir parçası olan ve toplam çevresel etkilerin değerlendirilmesinde önem arz eden “sıcak noktalar” belirlenmiştir. Elektrik, dizel ve fosil yakıt gibi kullanılan ana enerji girdileri ve emisyonlar nicel olarak belirlenerek potansiyel çevresel etkiler analiz edilmiştir. Sonuç olarak pişirme prosesinin en yoğun enerji tüketen ve yüksek miktarda NO_x ve SO_x emisyonlarına neden olan bir proses olduğu, dizel ve fosil yakıtlar yerine daha temiz enerji kaynakları kullanıldığında çevresel etkilerin azaltılabileceği vurgulanmıştır.

Banar ve Çokaygil (2009) yaptıkları çalışmada 1 m² yer karosu üretiminde karonun üretimi, taşınması, kullanımı ve bertarafı sırasında oluşan çevresel etkileri LCA yöntemi kullanarak irdelemişlerdir. Çalışmada literatürde ve sektörden elde edilen veriler, SimaPro yazılımı kullanarak, değerlendirme ise CML 2 baseline yöntemine göre yapılmıştır. Çevreye olan etki indikatörleri ise, abiyotik kaynakların tükenmesi, küresel ısınma, insanlar üzerine olan toksik etki,

karasal ekotoksosite, asidifikasyon ve ötrofikasyon olarak seçilmiştir. Sonuç olarak ürünün üretimi sırasında çevreye olan etkilerin sadece üretimden değil, üretim sırasında kullanılan yakıt, elektrik enerjisi, ambalajlama malzemesi, taşıma gibi ürünün yaşam döngüsüne giren diğer etkenler sonucu da oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca, küresel ısınma açısından yer karosu üretiminin, çevresel ve ekonomik önlemler alınması gereken bir süreç olarak dikkat çektiği vurgulanmıştır.

Bovea ve ark., (2010) tarafından yapılan bir çalışmada tek pişirim sırlı seramik karonun çevresel etkilerinin analizi yapılmıştır. Seramik karonun çevreye olan etkileri hammaddenin eldesinden müşteriye dağıtımına kadar (from cradle to customer gate) olan süreçte araştırılmıştır. Çalışmada, seramik karo üretim prosesinde çevresel etkisi en fazla olan aşama/proses/malzemesi belirlenerek bunlar için geliştirilecek iyileştirmelerin çevresel, ekonomik ve teknik açıdan uygulanabilirliği ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, etki kategorileri için en önemli prosesin pişirme prosesi olduğu, fırından çıkan gazın seramik karonun ön kurutma işleminde kullanıldığı taktirde hidrojen florür (HF) emisyonunda önemli ölçüde azalma olacağı ortaya konulmuştur.

Bayraktar (2010) tarafından yapılan çalışmada yapı malzemelerinin çevresel etkileri vurgulanarak karar vericilerin malzeme seçiminde fonksiyonellik, estetik, maliyet gibi parametrelerin yanı sıra malzemelerin çevresel etkilerini de göz önünde bulundurarak bir seçim yapmaları amaçlanmıştır. Bu seçimin yapılabilmesi için yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi temel alınmış ve Türkiye'nin kendi olanaklarına göre sınırlandırılmış bir sistem önerilmiştir. Çalışmanın sonucunda, sistemin çalışması için "Yaşam Döngüsü Değerlendirme" yönteminin temel alınması, ülkede herhangi bir alt ya da üst sınır değeri olmayan konularla ilgili yasal çalışmalar yapılarak sınır değerlerin belirlenmesi, firmalar tarafından ürettikleri ürünlere ait girdi, çıktı, üretim teknolojisi gibi verilerin toplanarak bir veri tabanı oluşturulması gibi gereksinimlerin olması gerektiği vurgulanmıştır.

Çamur (2010) yaptığı çalışmada, enerji korunumunda önemli bir yere sahip olan ve binalarda yaygın olarak kullanılan ısı yalıtım malzemelerinden ekspande polistren (EPS) ile buna alternatif olarak kullanılacak taş yünü

beşikten kapıya (cradle to gate) olan süreçte hangisinin daha çevre dostu olduğunu yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi ile ortaya koymuştur. Yalıtım malzemelerinin çevresel etkileri GaBi 4 yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilmiş polistrenin çevresel etkileri, tüm etki kategorilerinde taş yününe göre daha az bulunmuştur.

Ölmez (2011), SimaPro yazılımı ve IMPACT 2002+ değerlendirme metodu kullanarak demir ve çelik üretiminde yaşam döngüsü aşamalarının (kok kömürü üretimi, sinterleme, demir üretimi, çelik üretimi) ve nihai ürünlerin (kütük, slab, sıcak haddelenmiş kangal, sıcak haddelenmiş bobin) etkilerini karşılaştırma amacı ile, Türkiye'de demir ve çelik üretimi için bir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesini (YDD) ortaya koymuştur. Sistem sınırı beşikten kapıya olarak belirlenmiş ve çalışma, Türkiye'de sektörün çoğunluğunu temsil eden üç entegre demir ve çelik tesisinden biri olan tesisten elde edilen envanter verileri kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, sıvı çeliğin toplam çevresel etkiler açısından en büyük etkiye sahip olduğu ve bunu sinterin takip ettiği bulunmuştur. Koklaştırma, yenilenemeyen enerji kaynaklarının tüketimi üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Farklı nihai ürünlerin etkilerinin karşılaştırılması, sıcak haddelenmiş bobinin en yüksek toplam çevresel etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Valderrama ve ark. (2012) yaptığı bir çalışmada, İspanya'da üretim yapan bir çimento üretim tesisinde mevcut en iyi teknikler kullanılarak yeni bir çimento üretim hattı (L6), 30 yıldır kullanılan üretim hatları (L3, L4 ve L5) ile değiştirilmiştir. Beşikten-mezara sistem sınırları için LCA yöntemi kullanılarak yeni üretim hattının çevresel etkileri SimaPro 7.2 yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda yeni kurulan üretim hattının çevresel etki kategorileri bazında, küresel ısınmada %5, asidifikasyon etki kategorisinde %15, ötrofikasyon etki kategorisinde %17, toplam enerji gereksiniminde ise %13 oranında azalma elde edildiği bildirilmiştir.

Ferreira ve ark. (2014) MgO/ZrO₂ ve alümina/ZrO₂ refrakterlerin çevresel etkilerini değerlendirmek için yaşam döngüsü analizi çalışması yapmış ve entegre atık yönetim sistemi içinde geri dönüşüm ve bertaraf etme organizasyonları açısından iki farklı yaşam sonu senaryosu üzerinde

çalışmışlardır. Zirkonyum dioksit (ZrO_2) ile toklaştırılmış alümina (Al_2O_3) ve MgO refrakterler arasında yapılan bu çalışmada, zirkonyum dioksit ile desteklenmiş alümina refrakterde geniş varyasyonlarından dolayı daha iyi bir geri dönüşüm aktivitesine ve insan toksisitesi ile ilgili olarak da daha iyi çevresel oranların elde edildiği görülmüştür. Bu sonuçlarla birlikte desteklenmiş refrakterlerin çevresel performansının geliştirilmesi, en uygun yaşam senaryosunun seçilmesi ile mümkün olduğu açıkça gözlenmiştir.

Kumbhar ve ark. (2014) yapı malzemesi olarak seçilen tuğlanın yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) çalışmasını beşikten kapıya bir yaklaşımla belirlenen sistem sınırları içerisinde üretimin çevreye etkilerini incelemişlerdir. SimaPro 7.3.3 programı kullanılarak yapılan çalışmada tuğla üretiminin enerji yoğun bir proses olduğu tespit edilmiş olup, özellikle sera gazı emisyonlarının çoğunlukla kullanılan yakıtlardan kaynaklandığı görülmüştür.

Ibanez-Fores ve ark. (2011) ve **Pini ve ark. (2014)** yer karosu üretiminde hangi prosesin çevresel etkilerinin fazla olduğunu belirlemek için hammadde eldesinden karoların geri dönüşümünü de dahil ederek LCA çalışması gerçekleştirmişler ve çalışmalarda bütün sonuçlar istatistiksel olarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre özellikle granül üretim prosesinde kullanılan yüksek miktardaki elektrik enerjisi ve doğalgazın yüksek çevresel etkilere neden olduğu belirlenmiştir.

Li ve ark. (2015), üretiminde yüksek enerji tüketimi nedeni ile Çin’de yüksek sera gazı emisyonuna neden olan “ergimiş manyezit” üretimi için alternatif üretim yöntemlerini yaşam döngüsü analizi yaklaşımıyla karşılaştırmışlardır. Çalışmada iki adet geleneksel ve 2 adet alternatif üretim yönteminin çevresel etkileri GaBi 5.0 yazılımı ve CML 2001-Nov 2010 yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. İkinci alternatif (S4) üretim yönteminin en iyi çevresel performans gösteren yöntem olduğu özellikle küresel ısınma potansiyelini geleneksel üretim yöntemine göre (S1) %48 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

Almeida ve ark. (2015) Portekiz’de üretilen seramik tuğlanın beşikten mezara anlayışıyla yapılan LCA çalışması sonucunda alınacak EPD belgesini desteklemek amacı ile “ürün kategori kuralları”nın oluşturulmasını amaçlamıştır. Ürün kategori kuralları ISO 14025, ISO 21930 ve EN 15804 standartları bazında

oluşturulurken ürünün çevresel profili LCA metodu ile küresel ısınma, ozon tabakasının tükenmesi, fotokimyasal sis, asidifikasyon, ötrofikasyon, abiyotik kaynakların tükenmesi etki kategorileri bazında belirlenmiştir. Tuğla üretiminde farklı yakıtların kullanılmasının bazı etki kategorilerinde önemli etki yarattığı sonucuna varılmıştır. Petrokok kullanımının doğal gaz veya biyogaz kullanımından daha çok etkiye neden olduğu belirlenmiştir.

Feiz ve ark. (2015) bir çimento üretim tesisinde üç farklı çimento ürününü “beşikten-kapıya” anlayışı ile LCA çalışması yaparak karşılaştırmıştır. Çalışmada özellikle CO₂ emisyonları üzerinde durulmuş, daha sonra üretim tesisi için 6 adet performans göstergesi üzerine basitleştirilmiş LCA modeli geliştirerek uygulamaya koymuştur. Geliştirilen LCA modelinin üretim tesisinde efektif olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

7.2. LCC ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Yapı ve inşaat malzemeleri sektöründe yaşam döngüsü analizi çalışmalarının yanı sıra, üretim, kullanım, yenileme ve yıkımı da kapsayan LCC'nin yapılmasının önemi Blengini (2009) ve Gustavsson vd. (2010) tarafından yapılan çalışmalarda da vurgulanmıştır. Pek çok çalışma, üretim aşamasında ortaya çıkan sera gazı emisyonlarını azaltıcı yönde önlemler ve birtakım teknolojiler üzerine odaklanmıştır. Sentman ve ark. (2008), inşaat sektöründe bina yapımındaki sera gazı emisyonunun nedenlerini, Zhang ve ark. (2011), Çin'de üretilen ergimiş manyezitin üretimi sırasında ortaya çıkan sera gazı emisyonları ve azaltım yöntemlerini, Cole (1998), inşaat sektöründe farklı yapısal uygulamalarda kullanılan farklı enerji sistemleri ile sera gazı emisyonları arasındaki ilişkiyi, Gonzalez ve García Navarro, (2006) ise yapı sektöründe farklı yapı malzemeleri kullanarak CO₂ emisyonlarını azaltım yöntemlerini incelerken; Chou ve ark.,(2015) ve Islam ve ark., (2015), inşaat sektöründeki fosil yakıt, elektrik ve su tüketimini ele alarak karbondioksit emisyonu ve çevresel maliyetleri de optimize etmek için sistematik bir model geliştirmiştir.

Abdul-Wahab ve ark.,(2015) ise, çimento üretiminde çevresel etkileri azaltma ve bunun yanı sıra maliyeti düşürme çalışmaları için yeni bir model geliştirmiştir. Çimento endüstrisindeki kalsinasyon prosesinin çevresel ve ekonomik etkileri üzerinde durulmuştur.

8. MATERYAL ve METOD

Bu tez çalışmasında, ülkemizdeki seramik sektöründe karar vericilere yol göstermesi amacıyla, Türkiye’de bir refrakter tuğla üretim tesisi belirlenmiş ve refrakter tuğla üretim sürecinin çevresel etkileri ile bu etkilerin ekonomik açıdan değerlendirilmesi LCA ve LCC yöntemleri ile birlikte yapılmıştır.

LCA, bu çalışmada dört adımda gerçekleştirilmiştir. Hedef ve kapsam tanımları çalışmanın ilk aşamasını oluşturmaktadır. Çalışmanın amaçları ve hedeflenen çıktıları elde etmek için gerekli ana bileşenler ortaya konulmuştur. Refrakter tuğla üretim sürecinde sistem sınırları ve fonksiyonel birim belirlenmiştir.

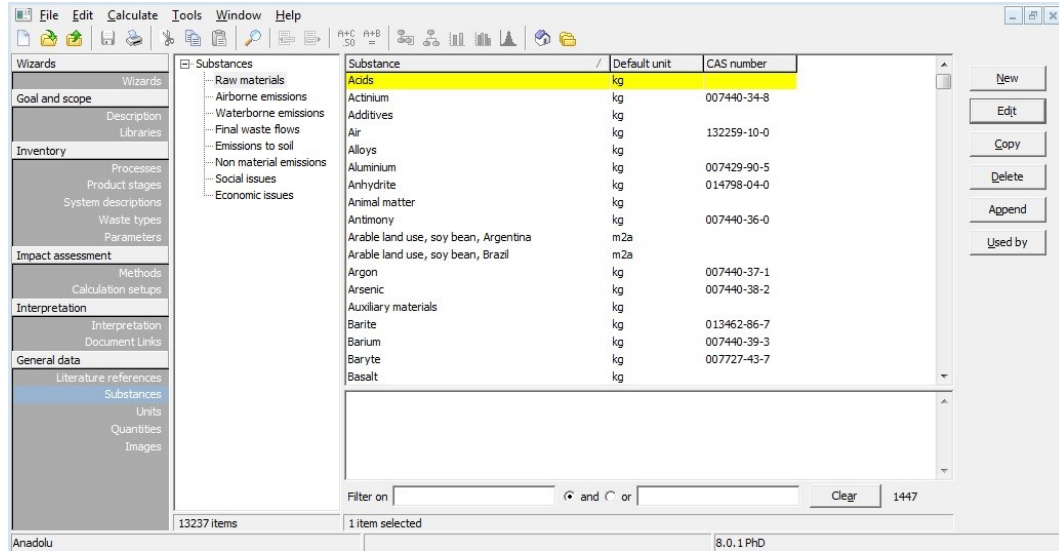
Çalışmanın ikinci aşamasında yaşam döngüsü envanter analizi (LCIA) için malzeme ve enerji ile ilgili tüm verilerin sayısal olarak elde edilmesi gerektiğinden sisteme giren tüm hammadde ve enerji bileşenleri ile sistemden çıkan kirletici bileşenler ve yan salınımlar fonksiyonel birim ile ilişkilendirilerek hesaplanmıştır. Üçüncü aşamada yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (LCIA) ile refrakter tuğla üretim sürecinin tüm bileşenlerinin çevresel etkileri etki kategorileri bazında (*abiyotik kaynakların tükenmesi, küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli, insanlar üzerine olan toksik etki, ekotoksisite, ozon tabakasının tükenme potansiyeli, fotokimyasal oksidasyon potansiyeli*) bazında SimaPro 8.0.1 (PRE Consultants, Hollanda) yazılımında CML IA yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Dördüncü aşamada ise etki değerlendirmesi sonuçları yorumlanmıştır.

LCC analizi ise beş adımda gerçekleştirilmiştir. Refrakter tuğla üretim sisteminin hedef ve kapsam tanımları yapılmış, bir sonraki aşamada, maliyet prosesleri incelenerek maliyet faktörleri belirlenmiştir. Üçüncü aşamada yaşam döngüsü maliyet envanteri toplanan maliyet verileri yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Dördüncü aşamada ise, lisanslı SimaPro 8.0.1 yazılımında sisteme uygun bir LCC modeli kurulmuştur. Son aşamada ise, refrakter tuğla üretim sisteminin her bileşeni için LCC modeli ile ilgili veriler yazılıma girilerek yaşam döngüsü maliyet analizi yapılmış ve yorumlanmıştır.

8.1. Çalışmada Kullanılan Sima Pro 8.0.1 Yazılımı

Çalışmada içeriği veri tabanının endüstriyel üretime uygun olması, dünyada en çok tercih edilen yazılım olması ve kullanım kolaylığı gibi nedenlerden dolayı SimaPro 8.0.1 (PRe Consultants, Hollanda) yazılımı tercih edilmiştir.

SimaPro 8.0.1 yazılımı içerik olarak (Şekil 8.1) ISO 14040'a uygun ve hedef ve kapsam (goal and scope), envanter (inventory), etki değerlendirmesi (impact assessment) ve yorumdan (interpretation) oluşmaktadır.



Şekil 8.1. SimaPro 8.0.1 yazılımı ana ekranı

8.2.Refrakter Tuğla Üretim Süreci ve LCA uygulaması

Bu çalışmada, LCA analizi dört aşamada gerçekleştirilmiştir.

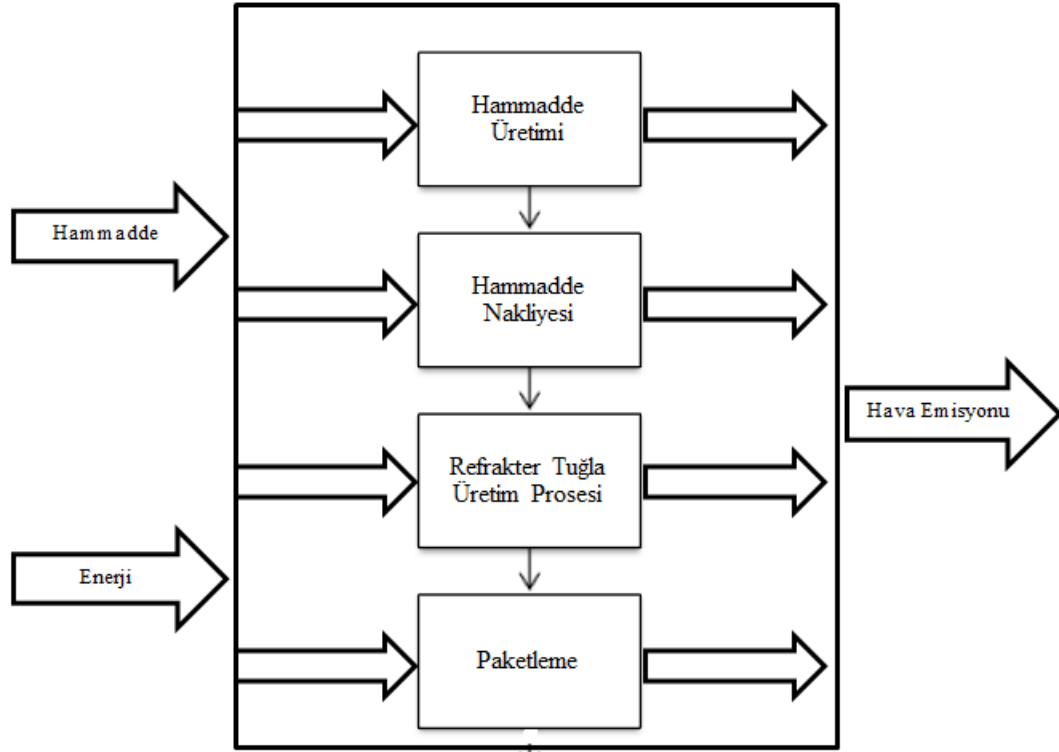
8.2.1.Hedef ve kapsam tanımı

Refrakter tuğla üretim prosesinin çevreye olan etkilerini değerlendirmek amacı ile Sörmaş Söğüt Refrakter Sanayi A.Ş.'nin çimento endüstrisinde kullanılmak üzere ürettiği Manyezit-Spinel Refrakter Tuğlanın Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) çalışması yapılmıştır.

Sistem sınırları;

- Hammaddenin eldesi
- Hammaddenin üretim tesisine nakliyesi
- Refrakter tuğlanın üretim prosesi
- Refrakter tuğla üretim hattının bakım onarımı
- Tuğlanın ambalajlanması ve elden çıkarılması

olmak üzere beşikten kapıya (cradle to gate) yaklaşımı ile belirlenmiştir. Sistem sınırları ambalajlanan tuğlanın dağıtımını, kullanımını ve bertarafını içermemektedir. Çalışmada 1 ton manyezit spinel tuğla fonksiyonel birim olarak belirlenmiştir. 1 ton manyezit spinel tuğla için yapılan LCA analizinin sistem sınırları Şekil 8.2’de verilmektedir.



Şekil 8.2 LCA analizindeki sistem sınırları

8.2.2. Yaşam döngüsü envanter analizi

Çalışmada yaşam döngüsü envanteri veri toplama, varsayımlar ve hesaplama işlemlerinden oluşmaktadır. Her bir prosesin detaylı incelemesinin yapılabilmesi için tuğlanın yaşam döngüsü alt sistemlere bölünmüştür. Her bir alt

sistem için bütün enerji ve hammadde girdileri ile emisyonlar, üretimde oluşan diğer atıklar fonksiyonel birim bazında hesaplanmıştır.

8.2.2.1. Veri toplama

Çalışmada manyezit spinel tuğlanın yaşam döngüsü, hammadde eldesinden üretimde paketlenme aşamasına kadar geçen süre boyunca ele alınmıştır. Sörmaş Söğüt Refrakter Malzemeleri A.Ş. çevre raporları, teknik analiz raporları detaylı bir şekilde incelenmiştir. İncelenen sistem ve LCA bileşenleri Çizelge 8.1’de manyezit spinel tuğlanın karakteristik özellikleri ise Çizelge 8.2’de verilmektedir.

Refrakter üretim tesisinde, hammaddeler çeşitli fraksiyonlarda olacak şekilde yapılan kırma-öğütme-eleme prosesi sonucu silolara alınmaktadır. Harman hazırlama aşamasında %85 Manyezit, %15 Manyezit-Alumina spinel olmak üzere belirlenmiş oranlarda karıştırılır. Bağlayıcı ise belli oranlarda kimyasal çözelti haline getirilerek eklenir. Hazırlanan harman, presleme aşamasına getirilerek kuru presleme işlemi yapılır.

Üretim tesisinde deniz suyu sinter manyezit iki ayrı ülkeden temin edilmektedir. Tuğla üretiminde kullanılan deniz suyu sinter manyezitin bir kısmı Meksika’dan temin edilirken diğer bir kısmı ise Hollanda’dan sağlanmaktadır. $MgO.Al_2O_3$ ($MgAl_2O_4$) spineli ise Çin’den temin edilmekte olup, bağlayıcı malzeme İtalya’dan sağlanmaktadır. Üretimde kullanılan su bölgedeki nehirden arıtılarak elde edilmektedir. Refrakter tuğla üretimi prosesi Şekil 8.3’de verilmiştir.

Preslenen ürünler kurutulmak üzere tünel fırına aktarılırlar. Kurutma işlemi 150-200 °C gerçekleştirilir. Buradaki ısı, pişirme ünitesinden çıkan atık ısı ile sağlanmaktadır. Kurutma işleminden geçen ürünler yaklaşık 1500°C’de pişirilmek üzere tünel fırına aktarılırlar.

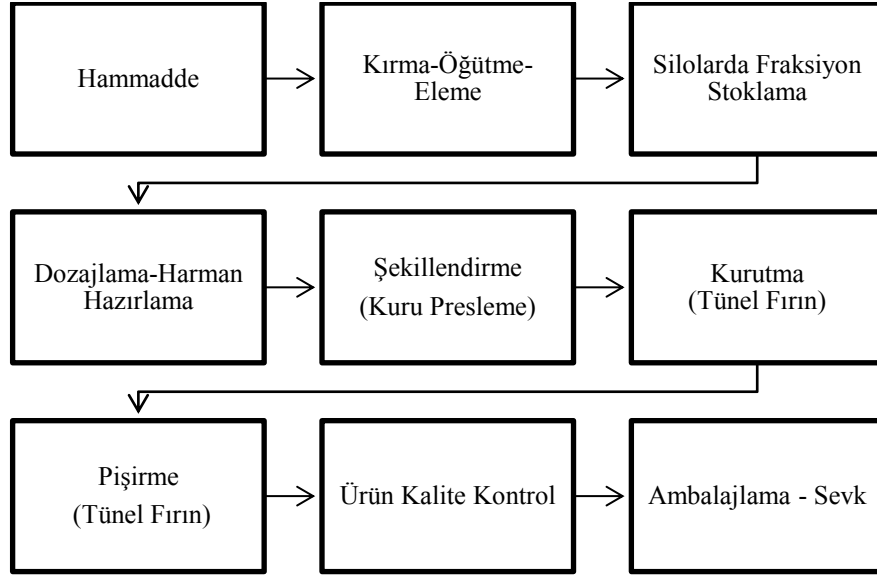
Pişirme konucu kalite kontrol aşamasından geçen ürünler ambalajlanırlar. Ambalajlama sonrası refrakter tuğla sevk için hazır hale getirilir.

Çizelge 8.1: LCA bileşenlerinin sınıflandırılması

LCA bileşenleri	LCA prosesleri	Envanter kaynakları
Refrakter tuğla üretimi	Kırma - Öğütme - Eleme	Refrakter üretim tesisi
	Dozajlama-harman hazırlama	Refrakter üretim tesisi
	Şekillendirme	Refrakter üretim tesisi
	Kurutma/pişirme	Refrakter üretim tesisi, Emisyon ölçümü
	Ambalajlama	Refrakter üretim tesisi
Deniz suyu sinter manyezit – 1 (Meksika)	Hammadde üretimi	Literatür veritabanı
	Deniz ulaşımı	Refrakter üretim tesisi/ Hammadde üretim tesisi
	Karayolu ulaşımı	Refrakter üretim tesisi/ Hammadde üretim tesisi
Deniz suyu sinter manyezit – 2 (Hollanda)	Hammadde üretimi	Literatür veritabanı
	Deniz ulaşımı	Refrakter üretim tesisi/ Hammadde üretim tesisi
	Karayolu ulaşımı	Refrakter üretim tesisi/ Hammadde üretim tesisi
Spinel üretimi	Hammadde üretimi	Literatür veritabanı
	Deniz ulaşımı	Refrakter üretim tesisi/ Hammadde üretim tesisi
	Karayolu ulaşımı	Refrakter üretim tesisi/ Hammadde üretim tesisi

Çizelge 8.2. Refrakter üretim tesisinde üretilen Manyezit – Spinel tuğlanın özellikleri

Fiziksel Özellikler	
Bulk Yoğunluk (g/cm ³)	2,95
Görünen Porozite (%)	16
Soğukta Basma Mukavemeti (N/mm ²)	65
Tasarım Özellikleri	
Yük altında refrakterlik (°C)	> 1750
Termal Genleşme (%) (1000°C)	1,5



Şekil 8.3. Sörmaş Söğüt Refrakter Malzemeleri A.Ş. Tuğla Üretim Sistemi

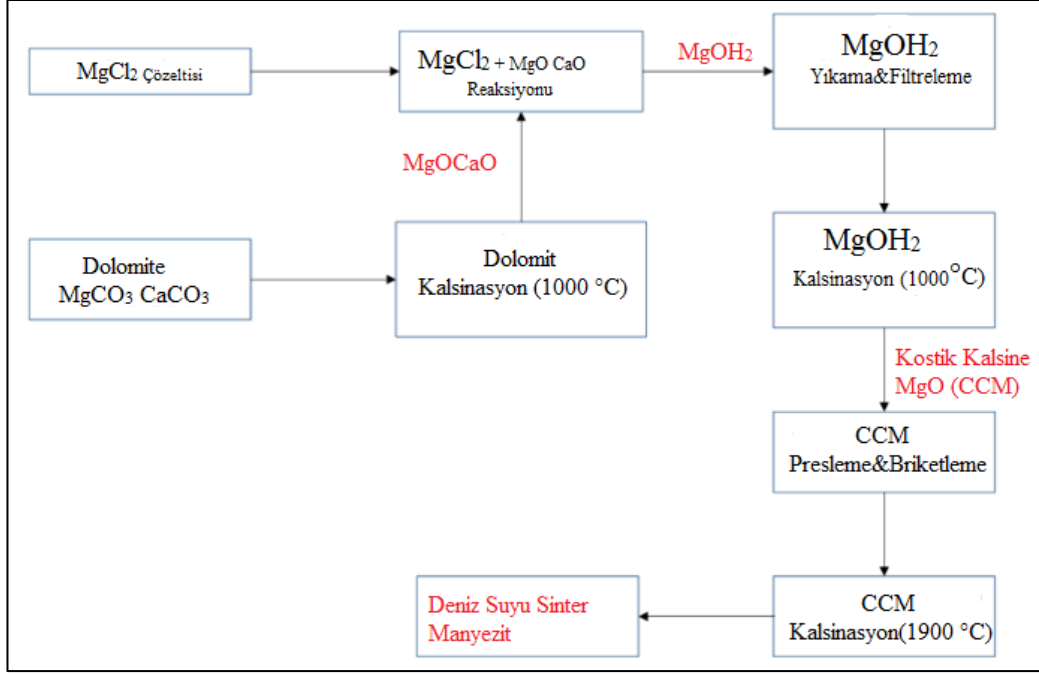
Bu tez kapsamında üretim sırasında meydana gelen gaz emisyonlarının ölçümü 16.12.2014 tarihinde akredite bağımsız bir kuruluş tarafından gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 72 saatlik pişirim süresi altında, 5580 kg manyezit-spinel refrakter tuğlası pişirilirken gerçekleştirilmiştir. Tünel fırın çıkış bacasında yanma gazları (CO, CO₂, NO_x, SO₂) toz, VOC, flor, klor, ağır metal, formaldehit ölçümleri yapılmış olup, sonuçlar Ek-1’de verilmiştir.

Üretim sırasında özellikle presleme ünitesinde ıskarta olan tuğlalar ve ambalajlama sırasında polimerik atıklar oluşmaktadır. Pişirme öncesi ıskarta olan tuğlalar öğütülüp tekrar üretime verilmektedir.

Refrakter tuğla üretiminde atıksu deşarjı söz konusu değildir.

- **Hammadde üretim prosesi bileşenleri**

Hollanda’da üretilen deniz suyu sinter manyezit üretimi akış şeması Şekil 8.4’te verilmiştir.



Şekil 8.4. Hollanda’da üretilen Deniz Suyu Sinter Manyezit üretim akış şeması

MgCl₂ içeren çözeltilerden (deniz suyu, çamur), kalsine dolomit çöktürme ajanıyla reaksiyon sonucu magnezyum hidroksit (Mg(OH)₂) elde edilir. Isıtılarak (1000 °C) dekompoze olabilen Mg(OH)₂, MgO’ye dönüştürülür. Daha sonra yüksek sıcaklıkta sinterlenerek deniz suyu sinter manyezit elde edilmektedir. Bir ton deniz suyu sinter manyezit üretmek için, 1,2 ton dolomit ve 1,2 ton MgCl₂ hammadde gerekirken, toplam olarak, 11,3 GJ enerji harcanmaktadır.

Hollanda’daki deniz suyu sinter manyezit üretimi sırasında oluşan gaz emisyonları Çizelge 8.3’de verilmiştir.

Çizelge 8.3. Hollanda deniz suyu sinter manyezit üretimi için gaz emisyonları (EIPPCB, 2007b)

	Kalsinasyon (kg/ ton MgO)	Sinterleme (kg/ ton MgO)
CO	2-9	1,5-5,5
NO _x	0,1-0,4	2-4
CO ₂	570	
SO ₂	-	0,6
Partikül madde (MgO)	0,3	

Hollanda'daki üretim tesisinde oluşan 3 milyon m³/yıl atıksu, deşarj standartlarına uygun olarak nehre deşarj edilmektedir. Atıksu kaynakları şu şekildedir:

- Atık CaCl₂
- Mg(OH)₂ çamurundan atıksu
- MgCl₂ saflaştırmadan atıksu
- Sülfat ve bor gideriminden atıksu
- Mg(OH)₂ yıkama suyu

Hollanda'daki deniz suyu sinter manyezit üretiminde oluşan atıksu deşarjları Çizelge 8.4'te verilmiştir. Her bir bileşenin 1 ton manyezit spinel tuğla üretimine etkisi Ek-1' de verilmiştir.

Çizelge 8.4. Hollanda deniz suyu sinter manyezit üretim tesisi atıksu deşarjları (EIPPCB, 2007b)

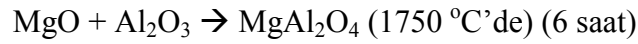
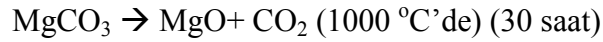
	Mg⁺²	Ca⁺²	K⁺	Na⁺	Cl⁻	SO₄⁻²	B⁺³	Cr	Zn
Derişim (mg/L)	-	-	-	-	-	-	2,5	0,064	0,032
Yük (kg/yıl)	-	-	-	-	-	-	-	213,5	105,5
Derişim (g/L)	0,33	21,11	0,54	2,21	41,99	0,35	-	-	-
Yük (ton/yıl)	1099	70285	1785	7359	139807	1163	8,6	-	-

Meksika’da üretilen deniz suyu sinter manyezit üretim prosesi ise Hollanda üretim tesisi benzer özellikler taşımaktadır. Meksika’daki üretim tesisi farklı olarak üretimde çöktürme ajanı olarak kullanılan dolomiti, kalsinasyon işlemi ile tesis sınırları içerisinde üretmektedir. Tesiste 2011 yılında 85,7 kt/yıl MgO üretilmiştir. Gaz emisyonlarıyla ilgili 2011 yılına ait veriler Çizelge 8.5’de verilmiştir. Kalsinasyon işlemi sırasında gereken enerji hesaplamaları Ek-2’de verilmiştir.

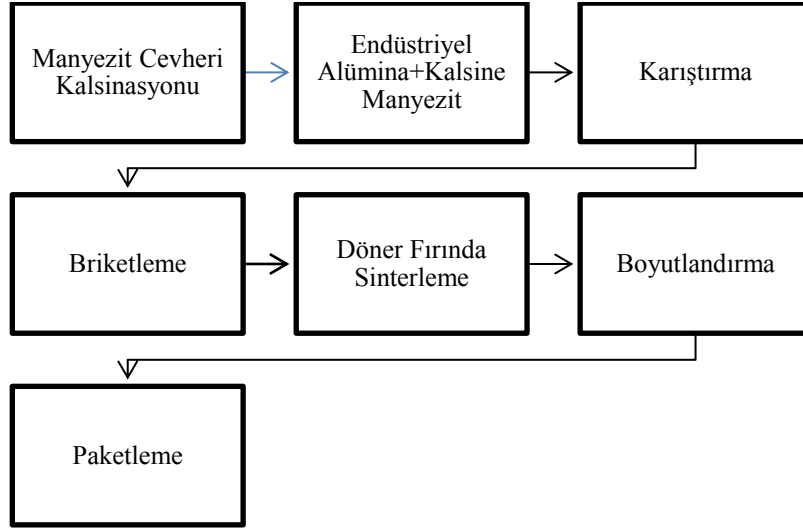
Çizelge 8.5. Meksika deniz suyu sinter manyezit üretim tesisi gaz emisyonları

Emisyon	2011 yılı emisyon miktarı (ton/yıl)	Ton başına emisyon miktarı (kg/ton MgO)
NO _x	199,23	2,32
CO	287,28	3,35
Partikül	113,15	1,32

Çin’de üretilen sinter spinele ait üretim şeması Şekil 8.5’te verilmiştir. Üretim iki ana reaksiyon üzerinden gerçekleşmektedir. Üretim tesisinde yakıt olarak ağır yakıt (Heavy fuel) kullanılmaktadır.



Sinter spinel üretimi ile ilgili oluşum entalpileri, ısı kapasiteleri ve diğer hesaplamalar Ek-3’de verilmiştir.



Şekil 8.5. Çin’de üretilen Sinter Spinel üretim akış şeması

8.2.2.2. Varsayımlar

Meksika’da üretim yapan tesisin ulaşılamayan verileri, Hollanda’ da üretim yapan tesis ile aynı kabul edilmiştir. İki üretim tesisinin aynı kabul edilen verileri Ek-4’ te verilmiştir. Verilere ek olarak, dolomitin kalsinasyon işlemi dahil edilmiştir. Kalsinasyon işlemi için literatürden elde edilen değerler kullanılmıştır. Üretimde girdi ve çıktıları oluşturan %2,5’in altındaki katı maddeler LCA envanterine girilmemiştir. Hammadde üretimlerinde üretimdeki elektrik sarfiyatları aynı kabul edilmiştir.

8.2.3. Etki analizi

Çalışmada kullanılan CML IA hesaplama yönteminde seçilen etki kategorileri;

- abiyotik kaynakların tükenmesi,
- asidifikasyon,
- fotokimyasal sis,
- küresel ısınma,
- ozon tabakasının tükenmesi,
- ötrofikasyon,
- toksik etki
 - insanlar üzerine olan toksik etki
 - yüzey sularına olan toksik etki
 - kara ekosistemine olan toksik etki

şeklindedir. Etki analizi sonucunda bulunan sonuçlar Bulgular bölümünde verilmiştir.

8.3. Refrakter Tuğla Üretim Süreci ve LCC Uygulaması

Yaşam döngüsü maliyeti kavramı bir ürün veya sistemin yaşam döngüsü boyunca; sistemin geliştirilmesi, üretilmesi, işletilmesi ve envanterden çıkarılması için ortaya çıkan maliyetlerin toplamı olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, refrakter tuğla üretim prosesinin ekonomik açıdan değerlendirilmesi, hedef ve kapsam tanımı, maliyet bileşenlerinin belirlenmesi, maliyet verilerinin toplanması, uygun bir LCC modelinin oluşturulması ve sonuçların yorumlanması olmak üzere beş adımda gerçekleşmiştir.

8.3.1. Hedef ve kapsam tanımı

Bu bölümde spinel refrakter tuğla üretim prosesinin ekonomik açıdan değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Önce manyezit spinel refrakter tuğla üretim prosesinin sistem sınırları ve fonksiyonel birimi belirlenmiştir. Sistem sınırları:

- Manyezit spinel refrakter tuğlayı oluşturan hammaddelerin üretimi,
- Manyezit spinel refrakter tuğlayı oluşturan hammaddelerin üretim tesisine taşınması,

- Manyezit spinel refrakter tuğlanın üretimi,
- Üretim hattının bakımı,
- Manyezit spinel refrakter tuğlanın ambalajlanması ve sevk edilmesi,
- Manyezit refrakter tuğlanın kullanımı ve bertarafı

şeklinde olup, fonksiyonel birim 1 ton refrakter tuğla olarak seçilmiştir. Her bir bileşen için maliyet bileşenleri detaylı olarak belirlenmiştir.

8.3.2. Maliyet bileşenlerinin belirlenmesi

1 ton manyezit spinel refrakter tuğla üretim prosesinin maliyet bileşenleri, içsel ve dışsal maliyetler olmak üzere iki bölümde incelenmiştir. İçsel maliyetler, tuğlayı oluşturan hammaddelerin üretimi sırasında kullanılan enerji maliyeti, hammaddelerin üretim tesisine ulaşımı için nakliye maliyeti, tuğla üretim sürecindeki her bir proses için gerekli olacak enerji tüketimi, bakım onarım maliyetleri, elden çıkarma maliyetleridir. Dışsal maliyetler ise, yaşam döngüsü analizi sonucu incelenen etki kategorilerinin (abiyotik kaynakların tükenmesi, küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli, insanlar üzerine olan toksik etki, ekotoksosite, ozon tabakasının tükenme potansiyeli, fotokimyasal oksidasyon potansiyeli) maliyetleridir.

Yaşam döngüsü maliyet bileşenlerinin sınıflandırılması Çizelge 8.6'da verilmektedir.

Çizelge 8.6. LCC bileşenlerinin sınıflandırılması

LCC maliyetleri	LCC bileşen maliyetleri	LCC alt bileşen maliyetleri
İçsel maliyetler	Hammadde	Hammadde ve nakliye maliyeti
	Üretim	Enerji maliyeti
		Personel maliyeti
		Üretim hattının bakımı-onarım maliyeti
		Ambalajlama maliyeti
Dışsal maliyetler	Kirlenici maliyetler	Abiyotik kaynakların tükenmesi
		Asidifikasyon
		Fotokimyasal sis
		Küresel ısınma
		Ozon tabakasının tükenmesi
		Ötrofikasyon
		Toksisite (insanlar üzerine olan toksik etki, ekotoksisite)

8.3.3. Maliyet verilerine ait envanerin oluşturulması

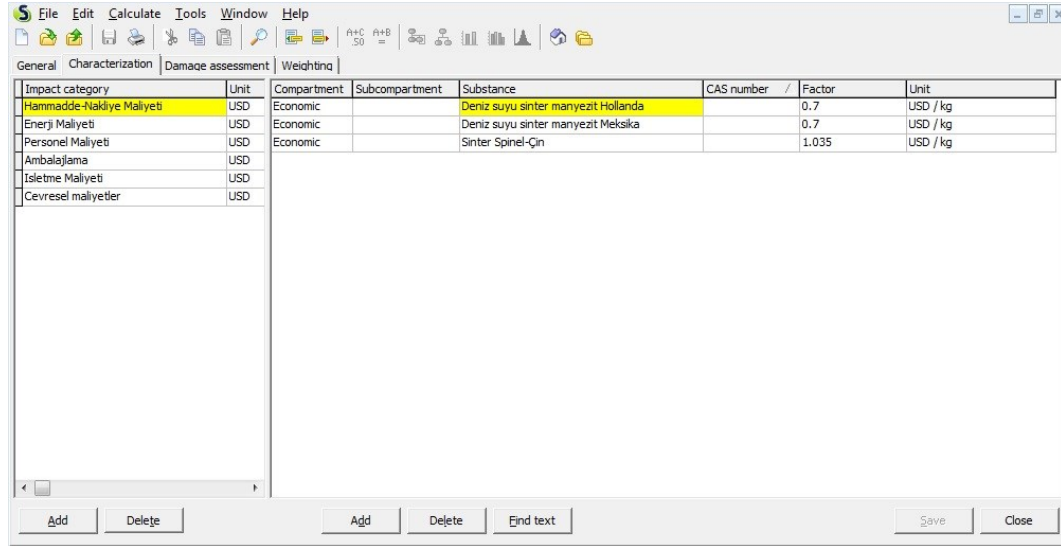
1 ton manyezit spinel tuğla üretiminin maliyet bileşenleri ile ilgili maliyet verileri, refrakter üretim tesisinden, literatürden ve yazılımın veri tabanından elde edilmiştir. Çevresel etkilerin maliyet analizi için aynı tesiste, aynı fonksiyonel birim ve sistem sınırları kapsamında gerçekleştirilen LCA çalışmasının sonuçları kullanılmış ve LCC ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, yaşam döngüsü maliyet envanteri oluşturulurken, her bir bileşen için gerekli hesaplamalar fonksiyonel birim bazında yapılmıştır. İçsel ve dışsal maliyet envanterleri Ek 5' te verilmiştir.

8.3.4. LCC modelinin oluşturulması ve analizinin yapılması

Çalışmada lisanslı Sima Pro 8.0.1 yazılımı kullanılarak oluşturulan LCC modeline, daha önce belirlenen maliyet kategorileri (hammadde-nakliye, enerji, personel, ambalajlama, işletme-bakım, çevresel etkiler) için faktörler ile birimler

girilmiştir. Ağırlıklandırma aşamasında, tüm maliyet kategorileri için “1” değeri girilmiş olup, iskonto ve faiz oranları göz önünde bulundurulmamıştır. LCC analizi 5 adımda gerçekleştirilmiştir.

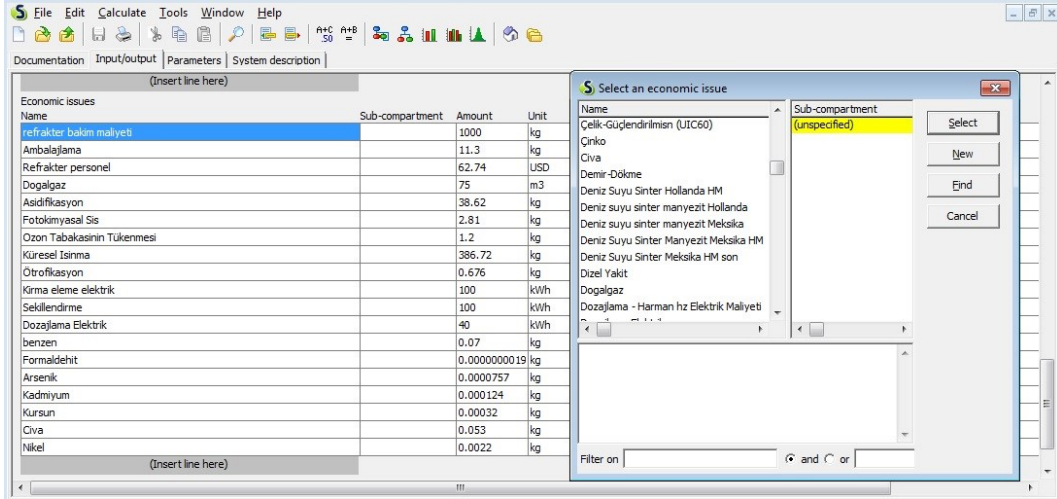
Yazılımda maliyet kalemleri birimleri ile birlikte “substances” bölümünden “economic issues” seçilerek girilmiştir. Daha sonra “Impact Assessment” kısmından “Methods” seçilerek yeni model ismi yazılıma girilmiştir. “characterization” bölümünde, maliyet kategorileri adı altında maliyet sınıfları (Hammadde-nakliye maliyeti, enerji, personel, ambalajlama, işletme ve çevresel maliyetler) ve maliyet sınıflarına ait birimler “USD” olarak, faktör değerleri ile birlikte girilmiştir (Şekil 8.6).



Impact category	Unit	Compartment	Subcompartment	Substance	CAS number	Factor	Unit
Hammadde-Nakliye Maliyeti	USD	Economic		Deniz suyu sinter manyezit Hollanda		0.7	USD / kg
Enerji Maliyeti	USD	Economic		Deniz suyu sinter manyezit Meksika		0.7	USD / kg
Personel Maliyeti	USD	Economic		Sinter Spinel-Çin		1.035	USD / kg
Ambalajlama	USD						
İşletme Maliyeti	USD						
Çevresel maliyetler	USD						

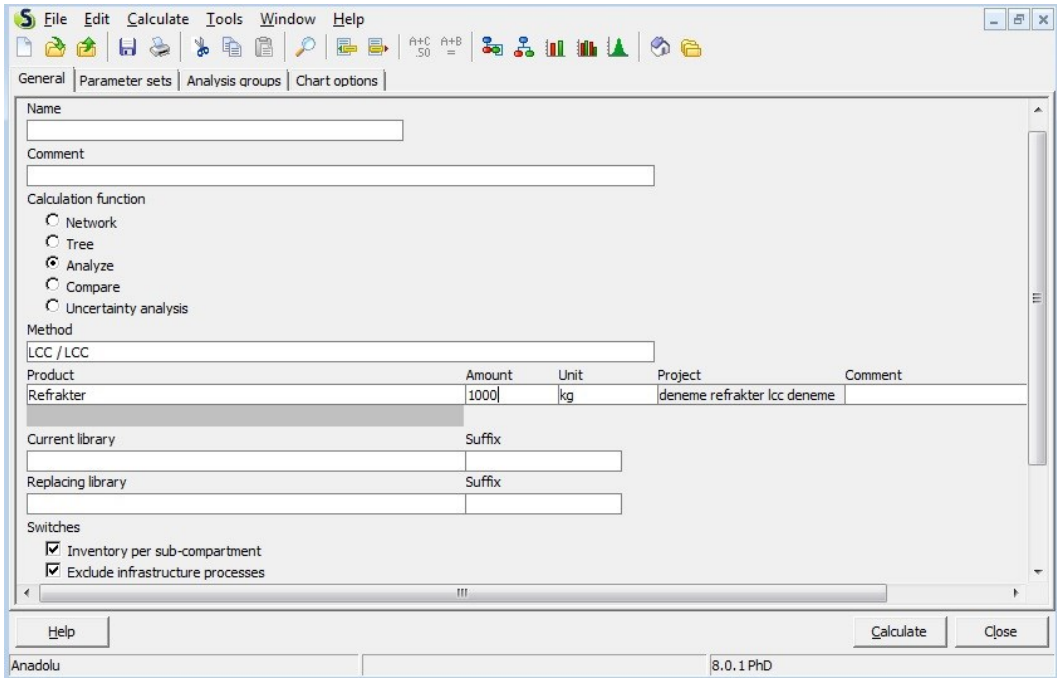
Şekil 8.6. LCC modeline maliyet kategorilerinin eklenmesi

Yazılımda her bir prosese ait ekonomik verileri girmek için öncelikle her bir proses için içsel ve dışsal maliyetlere ait maliyet kalemleri fonksiyonel birim bazında hesaplanarak, ekonomik bölüme “economic issues” kısmına girilmiştir. (Şekil 8.7).



Şekil 8.7. Proseslere ait ekonomik verilerin girilmesi

Yazılımda bütün LCC verileri ve modeli oluşturulduktan sonra sonuçlar hesaplanır. Hesaplama ekranında metot kısmında oluşturulan LCC modeli ve 1 ton manyezit spinel tuğla seçilerek hesaplama yapılmıştır (Şekil 8.8).



Şekil 8.8 LCC modelinin analizinin yapılması

9. BULGULAR

1 ton manyezit spinel tuğla üretiminin LCA ve LCC analizi sonuçlarına ait bulgular detaylı bir şekilde bu kısımda verilmiştir.

9.1. Refrakter Tuğla Üretiminin LCA Sonuçları ve Değerlendirilmesi

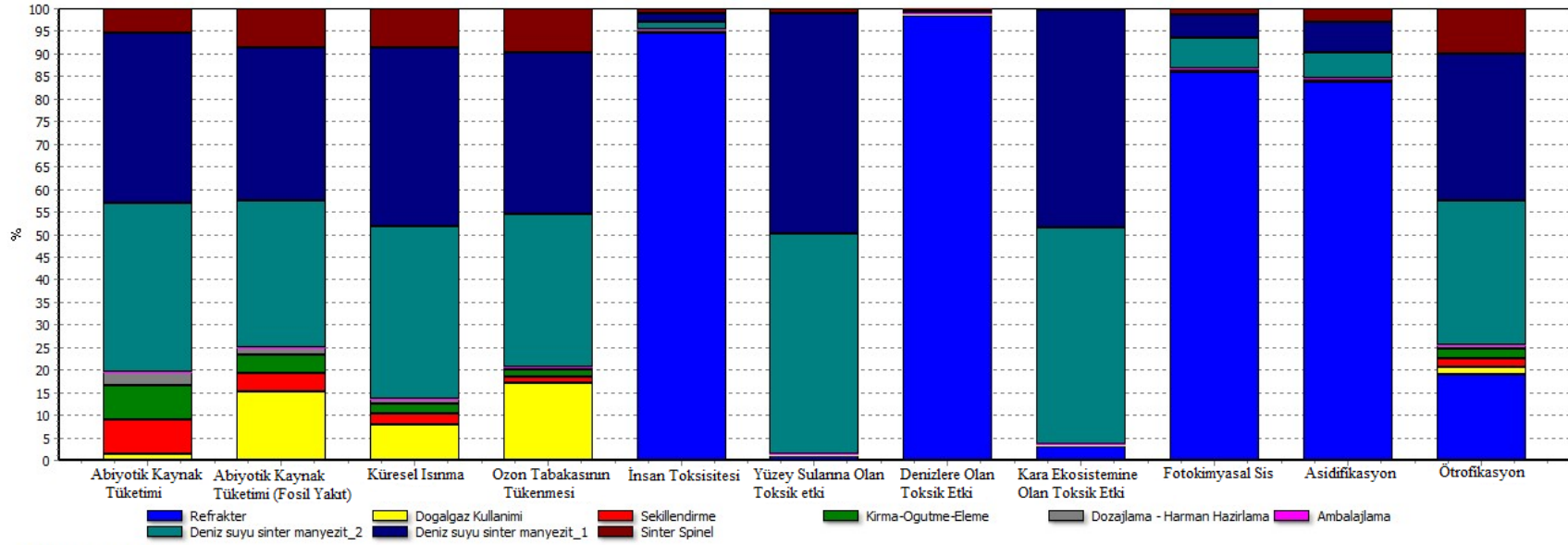
CML IA yöntemine göre yapılan refrakter tuğla üretiminin yaşam döngüsü etki değerlendirmesinin toplu karakterizasyon sonuçları Çizelge 9.1’de normalizasyon sonuçları ise etki yüzdelerine göre Çizelge 9.2’de verilmiştir. Normalizasyon sonuçlarının birimsiz olması nedeni ile etki kategorileri sadece birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bir ton refrakter tuğla üretimi için etki kategorilerine göre karakterizasyon grafiği ise Şekil 9.1’de verilmiştir. Verilen karakterizasyon grafiği refrakter tuğla üretim sürecindeki aşamaların % olarak her bir etki kategorisine olan katkısını göstermektedir. Grafikte bulunan her bir etki kategorisi birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 9.1. Refraktör tuğla üretiminin toplu karakterizasyon sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	Toplam	Refraktör	Doğalgaz Kullanımı	Kırma-Öğütme- Eleme (Elektrik)	Şekillendirme (Elektrik)	Dozajlama – Harman Hazırlama (Elektrik)	Ambalajlama	Deniz Suyu Sinter Manyezit Hollanda	Deniz Suyu Sinter Manyezit Meksika	Sinter Spinel Çin
Abiyotik kaynakların tükenmesi	kg Sb ed	1,42E-05	x	1,96E-07	1,07E-06	1,07E-06	4,26E-07	1,04E-09	5,30E-06	5,34E-06	7,85E-07
Abiyotik kaynakların tükenmesi (fosil yakıtlar)	MJ	2,40E+04	x	3,62E+03	9,76E+02	9,76E+02	3,91E+02	1,37E-01	7,79E+03	8,16E+03	2,05E+03
Asidifikasyon	kg SO ₂ ed	4,58E+01	3,82E+01	1,92E-01	8,61E-02	8,61E-02	3,44E-02	3,96E-05	2,68E+00	3,18E+00	1,39E+00
Denizlere olan toksik etki	kg 1,4-DB ed	9,19E+05	1,49E-02	1,35E+04	1,05E+05	1,05E+05	4,19E+04	1,12E+01	1,62E+05	1,65E+05	3,26E+05
Fotokimyasal sis	kg C ₂ H ₄ ed	3,24E+00	2,78E+00	1,64E-02	4,02E-03	4,02E-03	1,61E-03	2,16E-06	2,14E-01	1,71E-01	4,48E-02
İnsanlar üzerine olan toksik etki	kg 1,4-DB ed	4,31E+02	1,29E+02	5,87E+00	2,54E+01	2,54E+01	1,02E+01	4,68E-03	5,10E+01	5,27E+01	1,32E+02
Kara ekosistemine olan toksik etki	kg 1,4-DB ed	8,45E-01	1,58E-05	2,60E-03	1,96E-02	1,96E-02	7,84E-03	2,20E-06	3,92E-01	3,93E-01	1,04E-02
Küresel ısınma (GWP100a)	kg CO ₂ ed	2,85E+03	x	2,27E+02	6,50E+01	6,50E+01	2,60E+01	8,89E-03	1,10E+03	1,12E+03	2,47E+02
Ozon tabakası tükenmesi (ODP)	kg CFC-11 ed	1,88E-04	x	3,22E-05	2,74E-06	2,74E-06	1,09E-06	4,92E-10	6,37E-05	6,72E-05	1,86E-05
Ötrofikasyon	kg PO ₄ ed	2,42E+00	x	4,57E-02	2,58E-01	2,58E-01	1,03E-01	2,44E-05	7,07E-01	7,17E-01	3,34E-01
Yüzey sularına olan toksik etki	kg 1,4-DB ed	6,66E+02	7,95E-03	4,39E+00	3,98E+01	3,98E+01	1,59E+01	4,27E-03	1,40E+02	1,40E+02	2,86E+02

Çizelge 9.2. Refrakter tuğla üretiminin toplu normalizasyon sonuçları

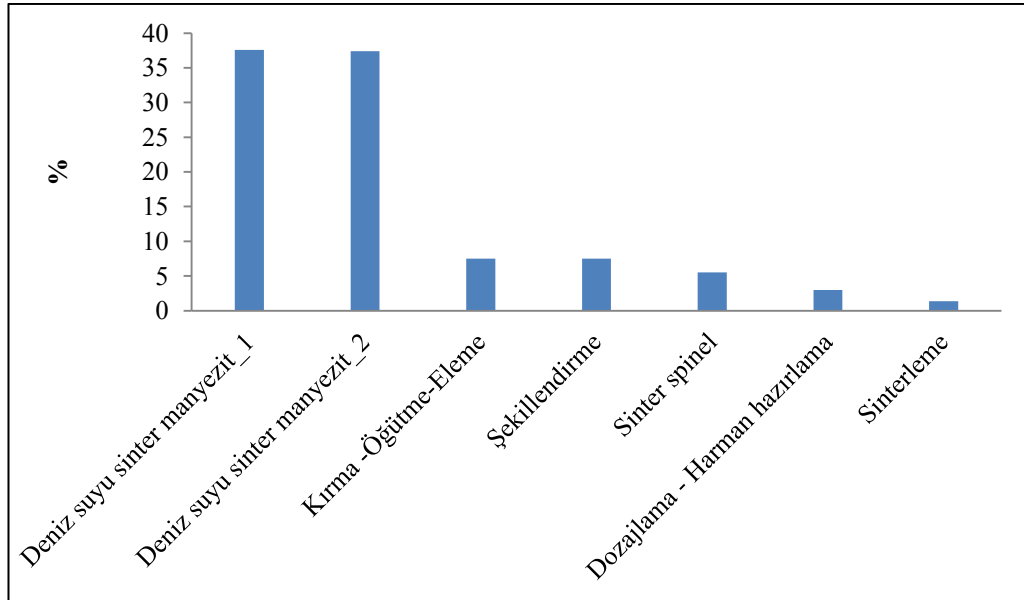
Etki Kategorisi	Toplam	Refrakter	Doğalgaz Kullanımı	Kırma-Öğütme- Eleme (Elektrik)	Şekillendirme (Elektrik)	Dozajlama – Harman Hazırlama (Elektrik)	Ambalajlama	Deniz Suyu Sinter Manyezit Hollanda	Deniz Suyu Sinter Manyezit Meksika	Sinter Spinel Çin	Etki %' si
Denizlere olan toksik etki	1,07E+20	1,74E+12	1,58E+18	1,23E+19	1,23E+19	4,91E+18	1,31E+15	1,90E+19	1,93E+19	3,82E+19	99,29
Abiyotik kaynakların tükenmesi (fosil yakıtlar)	7,55E+17	x	1,14E+17	3,08E+16	3,08E+16	1,23E+16	4,32E+12	2,45E+17	2,57E+17	6,47E+16	0,70
Küresel ısınma (GWP100a)	1,43E+16	x	1,14E+15	3,26E+14	3,26E+14	1,31E+14	4,46E+10	5,51E+15	5,65E+15	1,24E+15	0,01
İnsanlar üzerine olan toksik etki	3,36E+15	1,00E+15	4,56E+13	1,97E+14	1,97E+14	7,90E+13	3,64E+10	3,96E+14	4,10E+14	1,03E+15	0,00
Yüzey sularına olan toksik etki	3,46E+14	4,13E+09	2,28E+12	2,07E+13	2,07E+13	8,27E+12	2,22E+09	7,25E+13	7,26E+13	1,49E+14	0,00
Asidifikasyon	1,29E+12	1,07E+12	5,39E+09	2,42E+09	2,42E+09	9,67E+08	1,11E+06	7,53E+10	8,95E+10	3,91E+10	0,00
Ötrofikasyon	3,20E+10	x	6,03E+08	3,40E+09	3,40E+09	1,36E+09	3,22E+05	9,33E+09	9,46E+09	4,41E+09	0,00
Kara ekosistemine olan toksik etki	4,11E+10	7,68E+05	1,26E+08	9,53E+08	9,53E+08	3,81E+08	1,07E+05	1,91E+10	1,91E+10	5,03E+08	0,00
Fotokimyasal sis	2,75E+10	2,36E+10	1,39E+08	3,41E+07	3,41E+07	1,36E+07	1,83E+04	1,81E+09	1,45E+09	3,80E+08	0,00
Ozon tabakası tükenmesi (ODP)	1,68E+04	x	2,88E+03	2,45E+02	2,45E+02	9,79E+01	4,39E-02	5,69E+03	6,00E+03	1,66E+03	0,00
Abiyotik kaynakların tükenmesi	1,20E+03	x	1,66E+01	9,01E+01	9,01E+01	3,61E+01	8,76E-02	4,49E+02	4,52E+02	6,64E+01	0,00
Toplam	1,08265E+20	1,00365E+15	1,7E+18	1,23E+19	1,23E+19	4,92E+18	1,31E+15	1,92E+19	1,96E+19	3,82355E+19	0,00



Analyzing 1E3 kg 'Refrakter';
 Method: CML-IA baseline V3.00 / EU25 / Characterization / Excluding infrastructure processes / Excluding long-term emissions

Şekil 9.1. 1 ton refrakter tuğla üretimi için LCA karakterizasyon sonuçları

Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli (ADP), doğal hammadde tüketimini ele almakta ve kg Sb eşdeğeri olarak verilmektedir. Refrakter tuğla üretimi yaşam döngüsünde tuğlayı oluşturan hammaddelerin üretimi abiyotik kaynakların tükenmesine en çok etki eden faktörler olarak belirlenmiştir. Hammaddelerin üretimi sırasında kullanılan doğal kaynakların bu duruma neden olduğu düşünülmektedir. İki farklı tesisten gelen deniz suyu sinter manyezit üretimlerinin abiyotik kaynakların tükenmesine olan etkisi hemen hemen aynıdır (Sinter manyezit-1 (Meksika) için %37,6, sinter manyezit-2 (Hollanda) için %37,4) (Şekil 9.2). Bu üretimleri refrakter üretim tesisinde gerçekleşen kırma-öğütme-eleme (%7,51), şekillendirme (%7,51) prosesleri ve sinter spinel üretimi (%5,54) takip etmektedir.

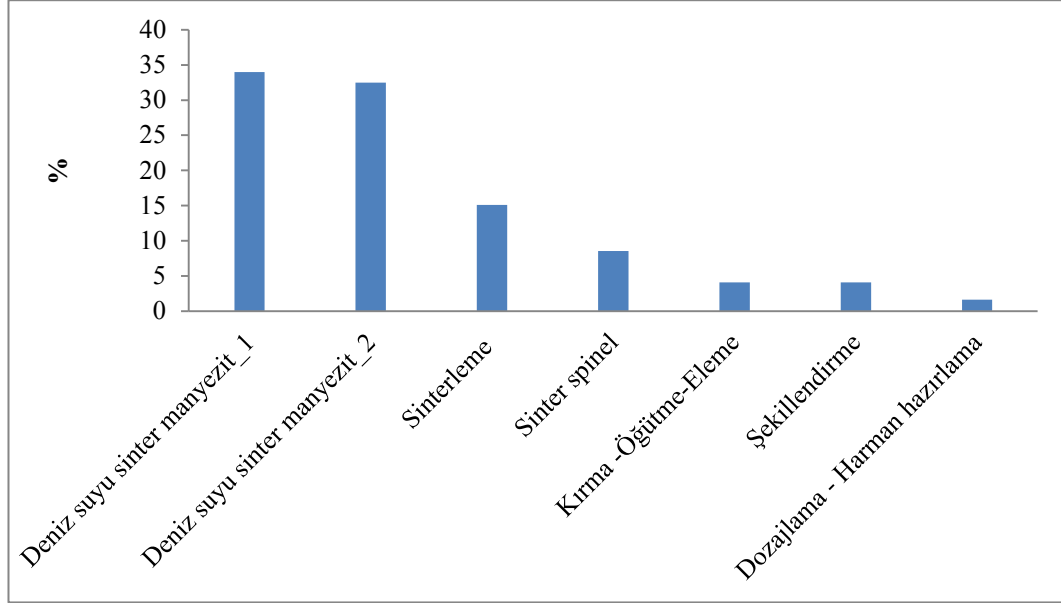


Şekil 9.2. Abiyotik kaynakların tükenme potansiyeline etki eden proseslerin dağılımı

Abiyotik kaynakların tükenmesine sırasıyla krom (%45,1), uranyum (%39,9), nikel (%10,3) neden olmaktadır. Bu etkiler deniz suyu sinter manyezitin üretimi sırasında hammaddelerin doğadan elde edilmesinden kaynaklanmaktadır.

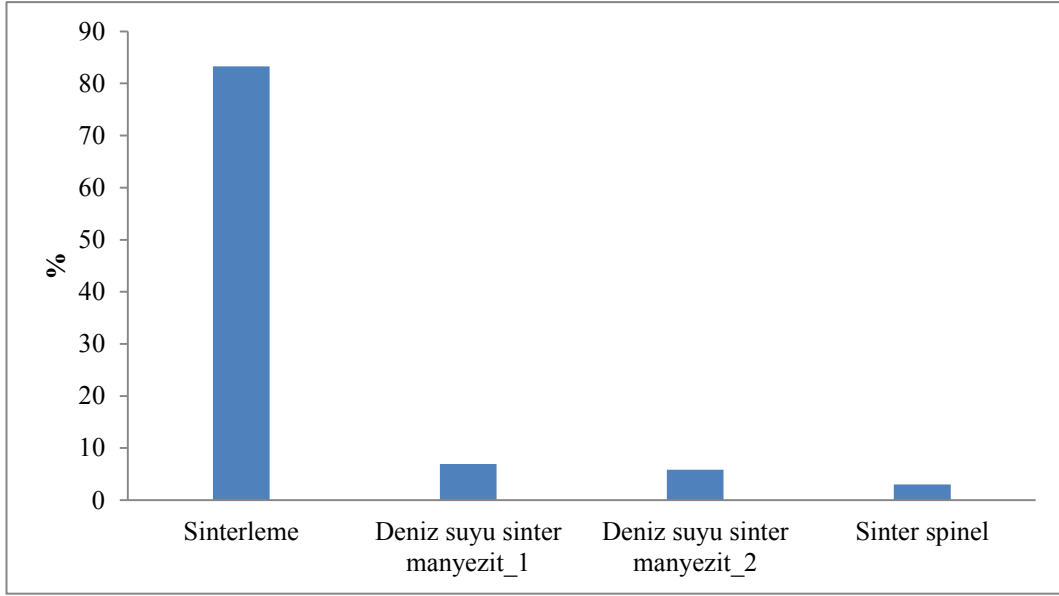
Fosil yakıtlar olarak abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli, MJ olarak ifade edilmektedir. Prosesler sırasında kullanılan yakıtların etkisini göstermektedir. Bu etki kategorisine %34 ile Meksika'daki deniz suyu sinter manyezit üretimi katkıda bulunurken, %32,5 ile Hollanda'daki deniz suyu sinter

manyazit üretimi katkıda bulunmuştur (Şekil 9.3). Proseslerde kullanılan doğal gazın abiyotik kaynak tüketimine etkisi %61 olarak belirlenmiştir. Bunu kömür (%21) ve ham petrol (%18) alt kategorileri takip etmektedir.



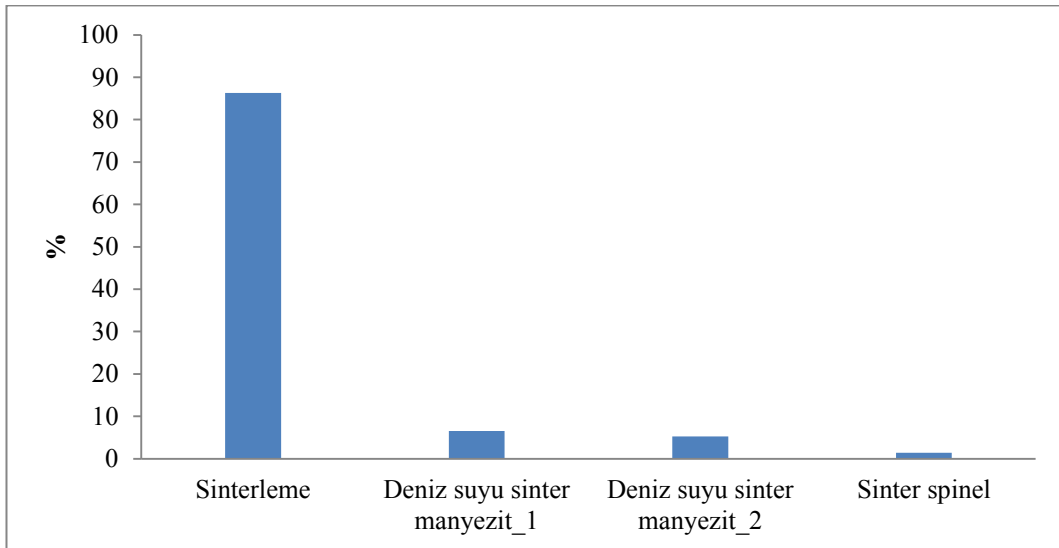
Şekil 9.3. Abiyotik kaynakların tükenme (Fosil yakıt) potansiyeline etki eden prosesler

Asidifikasyon potansiyeli (AP), kg SO₂ eşdeğeri olarak ifade edilmektedir. Refrakter üretimi sırasında gerçekleşen kurutma ve sinterleme prosesleri %83 oranında asidifikasyona etki ederken (Şekil 9.4.) bunu sinter manyezit ve sinter spinel üretimleri takip etmektedir. Bu üretim prosesleri sırasında açığa çıkan SO₂ ve NO_x gazlarının sırasıyla %92,5 ve %7,4 oranında asidifikasyon potansiyeline etki ettiği belirlenmiştir.



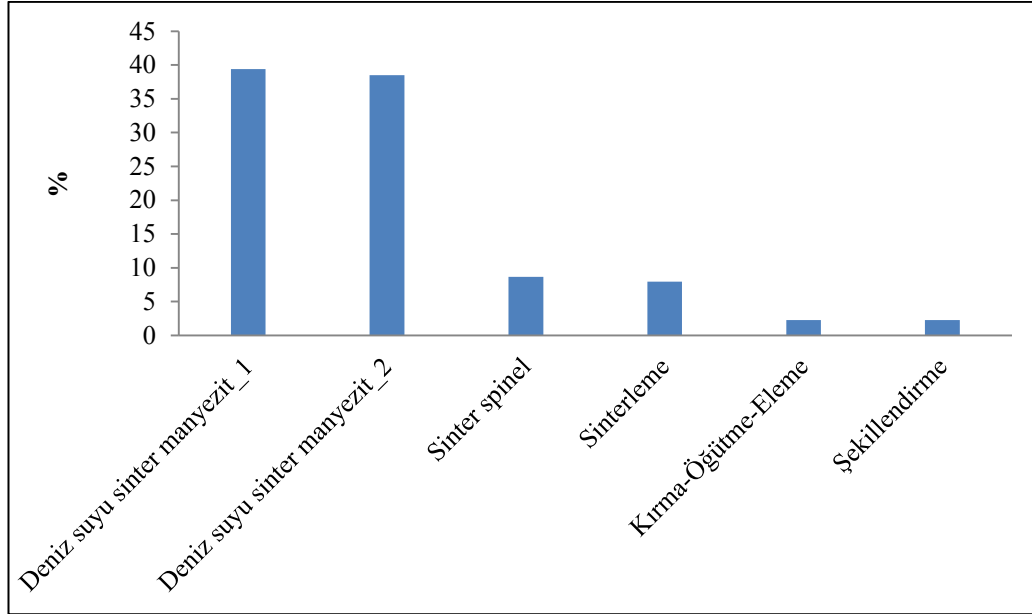
Şekil 9.4. Asidifikasyon potansiyeline etki eden proseslerin dağılımı

Fotokimyasal sis etkisi (POP), kg C₂H₄ eş değeri olarak ifade edilmektedir. Refrakter üretim prosesinde meydana gelen kurutma ve sinterleme süreçleri %86 oranında fotokimyasal sise etki ederken (Şekil 9.5.) bunu sinter manyezit ve sinter spinel üretimleri takip etmektedir. Bu etkiye, refrakter üretimi sırasında gerçekleştirilen kurutma ve pişirme prosesi sırasında ortaya çıkan emisyonların neden olduğu düşünülmektedir.



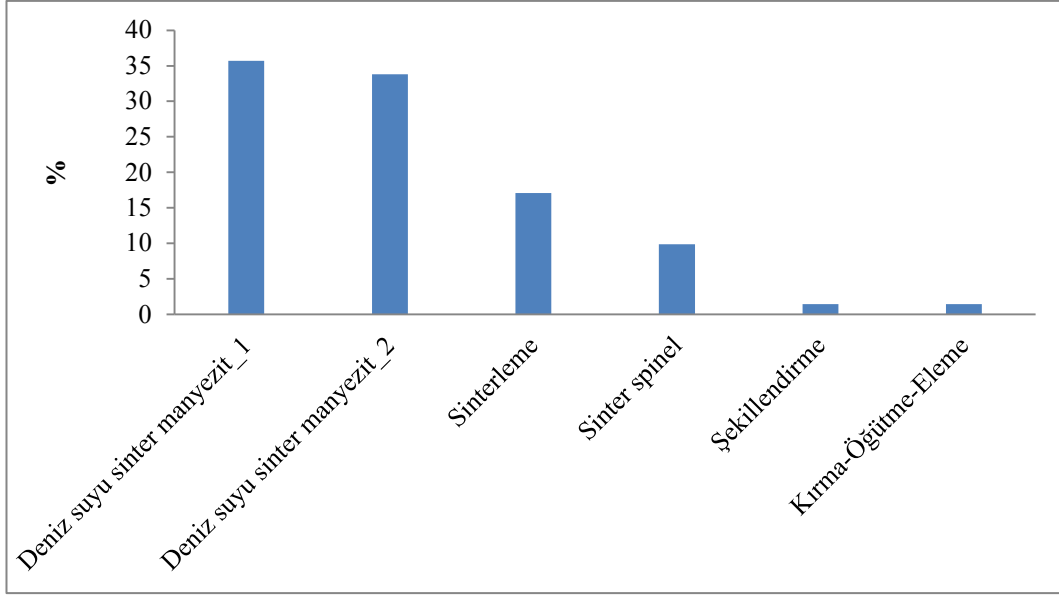
Şekil 9.5. Fotokimyasal sise etki eden proseslerin dağılımı

Küresel Isınma Potansiyel (GWP), kg CO₂ eşdeğeri şeklinde ifade edilmektedir. Küresel ısınmaya etki eden en önemli proseslerin deniz suyu sinter manyezit üretimleri olduğu belirlenmiştir (Şekil 9.6). Bu etkiyi sinter spinel üretimi ve sinterleme prosesi takip etmektedir. Bu etkiye sinter manyezit üretimi sırasında gerçekleştirilen kalsinasyon işlemi sırasında atmosfere salınan CO₂ emisyonunun yol açtığı düşünülmektedir.



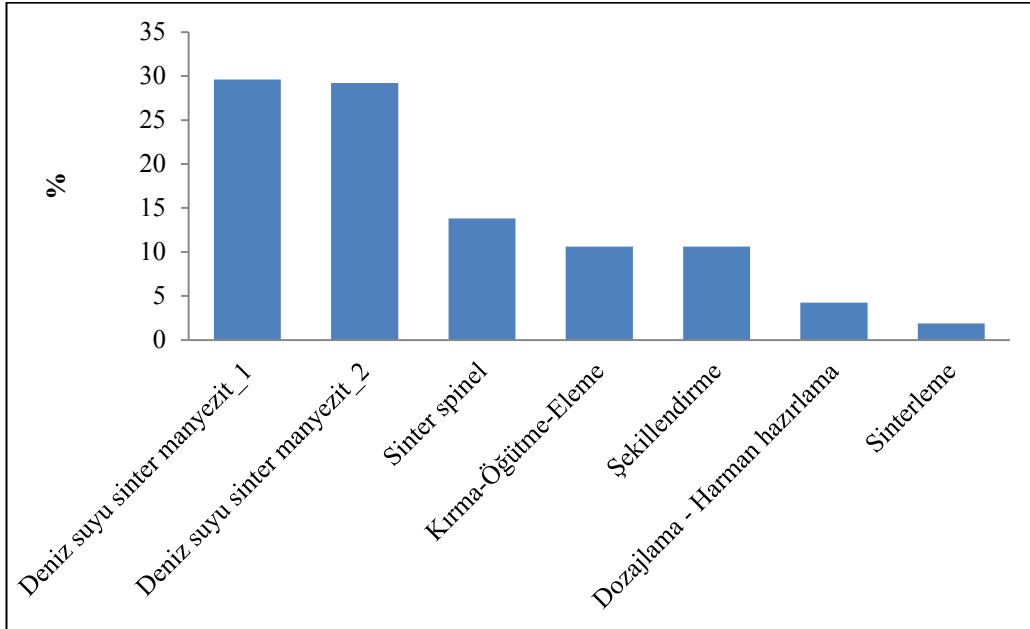
Şekil 9.6. Küresel ısınma potansiyeline etki eden proseslerin dağılımı

Ozon tabakasının tükenmesi (ODP), kg CFC-11 eş değeri olarak ifade edilmektedir. Meksika'daki deniz suyu sinter manyezit üretimi, ozon tabakası tükenme potansiyelini %35,7 oranında etkilemektedir. Bunu %33,8lik payla Hollanda'daki deniz suyu sinter manyezit üretimi takip etmektedir. Ozon tabakasının tükenmesine etki eden diğer alt kategoriler Şekil 9.7' de verilmiştir. Deniz suyu sinter manyezit üretiminde ve refrakter üretimi sırasındaki kurutma ve sinterleme sürecinde ortaya çıkan halojenli gazlar ozon tabakasının tükenmesine etki eden en büyük faktörlerdir.



Şekil 9.7. Ozon tabakasının tükenme potansiyeline etki eden proseslerin dağılımı

Ötrofikasyon Potansiyeli (EP), kg PO₄ eşdeğeri olarak verilmektedir. İki farklı tesiste üretilen deniz suyu sinter manyezitin ötrofikasyon potansiyeline etkisi hemen hemen aynıdır. (Sinter manyezit-1 için %29,6, sinter manyezit-2 için %29,2) (Şekil 9.8) Bu üretimleri sinter spinel üretimi ve refrakter üretim prosesindeki alt prosesler takip etmektedir.

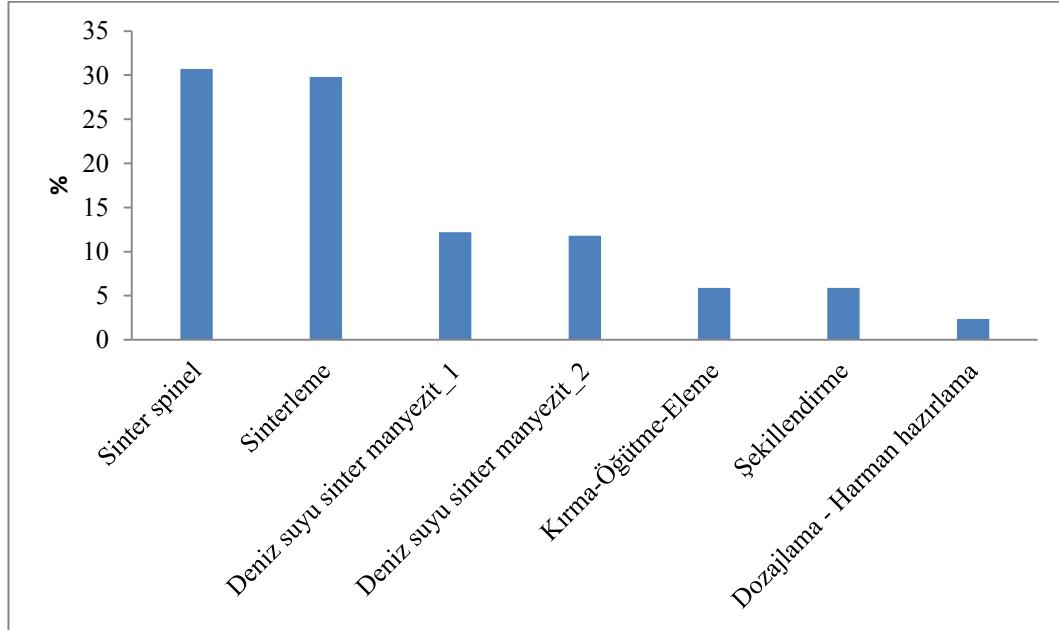


Şekil 9.8. Ötrofikasyon potansiyeline etki eden proseslerin dağılımı

Ötrofikasyonun hava ve yeraltı sularına farklı etkilerinin olduğu göz önüne alındığında havaya tamamıyla NO_x bileşimleri etki ederken yeraltı sularına fosfat ve nitrat iyonlarının karıştığı belirlenmiştir.

Toksosite;

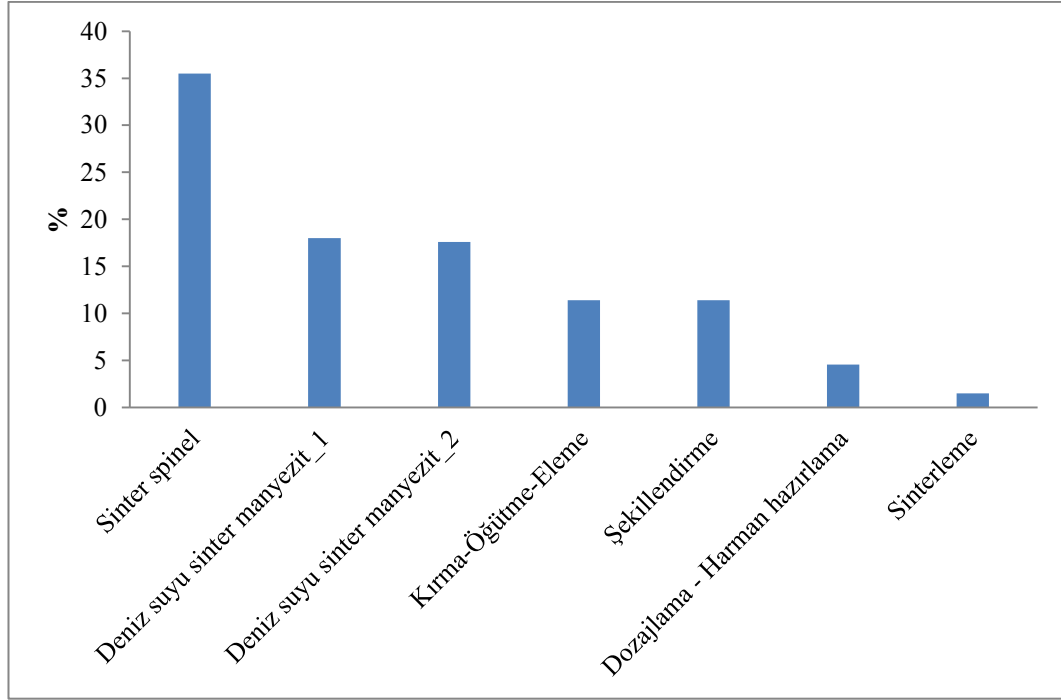
İnsanlar üzerine olan toksik etki (HTP); kg 1,4 DB (dikloro benzen) eşdeğeri olarak ifade edilmektedir. İnsanlar üzerindeki toksik etkiye Çin'deki spinel üretimi %30,7 ile katkıda bulunurken, refrakter üretimindeki kurutma-pişirme prosesi %29,8 oranında etki etmektedir (Şekil 9.9). İnsanlar üzerindeki toksik etkinin havaya ve suya olan etkileri ayrı ayrı değerlendirildiğinde; havaya olan en büyük etki hammadde üretimleri ve sinterleme sırasında ortaya çıkan hava emisyonlarıdır. Suya salınan emisyonlar ise insan toksisitesi üzerinde büyük etki gösterirken öne çıkan elementler selenyum, vanadyum, nikel ve baryum olarak belirlenmiştir.



Şekil 9.9. İnsan toksisitesine etki eden proseslerin dağılımı

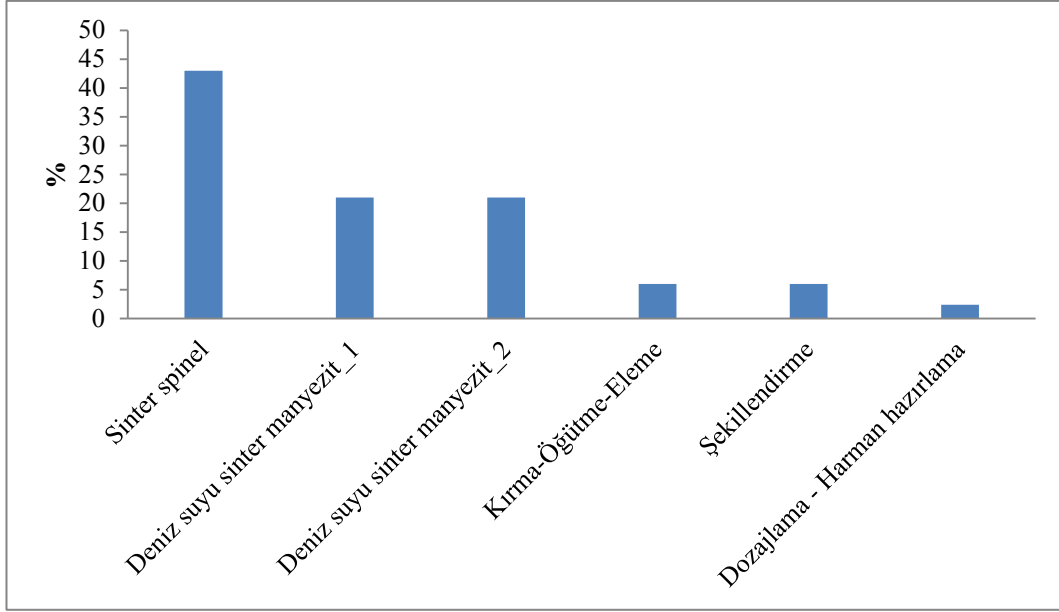
Denizlere olan toksik etki (FAETP); kg 1,4 DB (dikloro benzen) eşdeğeri olarak ifade edilmektedir. Çin'deki spinel üretimi, %35,5 ile deniz sularına olan toksisiteye en fazla etki eden proses olarak belirlenmiştir. Bunun nedeni refrakter üretim tesisi ile sinter spinel üretim tesisi arasındaki mesafeden

dolayı deniz ulaşımının uzun sürmesi olarak düşünülmektedir. Sinter spinel üretimini iki farklı kaynaktan temin edilen deniz suyu sinter manyezit üretimleri (Sinter manyezit-1 için %18, sinter manyezit-2 için %17,6) takip etmektedir (Şekil 9.10). Deniz sularına olan toksik etki havaya da florürlü gaz salınımıyla etki ederken, suya salınan emisyonlar içerisinde vanadyum, berilyum, nikel, kobalt ve selenyum öne çıkan elementler olarak belirlenmiştir.



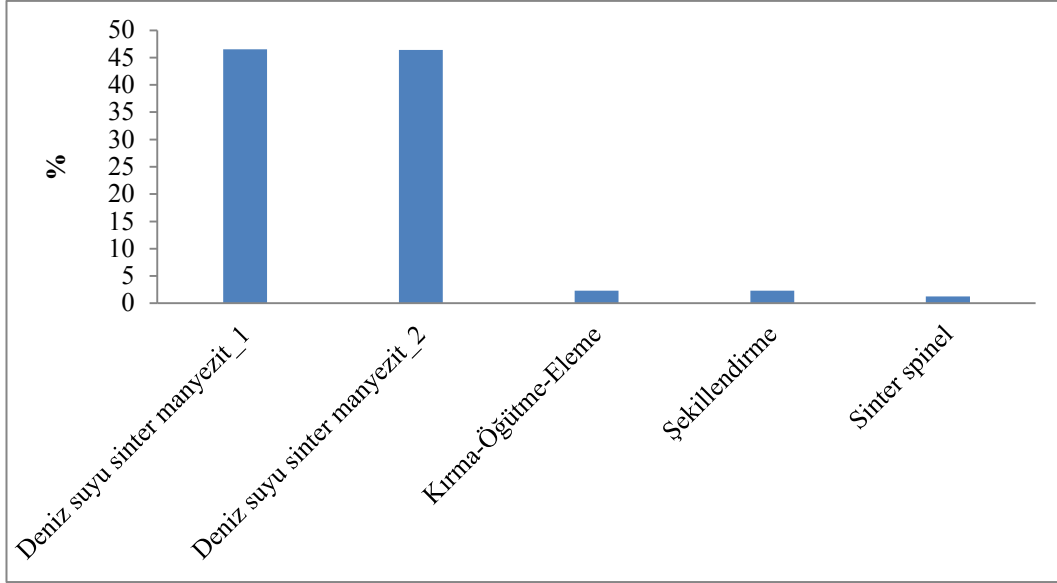
Şekil 9.10. Deniz suyu toksisitesine etki eden proseslerin dağılımı

Yüzey sularına olan toksik etki; kg 1,4 DB (dikloro benzen) eşdeğeri olarak ifade edilmektedir. Çin'deki spinel üretimi, %43 ile yüzey sularına olan toksisiteye en fazla etki eden proses olarak belirlenmiştir (Şekil 9.11). Bunu %21 etki ile deniz suyu sinter manyezit üretimleri takip etmektedir. Florürlü gaz salınımı deniz sularına olan toksik etkiye neden olurken, vanadyum, nikel, bakır, berilyum ve arsenik suya salınan emisyonlar olarak belirlenmiştir.



Şekil 9.11. Yüzeysel suları toksisitesine etki eden proseslerin dağılımı

Kara ekosistemine olan toksik etki (TEP),g 1,4 DB (dikloro benzen) eşdeğeri olarak ifade edilmektedir. Deniz suyu sinter manyezit üretimleri kara ekosistemine olan toksik etkiye en yüksek düzeyde (Sinter manyezit-1 için %46,5, sinter manyezit-2 için %46,4) neden olan proses olarak dikkat çekmektedir (Şekil 9.12.). Bu etkiye, deniz suyu sinter manyezit üretimi sırasında kullanılan hammaddenin doğadan elde edilmesinin neden olduğu düşünülmektedir. Refrakter üretimi sırasındaki şekillendirme ve kırma-öğütme aşamalarında kullanılan elektriğin iletilmesi, dağıtılması gibi işlemler sonucu oluşan krom(VI), berilyum, formaldehit gibi kirleticilerin neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 9.12. Kara ekosistemi toksisitesine etki eden proseslerin dağılımı

9.2. Hassasiyet Analizi

Çalışmada refrakter tuğla üretiminin LCA sonuçları, refrakter malzemeler için mevcut en iyi teknikler (BAT) verileri ile desteklenerek tekrar hesaplanmıştır. EIPPCB dokümanına göre manyezit içerikli refrakter tuğlaların üretimi için enerji tüketim verileri Çizelge 9.3’ te verilmiştir.

Çizelge 9.3. Manyezit refrakter tuğla üretimi için enerji tüketim verileri (EIPPCB, 2007a).

Proses	MJ/kg
Hammadde Hazırlama, Eleme	0,35-0,50
Dozajlama, Harman Hazırlama	0,045-0,070
Şekillendirme	0,13-0,20
Kurutma, Pişirme	3,0-6,3
Paketleme	0,08

Kurutma ve pişirme için minimum enerji tüketimi 3-6,3 MJ/kg olarak verilmektedir. Refrakter üretim tesisinde pişirme prosesi için harcanan enerji %8,4 azaltıldığında verilen minimum enerji değerine ulaşılmaktadır (3 MJ/kg).

Farklı refrakter ürünler için olması gereken baca gazı değerleri Çizelge 9.4’te verilmiştir.

Çizelge 9.4. Farklı refrakter ürünler için baca gazı değerleri (EIPPCB, 2007a).

Emisyon Bileşeni	Konsantrasyon (mg/m³)		
	Manyezit	Alümina	Silika
Ürün			
Toz	8-35	5-80	10-25
NO ₂	110-470	30-250	5-100
SO ₂	90-580	10-430	20-150
CO	12-180	30-150	10-50
HF	0,5-1,5	5-50	1-3

Refrakter üretim tesisinde yapılan baca gazı analiz raporu ile manyezit içerikli refrakter ürünler için minimum emisyon bileşenleri karşılaştırılmış ve CO, SO₂ ve HF bileşenleri için refrakter üretim tesisi değerleri tekrar hesaplanmıştır. Buna göre refrakter üretim tesisi için hesaplanan ideal emisyon verileri Çizelge 9.5' te verilmiştir.

Çizelge 9.5. Manyezit refrakter tuğla için yeniden hesaplanan emisyon verileri.

Emisyon Bileşeni	Miktar (kg)
Ürün	Manyezit
CO	3,96
SO ₂	29,7
HF	0,194

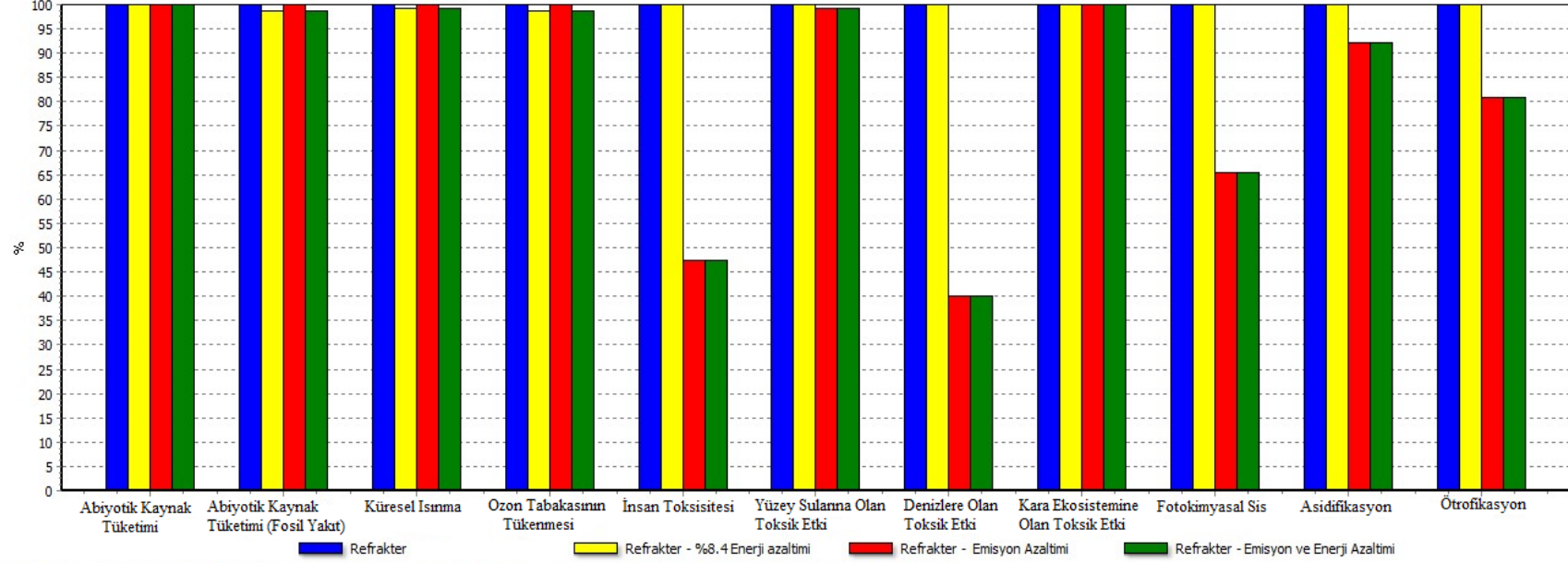
Elde edilen veriler ışığında, refrakter üretim tesisinde, manyezit refrakter pişirme prosesi için harcanan enerji %8,4 azaltıldığında, emisyon değerleri düşürüldüğünde ve bu etkiler birlikte değerlendirildiğinde elde edilen sonuçlar CML IA yöntemine karşılaştırılmış ve etki kategorilerine göre karakterizasyon grafiği Şekil 9.13' te, toplu karakterizasyon sonuçları Çizelge 9.6' da verilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde %8,4 lük bir enerji azaltımı bazı etki kategorileri belli bir ölçüde azaltırken emisyon ve enerjinin birlikte azaltımı özellikle insan toksisitesi, denizlere olan toksik etki, fotokimyasal sis, asidifikasyonda ve ötrofikasyon etki kategorilerinde gözle görülür bir azalmaya neden olmuştur.

İnsan toksisitesi önemli ölçüde HF bileşenine bağlı olduğu için bu bileşenin miktarının azaltılması bu etki kategorisinde %53 oranında düşmeye neden olmuştur. Florürlü gaz salınımının azaltılması denizlere olan toksik etkiyi %60 oranında azaltmıştır.

SO₂ bileşenin miktarının değişmesi özellikle asidifikasyon ve ötrofikasyona etki ederken bu bileşenin azaltılması sırasıyla asidifikasyonda %8, ötrofikasyon etkisinde ise %19'luk bir iyileştirme sağlamıştır.

Pişirme prosesi sırasında ortaya çıkan kükürt dioksit SO₂ emisyonları fotokimyasal sise neden olurken bu emisyon bileşenlerinin azaltılması fotokimyasal sis etkisinde %35 oranında bir iyileştirme sağlamaktadır.



Comparing 1E3 kg 'Refrakter', 1E3 kg 'Refrakter - %8.4 Enerji azaltımı', 1E3 kg 'Refrakter - Emisyon Azaltımı' and 1E3 kg 'Refrakter - Emisyon ve Enerji Azaltımı';
Method: CML-IA baseline V3.00 / EU25 / Characterization / Excluding infrastructure processes / Excluding long-term emissions

Şekil 9.13. 1 ton refrakter tuğla üretimi için hassasiyet analizi sonuçları

Çizelge 9.6. 1 ton refrakter tuğla üretimi için hassasiyet analizi toplu sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	Refrakter	Refrakter (%8,4 Enerji Azaltımı)	Refrakter (Emisyon Azaltımı)	Refrakter (Emisyon ve Enerji Azaltımı)
Abiyotik kaynakların tükenmesi	kg Sb ed	1,42E-05	1,42E-05	1,42E-05	1,42E-05
Abiyotik kaynakların tükenmesi (fosil yakıtlar)	MJ	2,40E+04	2,37E+04	2,40E+04	2,37E+04
Asidifikasyon	kg SO ₂ ed	4,70E+01	4,70E+01	4,33E+01	4,33E+01
Denizlere olan toksik etki	kg 1,4-DB ed	2,03E+07	2,03E+07	8,15E+06	8,15E+06
Fotokimyasal sis	kg C ₂ H ₄ ed	3,25E+00	3,25E+00	2,13E+00	2,13E+00
İnsanlar üzerine olan toksik etki	kg 1,4-DB ed	1,63E+03	1,63E+03	7,69E+02	7,69E+02
Kara ekosistemine olan toksik etki	kg 1,4-DB ed	7,79E-01	7,79E-01	7,78E-01	7,78E-01
Küresel ısınma (GWP100a)	kg CO ₂ ed	2,85E+03	2,83E+03	2,85E+03	2,83E+03
Ozon tabakası tükenmesi (ODP)	kg CFC-11 ed	1,88E-04	1,85E-04	1,88E-04	1,85E-04
Ötrofikasyon	kg PO ₄ ed	1,61E+00	1,61E+00	1,30E+00	1,30E+00
Yüzey sularına olan toksik etki	kg 1,4-DB ed	2,10E+02	2,10E+02	2,08E+02	2,08E+02

9.3. Refrakter Tuğla Üretimine LCC Sonuçları ve Değerlendirilmesi

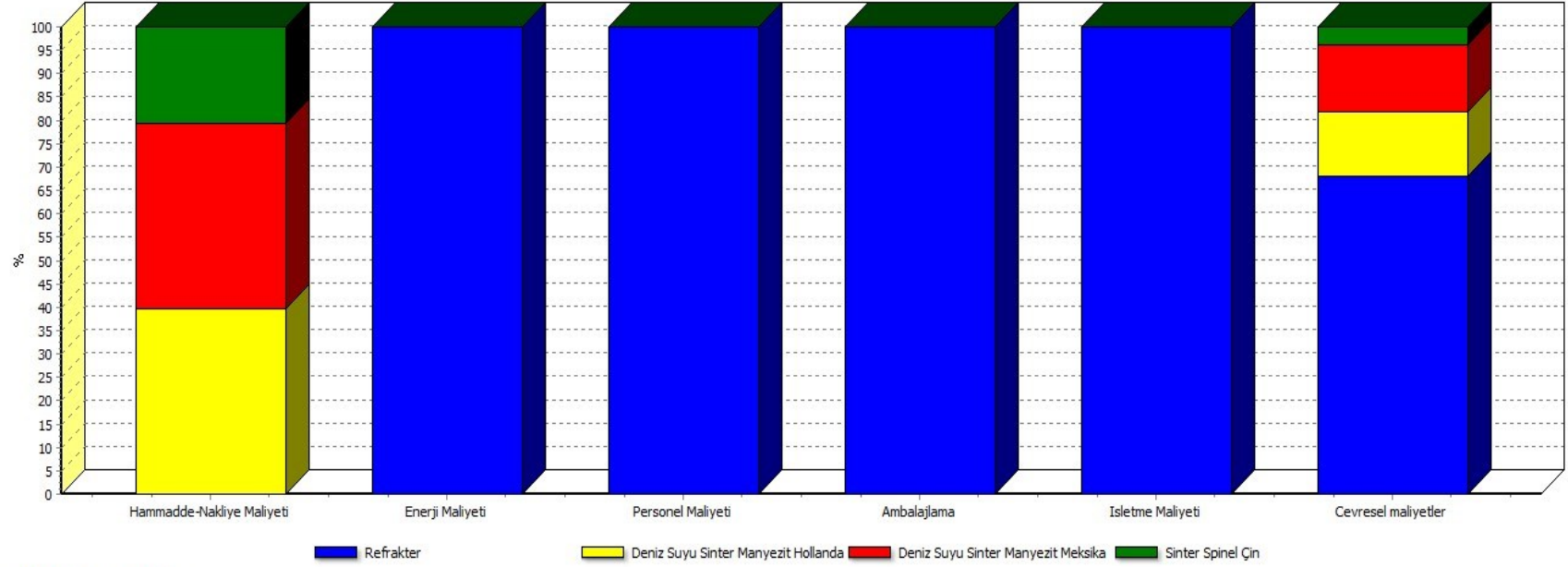
1 ton manyezit spinel refrakter tuğla üretimi içsel maliyetler (Hammadde ve nakliye, enerji, personel, ambalajlama) ve dışsal maliyetler; (asidifikasyon, fotokimyasal sis, ozon tabakasının tükenmesi, küresel ısınma, ötrofikasyon, toksisite olarak ele alınmış ve yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesi buna göre yapılmıştır.

1 ton manyezit spinel refrakter tuğla üretiminin yaşam döngüsü maliyeti karakterizasyon sonuçları Çizelge 9.7’de ve karakterizasyon grafiği Şekil 9.14’te, maliyet bileşenlerinin dağılımları ise Şekil 9.15’te verilmiştir. Bu sonuçlara göre, toplam maliyetin yaklaşık %60’ını çevresel maliyetler, %33’ünü ise hammadde ve nakliye maliyetleri oluşturmaktadır. Hammadde ve nakliye maliyet kalemi incelendiğinde, %79’luk kısmın deniz suyu sinter manyezite, %21’inin ise sinter spinele ait olduğu görülmektedir.

Çizelge 9.7. 1 ton manyezit-spinel refrakter tuğla üretiminin LCC karakterizasyon sonuçları

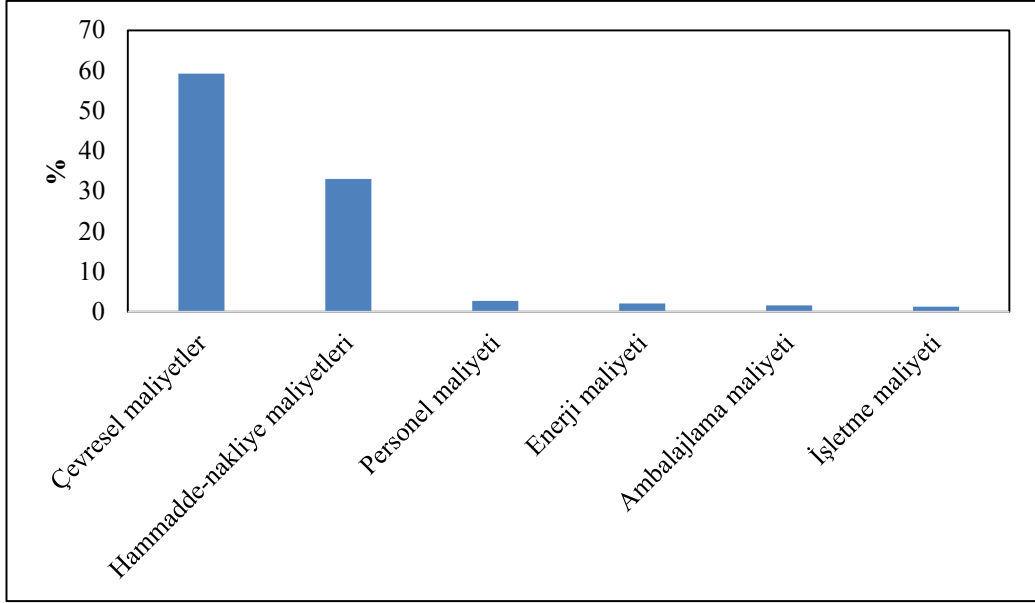
Maliyet Kategorileri		Deniz Suyu Sinter Manyezit - Meksika	Deniz Suyu Sinter Manyezit - Hollanda	Sinter Spinel	Refrakter Tuğla Üretimi
İçsel Maliyetler (\$)	Hammadde ve Nakliye M.	298	298	155	751
	Enerji M.	-	-	-	47
	Personel M.	-	-	-	63
	Ambalajlama M.	-	-	-	36
	Bakım-Onarım M.	-	-	-	30
Dışsal Maliyetler (\$)	Çevresel M.	194	185	52	1348*
Toplam Maliyet (\$)		492	483	207	2275

*917 \$ refrakter tuğlanın üretim sürecinden kaynaklanmaktadır.



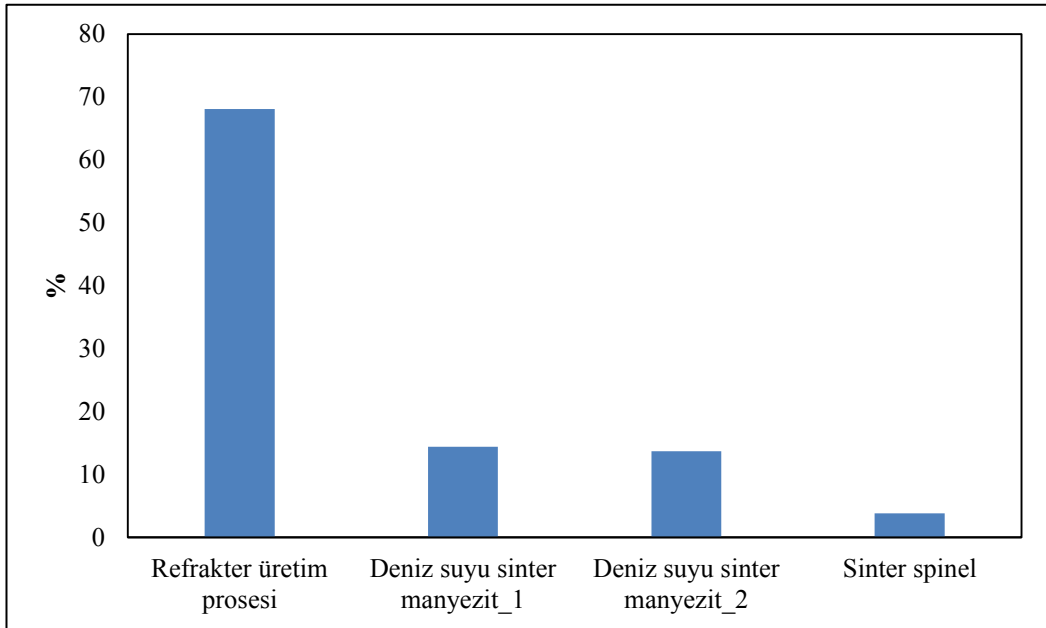
Analyzing 1E3 kg 'Refrakter';
Method: LCC / LCC / Characterization / Excluding infrastructure processes

Şekil 9.14. 1 ton refrakter tuğla üretimi için LCC karakterizasyon sonuçları



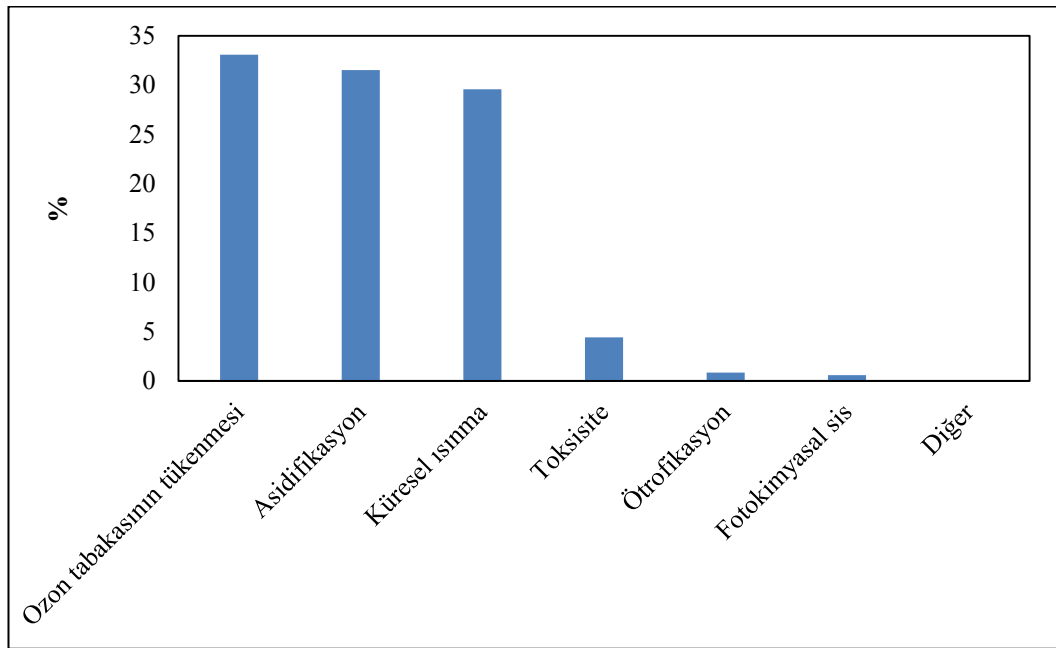
Şekil 9.15. Manyezit – spinel refrakter tuğlanın maliyet bileşenlerinin dağılımı

En büyük maliyet kalemini oluşturan çevresel maliyetler incelendiğinde (Şekil 9.16), refrakter üretimi % 68’lik payla en çok etki yapan alt kategori olarak dikkat çekmektedir. Bunu, deniz suyu sinter manyezit üretimi takip etmektedir. Tesisin en önemli hammaddesi olan deniz suyu sinter manyezit yurtdışından iki farklı tesisten gelmekte olup, bu tesislerin (Manyezit-1 için %14,4, Manyezit-2 için %13,7) çevresel maliyetlere etkisi hemen hemen aynıdır.



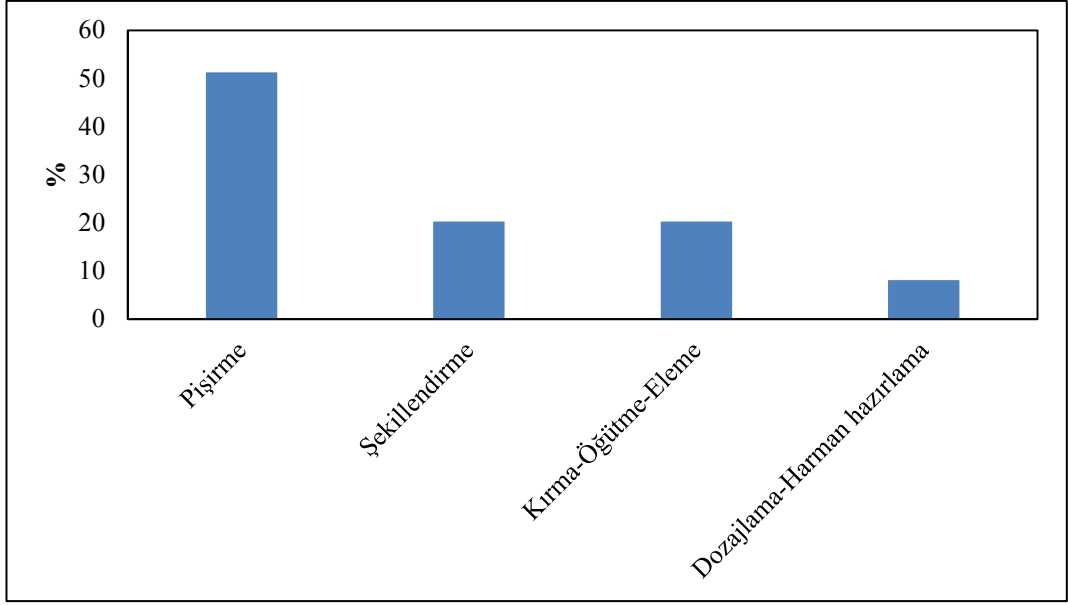
Şekil 9.16. Çevresel maliyetlerin proseslere göre dağılımı

1 ton manyezit-spinel refrakter tuğla üretiminin çevresel maliyetleri, etki kategorileri bazında incelendiğinde (Şekil 9.17), en fazla maliyetin ozon tabakasının tükenmesinden kaynaklandığı görülmektedir. Bunun nedeni, deniz suyu sinter manyezit üretiminde ortaya çıkan halojenli gazlardır. Asidifikasyondan kaynaklanan maliyetlerde kurutma-pişirme prosesi, oluşan emisyonlar nedeniyle, %83 oranında etkili olmuştur. Küresel ısınma etkisi özellikle yüksek sıcaklıklarda uzun süren pişirme prosesinde oluşan karbondioksit emisyonları nedeniyle oluşmuştur. Toksikite değerlerine en fazla etki eden elementler ise civa, nikel ve kadmiyum olmuştur.



Şekil 9.17. Etki kategorileri bazında çevresel maliyetler

Enerji maliyetleri üretim prosesi bazında incelendiğinde, en büyük enerji maliyetinin refrakter tuğlayı pişirme sırasında harcanan doğalgazdan kaynaklandığı görülmektedir (Şekil 9.18).



Şekil 9.18. Refrakter tuğla üretiminde harcanan enerjinin proseslere göre dağılımı

10. SONUÇ, TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Çalışmada yapılmış LCA analizine göre refrakter tuğla üretiminin içindeki kurutma ve sinterleme proseslerinden dolayı enerji yoğun bir üretim olması çevreye olan etkilerinden de anlaşılmıştır. Yapılan çalışmada sistem sınırları beşikten kapıya kadar alınmış, refrakter tuğla üretiminde kullanılan hammaddelerin de üretimi LCA hesaplamalarına dahil edilmiştir. Bu kapsamda, incelenen bütün etki kategorileri bazında, iki farklı kaynaktan alınan deniz suyu sinter manyezit üretimleri önemli etkiye sahiptir. Öyle ki hammadde üretimlerinin çevreye olan etkilerinin refrakter tuğlanın üretiminden çok daha fazla olduğu belirlenmiştir. İki farklı tesisten alınan deniz suyu sinter manyezit hammaddeleri karşılaştırıldığında, Hollanda'da üretilen deniz suyu sinter manyezitin daha iyi çevresel performans sergilediği görülmüştür. Hammadde kaynağının uzak olması deniz ulaşımının uzun sürmesine ve dolayısıyla çevresel etkilerin artmasına neden olmuştur. Refrakter tuğlanın belirli bir kalitede olması gerektiği ve hammaddenin değiştirilemeyeceği göz önünde bulundurulursa, refrakter tuğla üretim tesisinin hammadde kaynağı olarak Hollanda'yı tercih etmesi refrakter tuğla üretimin daha iyi bir çevresel performans sergileyeceğini göstermektedir.

Refrakter tuğla üretimi sırasındaki en önemli çevresel etkilerin de, hammadde kullanımı ve pişirme prosesinden dolayı, abiyotik kaynakların tükenmesi ve küresel ısınma kategorilerinde olduğu gözlenmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde, yapı malzemeleri üretiminde kurutma ve pişirme prosesleri ve hammaddeler içerisindeki uçucu kirleticilerin yüksek miktarda olmasının başlıca emisyon kaynakları olduğu vurgulanmıştır. Tek pirişim sırlı seramik karo (Bovea ve ark., 2010), kaplama malzemesi olarak üretilen seramik yer karosu (Nicoletti et al., 2002), tuğla (Kumbhar ve ark. 2014) gibi yapı malzemelerinde gerçekleştirilen çalışmalarda bu tezdekine benzer şekilde fosil yakıt kullanımından dolayı oluşan küresel ısınmanın en önemli çevresel etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Çalışmada yapılmış olan LCC analizine göre, 1 ton refrakter tuğla üretim maliyeti, çevresel maliyetler de göz önüne alındığında 1093 \$ olarak belirlenmiştir. Çevresel maliyetler, refrakter üretim prosesinde özellikle havaya salınan emisyonlar nedeni ile önemli yer tutmakta olup, toplam maliyetin yaklaşık

%60'ını oluşturmaktadır. Çevresel maliyetlerin proseslere göre dağılımı incelendiğinde, refrakter üretim prosesi ve deniz suyu sinter manyezit üretimlerinin ana çevresel maliyet kaynaklarının oluşturdukları görülmektedir. En yüksek çevresel maliyet olan ozon tabakasının tükenmesi, özellikle deniz suyu sinter manyezit üretiminden kaynaklanmakta olup, oluşan asidifikasyon ve küresel ısınma maliyetleri ise refrakter üretimi sırasında ortaya çıkan hava emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Refrakter tuğla üretimi sırasında harcanan enerjinin %52'sinin pişirme için kullanıldığı göz önünde bulundurulursa, enerji yoğun bir üretim olan refrakter tuğla üretimi ile ilgili stratejilerin belirlenmesinde öncelikle çevresel faktörler göz önüne bulundurularak üretim prosesi ile ilgili yapılacak iyileştirmelerin hem havaya salınan emisyonların azaltılmasına hem de enerji maliyetlerinde kazanımlara neden olacağı muhakkaktır. Hammade fiyatlarının ve nakliye maliyetlerinin düşürülmesi de tesise önemli faydalar sağlayabilecek diğer parametrelerdir. Bunun yanı sıra deniz suyu sinter manyezit-2'nin çevresel performansının daha iyi olduğu göz önüne alınırsa hammaddenin tamamıyla tek bir kaynaktan alınmasının firmaya çevresel maliyet açısından da fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak, LCA ve LCC çalışmaları birlikte değerlendirildiğinde, deniz suyu sinter manyezit-2'nin çevresel performansının daha iyi olduğu göz önüne alınırsa hammaddenin tamamıyla tek bir kaynaktan alınmasının firmaya hem çevresel hem de ekonomik olarak fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Bunun yanı sıra tesisin çevresel performansı malzemelerin yeniden kullanımı ya da geri kazanımı ve enerji tüketiminin azaltılmasıyla artırılacağı sonucuna varılırken, refrakter tuğla üretimi prosesinin sürdürülebilirlik stratejilerinin belirlenmesinde, içsel maliyetlerin yanı sıra dışsal maliyetlerin de mutlaka göz önüne alınması gerektiği ortaya konulmuştur.

Hassasiyet analizi sonuçlarından elde edilen veriler değerlendirildiğinde tesisin olası emisyonlarını düşürmek amacıyla yakıt değişimi veya mümkünse daha düşük sıcaklıklarda sinterleme için pişirme sürecini tekrar gözden geçirmesi bunun yanı sıra, üretimin her sürecinde kullanılan cihazların enerji kayıplarını gözden geçirmesi ve mümkünse eski cihazları yenileri ile değiştirilmesi gibi tedbirler olası çevresel etkilerin azaltılmasını sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdul-Wahab, S.A., Al-Rawas, G., Ali, S., Al-Dhamri, H. (2015), *Impact of the addition of oil-based mud on carbon dioxide emissions in a cement plant*, Journal of Cleaner Production, Article in Press, 1-12.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Demertzi, M., Arroja, L. (2015), *Contribution to the development of product category rules for ceramic bricks*, Journal of Cleaner Production, 92, 206-215.
- Anonim (2014), *Türkiye yapı malzemeleri çevresel ürün beyanları*, <http://www.epdyapi.org/#!epd-nedir/cm0g>
- Anonymous (2011), *Welcome to the NIST Chemistry WebBook*, <http://webbook.nist.gov>
- Asiedu, Y., ve Gu, P. (1998), *Product life cycle cost analysis: State of art review*, International Journal of Production Research 36, 883-908.
- Aytok A. (2006), *Ömür devri maliyet analizi modelinin işletmelerde karar almada kullanılabilirliğine yönelik ampirik çalışma*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kütahya.
- Balpetek, F.G., Alay, E., Özdoğan, E. (2012), *Sürdürülebilir kalkınma için yaşam döngüsü değerlendirmesi ve tekstil sanayi*, Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6, 37-49.
- Banar, M., Çokaygil, Z. (2009), *Seramik yer karolarının çevresel etkilerinin yaşam döngüsü analizi yöntemiyle değerlendirilmesi*, Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu (TÜRKAY 2009), 175-182, İstanbul.
- Bayraktar F.T. (2010), *Türkiye’de yapı malzemesi yaşam döngüsü değerlendirmesi için bir sistem önerisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Blengini, G.A. (2009) *Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: a case study in Turin, Italy*, Building and Environment, 44, 319-330.
- Bovea K. D., Diaz-Albo E., Gallardo A., Colomer F.J., Serrano J. (2010), *Environmental performance of ceramic tiles: Improvement proposals*, Materials and Design, 31, 35-41.

- Chou, J.S., Yeh, K.C. (2015), *Life cycle carbon dioxide emissions simulation and environmental cost analysis for building construction*, Journal of Cleaner Production , 101, 137-147.
- Cole, R.J. (1998), *Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems*, Building and Environment, 34, 335-348.
- CPCB, Central Pollution Control Board, (2007), *Comprehensive Industry Document for Refractory Industries, Ministry of Environment&Forests, Comprehensive Industry Document Series: COINDS*, 68.
- Çalık, M. (2014), *Üretim açısından ömür devri maliyet modelinin analizi: Yat ve gezinti tekneleri imalatında uygulanabilirliğine yönelik bir model önerisi*, Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kütahya.
- Çamur C. (2010), *Isı yalıtım malzemelerinin yaşam döngüsü değerlendirme yöntemiyle çevresel etkilerinin değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çokaygil, Z. (2005), *Atık yönetim planlamasında yaşam döngüsü analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- EIPPCB, (2007a), *Reference document on best available techniques in the ceramic manufacturing industry*, European Commission.
- EIPPCB, (2007b), *Reference document on best available techniques in large volume inorganic chemicals – solids and the others industry*, European Commission.
- EMEP/EEA, (2013), *Air pollutant emission inventory guide book*, European Environment Agency.
- EPA, (2006), *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*, EPA/600/R-06/060, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio, USA.
- Eren, Ö. (2011), *Çukurova bölgesinde tatlı sorgum (Sorghum Bicolor(L.) Moench) üretiminde yaşam döngüsü enerji ve çevresel etki analizi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

- Feiz, R., Ammenberg, J., Baas, L., Eklund, M., Helgstrand, A. (2015), *Improving the CO₂ performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry*, Journal of Cleaner Production, 98, 272-281.
- Ferreira G., Lopez-Sabiron A.M., Aranda J., Maniar-Toledo M.D. (2014), *Environmental analysis for identifying challenges to recover used reinforced refractories in industrial furnaces*, Journal of Cleaner Production, 1-12.
- Genç, Y. (2009), *Alümina esaslı şekilli refrakterlerde katkı malzemelerinin alüminyum penetrasyonuna etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gonzalez, M.J., García Navarro, J. (2006), *Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials: practical case study of three houses of low environmental impact*, Building and Environment, 41, 902-909.
- Gruver P.S. (2001), *Magnesia spinel refractory brick*, US Patent No: 6261983 B1.
- Gustavsson, L., Joelsson, A., Sathre, R. (2010), *Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building*, Energy and Buildings, 42, 230-242.
- Gültekin A., B. (2006), *Yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi kapsamında yapı ürünlerinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesine yönelik bir model önerisi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Hunt, R.G., Franklin, W.E. (1996), *LCA – How it came about personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA*, International Journal of Life Cycle Assessment, 1, 4-7.
- Ibanez-Fores, V., Bovea, M.D., Simo, A. (2011), *Life cycle assessment of ceramic tiles. Environmental and statistical analysis*, 16, 916-928.
- Islam, H., Jollands, M., Setunge, S. (2015), *Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings – A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42, 129-140.

- Işın, Z. (2009), *Ömür devri maliyet analizi yaklaşımı ve savunma projelerine uygulamaları*, SSM 4, 39-43.
- Jensen, A.A., Hoffman, L., Moller, B., Schmit, A., Christiansen, K., Elkington, J., Dijk, F.V. (1997), *Life cycle assessment, a guide to approaches, experiences and information sources*, European Environment Agency, 13-14, 51-71.
- Jiménez-González, C., Kim, S., Overcash, M. (2000), *Methodology for developing gate-to-gate Life cycle inventory information*, The International Journal of Life Cycle Assessment, 5, 153-159.
- Kaya, K. (2014), *Çimento döner fırınlarında kullanılan bazik refrakter tuğlaların kontrol parametrelerinin karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
- Koroneos C., Dompros A. (2007), *Environmental assessment of brick production in Greece*, *Building and Environment*, 42, 2114–2123.
- Kumbhar S., Kulkarni N., Rao A.B., Rao B. (2014), *Environmental Life Cycle Assessment of Traditional Bricks in Western Maharashtra*, *Energy Procedia*, 54, 260-269.
- Kyokai, T., G. (1998), *Refractories Handbook*, The technical association of refractories, Japan.
- Li, J., Zhang, Y., Shao, S., Zhang, S. (2015), *Comparative life cycle assessment of conventional and new fused magnesia production*, *Journal of Cleaner Production*, 91, 170-179.
- Morvay, Z., Gvozdenac, D. (2008), *Fundamentals for analysis and calculation of energy and environmental performance*, *Applied Industrial Energy and Environmental Management*, Part III.
- Nebel, B. (2006), *White paper-life cycle assesment and the building and construction industry*, Beacon Pathway Limited, Auckland, 5-9.
- Nicoletti G.M., Notarnicola B., Tassielli G. (2002), *Comperative life cycle assessment of flooring materials: ceramic versus marble tiles*, *Journal of Cleaner Production*, 10, 283-296.

- Ölmez G. (2011), *Comparison of sub-processes and final products of iron and steel production with life cycle assessment*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özdemir, A. (2012), *Türkiye' de demiryolu ulaşımının yaşam döngüsü analizi ve yaşam döngüsü maliyeti yöntemleri ile değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Paulsen J. (2001), *Life cycle assessment for building products*, Doctoral thesis, Kungl Tekniska Högskolan, Byggnadsmaterial, Stockholm.
- Pini M., Ferrari, A.M., Gamberini, R., Neri, P., Rimini, B. (2014), *Life cycle assessment of a large, thin ceramic tile with advantageous technological properties*, Int. Life Cycle Assessment, 19, 1567-1580.
- PRE (2011), Annual Report, The European Refractories Producers Federation.
- PRE (2013), Annual Report, The European Refractories Producers Federation.
- Routschka, G. (1997), *Pocket manual refractory materials*, Vulkan-Verlag, Essen/Germany.
- SEREF (2014), *2011-2014 dönemi faaliyet raporu*, Teknik Seramik ve Refrakter Üreticileri Derneği.
- Siegenthaler, C.P., Braunschweig, A., Oeterli, G., Furter, S. (2005), *LCA software guide 2005 market overview-software potraits*, No: Zurich, İsviçre.
- Simoës, C.L., Costa Pinto, L.M., Bernardo, C.A. (2013), *Environmental and economic assessment of a road safety product made with virgin and recycled HDPE: a comparative study*, Journal of Environmental Management, 114, 209-215.
- Sentman, S.D., Del Percio, S.T., Koerner, P. (2008), *A climate for change: green building policies, programs, and incentives*, Journal of Green Building, 3, 46-63.
- Şentürk H. (2008), *Yapı ürünlerinin çevresel etkileri: Bütünleşik ürün politikası bağlamında bir irdeleme*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Türkiye seramik sektörü strateji belgesi ve eylem planı 2012-2016, (2012), Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Genel Müdürlüğü.

- Trinius, W. (1999), *Environmental assessment in building and construction - goal and scope definition as key to methodology choices*, Ph.D Thesis, Kungliga Tekniska Hogskolan, Stockholm, Sweden.
- TSE (2002), *Çevre etiketleri ve beyanları – genel prensipler*, TS EN ISO 14020, Ankara, 1 – 7.
- TSE (2007), *Çevre yönetimi - hayat boyu değerlendirme - prensipler ve çerçeve*, TS EN ISO 14040, Ankara, 1 – 26.
- TSE (2007), *Çevre yönetimi - hayat boyu değerlendirme – gerekler ve kılavuz*, TS EN ISO 14044, Ankara, 1 – 45.
- Valderrama, C., Granados, R., Cortina, J.L., Gasol, C.M., Guillem M., Josa, A. (2012), *Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study*, Journal of Cleaner Production, 25, 60-67.
- Woodward, D.G. (1997), *Life cycle costing-theory, information acquisition and application*, International Journal of Project Management 15, 335-344.
- Zhang, X., Platten, A., Shen, L. (2011), *Green property development practice in China: costs and barriers*, Building and Environment, 46, 2153-2160.

Ek-1 Yaşam Döngüsü Analizi Envanteri -1

Çizelge Ek-1.1 Refrakter üretim tesisinin sinterleme sırasındaki gaz emisyonları

Kirletici	Miktar	Toplam Emisyon İzinleri	Birim
P.M.	0,0302	10	kg/saat
CO	3,237	500	kg/saat
SO ₂	2,465	60	kg/saat
NOx	0,183	40	kg/saat
4-klorotoluen	0,000921	30	kg/saat
2-klorotoluen	0,000914		kg/saat
1,1,2,2-tetrakloroetan	0,020370		kg/saat
Benzen	0,005149		kg/saat
Toluen	0,007916		kg/saat
P+m ksilen*	0,001504		kg/saat
Etilbenzen	0,001496		kg/saat
Stiren	0,000698		kg/saat
O-ksilen	0,000954		kg/saat
İzopropilbenzen (Kümen)	0,000083		kg/saat
n-propilbenzen	0,000215		kg/saat
Trietilbenzen	0,000895		kg/saat
Bütilbenzen	0,000936		kg/saat
4-İzopropiltoluen**	0,000264		kg/saat
Naftalin	0,000123		kg/saat
Arsenik	0,0729		
Krom	0,1102		g/saat
Kadmiyum	0,0044	10	g/saat
Bakır	0,1248		g/saat
Mangan	0,0189		g/saat
Nikel	0,0038		g/saat
Kurşun	0,0970	500	g/saat
Titanyum	0,2011		g/saat

*Değerin yarısının p, diğer yarısının m olduğu kabul edilmiştir.

** 4-Isopropyltoluen, kullanılan programda bulunamadığı için eklenememiştir.

Çizelge Ek-1.2 Hollanda deniz suyu sinter manyezit üretim tesisi atık su deşarjları

	Mg ⁺²	Ca ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	B ⁺³	Cr	Zn
Derişim (mg/L)	-	-	-	-	-	-	2,5	0,064	0,032
Yük (kg/yıl)	-	-	-	-	-	-	-	213,5	105,5
Derişim (g/L)	0,33	21,11	0,54	2,21	41,99	0,35	-	-	-
Yük (ton/yıl)	1099	70285	1785	7359	139807	1163	8,6	-	-
g*							50	1,28	0,64
kg*	6,6	422,2	10,8	44,2	839,8	7	-	-	-
*B =2,5 mg/L x 20 m ³ /1 ton x (1000 L / 1 m ³) x (1g /1000 mg) =50 g									

g* (1 ton deniz suyu sinter manyezit üretimi için)

kg* (1 ton deniz suyu sinter manyezit üretimi için)

* B için örnek hesaplama (1 ton üretim için 20 m³ su tüketimi varsayımıyla)

Ek-2 Meksika' da üretilen Deniz Suyu Sinter Manyezit için yapılan hesaplamalar

Deniz suyu sinter manyezit üretiminden çıkan CO₂ miktarı: 570 kg

(Hollanda'da üretilen deniz suyu sinter manyezit üretim verileri ile aynı kabul edilmiştir.)

Ek-3 Sinter spinel üretimi için yapılan hesaplamalar

Sinter spinel üretimi içindeki enerji verileri elde edilemediği ve aynı zamanda literatürde net bir bilgi bulunamadığından dolayı, termodinamik olarak sinter spinel oluşumu için gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Bunun için National Institute of Standards and Technology (NIST) veri tabanından amprik olarak oluşturulmuş formüller ve tablolar kullanılmıştır (Anonymous, 2011).

$$C_p^\circ = A + B \cdot t + C \cdot t^2 + D \cdot t^3 + E/t^2$$

$$H^\circ - H^\circ_{298.15} = A \cdot t + B \cdot t^2/2 + C \cdot t^3/3 + D \cdot t^4/4 - E/t + F - H$$

$$S^\circ = A \cdot \ln(t) + B \cdot t + C \cdot t^2/2 + D \cdot t^3/3 - E/(2 \cdot t^2) + G$$

C_p = ısı kapasitesi (J/mol*K)

H° = standart entalpi (kJ/mol)

S° = standart entropi (J/mol*K)

t = sıcaklık (K) / 1000

Çizelge Ek-3.1. Spinel üretimi için gereken standart oluşum entalpileri (EIPPCB, 2007b)

Bileşen	Standart oluşum entalpisi (kJ/mol)
MgCO ₃	-1111,69
MgO	-601,24
CO ₂	-393,52
Al ₂ O ₃	-1675,7
MgAl ₂ O ₄	-2299,11

Çizelge Ek-3.2. MgO ısı kapasitesi katsayıları (EIPPCB, 2007b)

Isı Kapasitesi (MgO)(K)	298-3105
A	47,25995
B	5,681621
C	-0,872665
D	0,104300
E	-1,053955
F	-619,1316
G	76,46176
H	-601,2408

$$\text{MgO } \Delta H (298\text{K} - 2023\text{K}) = H^\circ - H^\circ_{298,15} = A*t + B*t^2/2 + C*t^3/3 + D*t^4/4 - E/t + F - H$$

t = sıcaklık (K) / 1000

$$= 47.25995*(2023/1000-298/1000) + 5,681621*[(2023/1000)^2/2-(298/1000)^2/2] + (-0,872665)*[(2023/1000)^3/3-(298/1000)^3/3] + (0,104300)*[(2023/1000)^4/4-(298/1000)^4/4] + [(-1,053955) / (2023/1000) - (-1,053955) / (298/1000)] + (-619,1316) - (-601,2408) = 70 \text{ kJ/mol}$$

Çizelge Ek-3.3. MgCO₃ ısı kapasitesi katsayıları (EIPPCB, 2007b)

Isı kapasitesi(MgCO₃)(K)	298-1000
A	44,93700
B	149,8085
C	-74,18274
D	11,97670
E	-0,629261
F	-1133,224
G	75,24213
H	-1111,689

Çizelge Ek-3.4. CO₂ ısı kapasitesi katsayıları (EIPPCB, 2007b)

Isı kapasitesi(CO ₂)(K)	298-1200	1200-6000
A	24,99735	58,16639
B	55,18696	2,720074
C	-33,69137	-0,492289
D	7,948387	0,038844
E	-0,136638	-6,447293
F	-403,6075	-425,9186
G	228,2431	263,6125
H	-393,5224	-393,5224

Çizelge Ek-3.5. MgAl₂O₄ ısı kapasitesi katsayıları (EIPPCB, 2007b)

Isı kapasitesi(MgAl ₂ O ₄)(K)	298-2408
A	146,5551
B	35,91295
C	-0,183978
D	0,031409
E	-3,659941
F	-2356,684
G	234,7416
H	-2299,112

1. reaksiyon (Kalsinasyon) için;



$$\Delta H_{298} = [(-601,24) + (-393,52)] - [-1111,69]$$

$$= 116.93 \text{ kJ/mol}$$

$$\text{MgO} \frac{1623}{298} = 47,996 \text{ kJ/mol}$$

$$\text{CO}_2 \frac{1200}{298} + \text{CO}_2 \frac{1623}{1200} = 48,7 \text{ kJ/mol}$$

2. reaksiyon (Sinterleme) için;



$$\Delta H_{298} = (-2299,11) - [(-601,24) - (-1675,69)]$$

$$= -22,18 \text{ kJ/mol}$$

$$\text{MgO} \frac{2023}{298} = 70 \text{ kJ/mol}$$

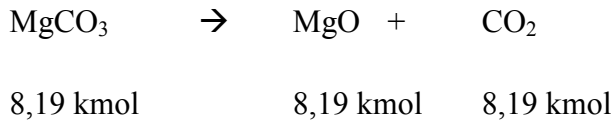
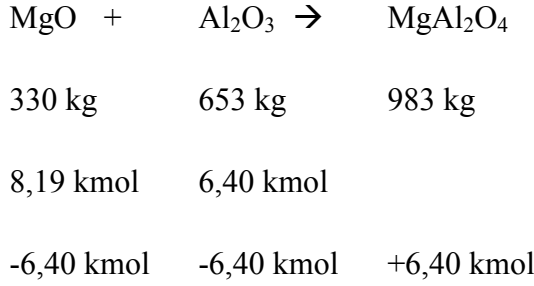
$$\text{MgAl}_2\text{O}_4 \frac{2023}{298} = 256,3 \text{ kJ/mol}$$

Gereken Enerji:

Üretimde kullanılan spinel hammaddesinin; %65,3'ü Al_2O_3 , %33'ü ise MgO olduğu öğrenilmiştir. Safsızlıklar hesaba katılmamıştır.

Çizelge Ek-3.6. Spinel üretimindeki maddelerin molekül ağırlıkları

Hammadde	Molekül Ağırlığı (kg/kmol)
MgO	40,3
Al_2O_3	102
MgAl_2O_4	142,3



Kalsinasyon için gerekli enerji;

$$116,93 \text{ kJ/mol} \times 1000 \text{ mol/1 kmol} \times 8,19 \text{ kmol} = 957.657 \text{ kJ}$$

$$47,996 \text{ kJ/mol} \times 1000 \text{ mol/1 kmol} \times 8,19 \text{ kmol} = 393.087 \text{ kJ}$$

$$48,7 \text{ kJ/mol} \times 1000 \text{ mol/1 kmol} \times 8,19 \text{ kmol} = 398.853 \text{ kJ}$$

Toplam: 1.749.597 kJ

Sinterleme için gerekli enerji;

$$-22,18 \text{ kJ/mol} \times 1000 \text{ mol/1 kmol} \times 6,40 \text{ kmol} = -141.952 \text{ kJ}$$

$$70 \text{ kJ/mol} \times 1000 \text{ mol/1 kmol} \times 1,79 \text{ kmol} = 125.300 \text{ kJ}$$

$$256,3 \text{ kJ/mol} \times 1000 \text{ mol/1 kmol} \times 6,40 \text{ kmol} = 1.640.320 \text{ kJ}$$

Toplam: 1.765.478 kJ

Kalsinasyon + Sinterleme için toplam gerekli enerji = 1.749.597 kJ + 1.765.478 kJ = 3.515.075 kJ = 3,52 GJ

Yakıt olarak Heavy Fuel Oil (HFO) kullanıldığı öğrenilmiş olup; aşağıdaki HFO kompozisyonuna göre bazı hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge Ek-3.7. Spinel üretiminde kullanılan HFO'nun bileşeni (Morvay ve Gvozdenac, 2008).

Bileşen	Fraksiyon (kütlece)
C	0,829
S	0,045
H	0,114
Kül	0,012
Yoğunluk	0,95 kg/l
Üst Isıl Değer	43746 kJ /kg
Alt Isıl Değer	41193 kJ /kg

Gerekli enerji ve alt ısıl değer verileri kullanılarak 85,3 kg HFO gerektiği hesaplanmıştır.

Demir-Çelik dışı endüstrilerde HFO yakılması durumunda belirlenmiş emisyon faktörleri Ek-3.8' de verilmiştir.

Çizelge Ek-3.8. Spinel üretiminde varsayılan emisyon faktörleri (EMEP/EEA, 2013).

Bileşen	Emisyon Faktörü (g/GJ)
NO _x	513
CO	66
NM _{VOC}	25
SO _x	47
PM ₁₀	20
PM _{2,5}	20

Çin'deki spinel üretim tesisi emisyonları, emisyon faktörlerine göre hesaplanmış ve Ek-3.9' da verilmiştir.

Çizelge Ek-3.9. Spinel üretiminde oluşan emisyonlar (EMEP/EEA, 2013)

Bileşen	Emisyon (g)
NO _x	1806
CO	232,3
NM _{VOC}	88
SO _x	165,4
PM ₁₀	70,4
PM _{2,5}	70,4

CO₂ miktarı ise;

HFO' dan gelen CO₂: 85,3 kg HFO x 0,829 kg C/ 1 kg HFO

$$= 70,7 \text{ kg C} \times 44 \text{ kg CO}_2 / 12 \text{ kg C} = 259 \text{ kg CO}_2$$

Kalsinasyondan gelen CO₂: 8,19 kmol CO₂ x 44 kg/1 kmol = 360 kg CO₂

Toplam CO₂ miktarı = yakıttan gelen + kalsinasyondan gelen = 619 kg CO₂

Ek-4 Yaşam Döngüsü Analizi Envanteri -2

Çizelge Ek-4.1. Refrakter üretim tesisinin malzeme ve enerji envanteri

	Miktar	Birim
Deniz Suyu Sinter Manyezit (Hollanda)	425	kg
Deniz Suyu Sinter Manyezit (Meksika)	425	kg
Manyezit Spinel (Çin)	150	kg
Su	25	m ³
Kırma Öğütme Eleme	100	kWh
Dozajlama Harman Hazırlama	40	kWh
Şekillendirme	100	kWh
Pişirme (doğalgaz)	782025	kWh
Ambalajlama (karton, çember, naylon)	3,5	kg

Çizelge Ek-4.2. Refrakter üretim tesisinin emisyon envanteri

Kirletici *	1000 kg ürün başına emisyon miktarı	Birim
P.M.	0,39	kg
CO	41,77	kg
SO ₂	31,81	kg
NO _x	2,36	kg
4-klorotoluen	0,012	kg
2-klorotoluen	0,012	kg
1,1,2,2-tetrakloroetan	0,263	kg
Benzen	0,066	kg
Toluen	0,102	kg
P-ksilen	0,0095	kg
M-ksilen	0,0095	kg
Etilbenzen	0,019	kg
Stiren	0,009	kg
O-ksilen	0,012	kg
Isopropilbenzen (Kümen)	0,001	kg
n-propilbenzen	0,0028	kg
Trimetilbenzen	0,012	kg
Bütilbenzen	0,012	kg
Naftalin	0,016	kg
Arsenik	0,94	g
Krom	1,42	g
Kadmiyum	0,057	g
Bakır	1,61	g
Mangan	0,244	g
Nikel	0,05	g
Kurşun	1,252	g
Titanyum	2,595	g

* Ölçülen CO = 3,237 kg/sa → 72 x 3,237 = 233,064 kg (3 günde çıkan CO miktarı)

1 ton tuğla için CO miktarı = (233,064 * 1000)/5580 = 41,77 kg CO

Çizelge Ek-4.3. 1 ton MgO için Hollanda deniz suyu sinter manyezit üretim tesisi envanteri

Doğal kaynaklar	Miktar	Birim
MgCl ₂	1200	kg
Su	20	m ³
Malzeme ve Enerji	Miktar	Birim
Doğal gaz	11,04	GJ
MgO	502	kg
CaO	698	kg
Elektrik	72,22	kwh
Deniz Ulaşımı	6993	tkm
Kara Ulaşımı	144	tkm
Emisyonlar	Miktar	Birim
SO ₂	0,6	kg
CO ₂	9	kg
NO _x	3,25	kg
CO ₂	570	kg
PM	0,3	kg
B	50	g
Cr	1,28	g
Zn	0,64	g
Mg	6,6	kg
Ca	422,2	kg
K	10,8	kg
Na	44,2	kg
Cl	839,8	kg
SO ₂	7	kg

Çizelge Ek-4.4. 1 ton MgO için Meksika deniz suyu sinter manyezit üretim tesisi envanteri

Doğal kaynaklar	Miktar	Birim
MgCl ₂	1200	kg
Su	20	m ³
Malzeme ve Enerji	Miktar	Birim
Doğal gaz (Manyezit)	11,04	GJ
Doğal gaz (Kalsinasyon)	4,77	GJ
MgO	502	kg
CaO	698	kg
Elektrik	72,22	kwh
Deniz Ulaşımı	14297	tkm
Kara Ulaşımı	144	tkm
Emisyonlar	Miktar	Birim
SO ₂	0,6	kg
CO	3,35	kg
NO _x	2,32	kg
CO ₂	2131	kg
PM	1,32	kg
B	50	g
Cr	1,28	g
Zn	0,64	g
Mg	6,6	kg
Ca	422,2	kg
K	10,8	kg
Na	44,2	kg
Cl	839,8	kg
SO ₂	7	kg

Çizelge Ek-4.5. 983 kg MgAl₂O₄ için sinter spinel üretim tesisi envanteri

Doğal kaynaklar	Miktar	Birim
MgCO ₃	688	kg
Malzeme ve Enerji	Miktar	Birim
Heavy Fuel Oil	3,52	GJ
Al ₂ O ₃	653	kg
Elektrik	72,22	kwh
Deniz Ulaşımı	17946	tkm
Kara Ulaşımı	141,552	tkm
Emisyonlar	Miktar	Birim
SO ₂	165,4	g
CO	232,3	g
NO _x	1,81	kg
CO ₂	619	kg
PM<10	70,4	g
PM<2,5	70,4	g
NMVOC	88	g

Çizelge Ek-4.6. Deniz suyu sinter manyezit üretim tesislerinin aynı kabul edilen verileri

Doğal kaynaklar	Miktar	Birim
MgCl ₂	1200	kg
Su	20	m ³
Malzeme ve Enerji	Miktar	Birim
Doğal gaz	11,04	GJ
MgO	502	kg
CaO	698	kg
Elektrik	72,22	kwh
Emisyonlar	Miktar	Birim
SO ₂	0,6	kg
CO ₂	570	kg
B	50	g
Cr	1,28	g
Zn	0,64	g
Mg	6,6	kg
Ca	422,2	kg
K	10,8	kg
Na	44,2	kg
Cl	839,8	kg
SO ₂	7	kg

EK-5 Yaşam Döngüsü Maliyet Envanteri

Çizelge Ek-5.1 İçsel maliyet envanteri

No	Maliyet Kalemleri	Miktar	Birim	Birim fiyat	Fiyat (\$)	Kaynak
1	Refrakter Bakım - Onarım	1000	kg	0,03 \$/kg	30	Ref. tuğla üretim tesisi
2	Ambalajlama	11,3	kg	3,2 \$/kg	36,16	Ref. tuğla üretim tesisi
3	Refrakter Personel	62,74	\$	1 \$/\$	62,74	Ref. tuğla üretim tesisi
4	Doğalgaz	75	m ³	0,32 \$/m ³	24	www.botas.gov.tr
5	Kırma Eleme - Elektrik	100	kWh	0,095 \$/kWh	9,50	www.tedas.gov.tr
6	Şekillendirme - Elektrik	100	kWh	0,095 \$/kWh	9,50	www.tedas.gov.tr
7	Dozajlama-Harman Hazırlama - Elektrik	40	kWh	0,095 \$/kWh	3,80	www.tedas.gov.tr

Çizelge Ek-5.2 Dışsal maliyet envanteri

Çevresel Maliyetler	Miktar	Birim	Birim fiyat	Fiyat (\$)
Asidifikasyon (kg SO ₂ ed.)	38,62	kg	9,2 \$/kg	355,304
Fotokimyasal sis (kg C ₂ H ₆ ed.)	2,81	kg	2,4 \$/kg	6,744
Ozon tabakasının tükenmesi (kg CFC-11 ed.)	1,2	kg	371,3 \$/kg	445,56
Küresel ısınma (kg CO ₂ ed.)	386,72	kg	0,137 \$/kg	52,98
Ötrofikasyon (kg PO ₄ ed.)	0,676	kg	4,37 \$/kg	2,95
Toksosite (kg 1,4 Db ed.)				
Toksosite Alt Bileşenleri				
Benzen	0,07	kg	0,08436 \$/kg	5,91x10 ⁻³
Formaldehit	1,9x10 ⁻⁹	kg	0,2442	4,64 x10 ⁻¹⁰
Arsenik	0,0000757	kg	387,4 \$/kg	1,85 x10 ⁻⁵
Kadmiyum	0,000124	kg	31,9 \$/kg	3,96x x10 ⁻³
Kurşun	0,00032	kg	1061,50 \$/kg	0,3397
Civa	0,053	kg	1001 \$/kg	53,053
Nikel	0,0022	kg	4,18	9,196 x10 ⁻³