



**KOMPOZİT AMBALAJ ATIKLARINDAN  
KARBON NANOTÜP ELDESİNİN  
YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ**

**Yüksek Lisans Tezi  
Kübra CEBECİ TOPBAŞ**

**Eskişehir, 2019**

**KOMPOZİT AMBALAJ ATIKLARINDAN  
KARBON NANOTÜP ELDESİNİN  
YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ**

**Kübra CEBECİ TOPBAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Aysun ÖZKAN**

**Eskişehir**

**Eskişehir Teknik Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Ağustos 2019**

*Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından kabul edilen 117Y041 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.*

## **JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI**

**Kübra CEBECİ TOPBAŞ**'ın “Kompozit Ambalaj Atıklarından Karbon Nanotüp Eldesinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi” başlıklı tezi 21/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, Çevre Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### **Jüri Üyeleri**

### **Unvanı Adı Soyadı**

### **İmza**

Üye (Tez Danışmanı) : Prof. Dr. Aysun ÖZKAN

Üye :Doç. Dr. Demet TOPALOĞLU YAZICI

Üye :Dr. Öğr. Üyesi Zerrin GÜNKAYA

**Prof. Dr. Murat TANIŞLI**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü**

## ÖZET

### KOMPOZİT AMBALAJ ATIKLARINDAN KARBON NANOTÜP ELDESİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Kübra CEBECİ TOPBAŞ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2019

**Danışman: Prof. Dr. Aysun ÖZKAN**

Karbon nanotüpler (CNT'ler) paha biçilmez mekanik, termal ve elektriksel özellikleri nedeniyle çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda ve ürünlerde önemli bir role sahiptir. Kimyasal buhar çöktürme (CVD), CNT'lerin üretiminde en yaygın sentez yöntemidir. Bu çalışmada, CVD yöntemiyle sentezlenen çok duvarlı karbon nanotüplerin çevresel performansını belirlemek için Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), ve ekonomik değerlendirme için parasallaştırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sistem sınırları hammadde temini ve üretim sürecini kapsayan, “beşikten kapıya” şeklinde oluşturulmuştur. Fonksiyonel birim, laboratuvar ölçekli CVD reaktöründe sentezlenen bir deney setindeki 0,553 g CNT olarak belirlenmiştir. Envanter verileri yerinde ölçümler, malzeme kullanımı ve Ecoinvent veri tabanı ile sağlanmıştır. LCA hesaplamaları lisanslı SimaPro 8.5.0.0 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Çevresel etki değerlendirmesinde, seçilen etki kategorileri (abiyotik kaynakların tükenmesi, küresel ısınma, toksisite, fotokimyasal oksidasyon, ozon tabakasının tükenmesi, asidifikasyon ve ötrofikasyon) için CML-IA yöntemi kullanılmıştır. LCA ve parasallaştırma sonuçlarına göre, harcanan enerjinin en büyük etkiye sahip aktivite olduğu görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** Çevresel etkiler, Karbon nanotüp (CNT), Kimyasal buhar çöktürme (CVD), Parasallaştırma, Yaşam döngüsü değerlendirme (LCA)

## **ABSTRACT**

### **THE LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THE CARBON NANOTUBE OUTPUT FROM PACKAGING WASTES**

**Kübra CEBECİ TOPBAŞ**

Department of Environmental Engineering Programme in Environmental Sciences

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2019

**Supervisor: Prof. Dr. Aysun ÖZKAN**

Carbon nanotubes (CNTs) has a significant role in a wide range of industrial applications and products owing to their invaluable mechanical, thermal and electrical properties. Chemical vapor deposition (CVD) is the commonest synthesis method of CNTs production. In this study, Life Cycle Assessment (LCA) was used to determine the environmental performance of multi-walled carbon nanotubes synthesized by CVD method, and monetization studies were conducted for economic evaluation. The system boundaries, covering raw material supply and production process, are formed as “cradle-to-gate”. The functional unit was defined as 0.553 g CNT in an experimental set synthesized in a laboratory scale CVD reactor. Inventory data has been collected through onsite measurements, materials usage and Ecoinvent software database. The LCA calculations were carried out using licensed SimaPro 8.5.0.0 software. The environmental impact assessment was carried out using CML-IA method for the selected impact categories (abiotic depletion, global warming, toxicity, photochemical oxidation, ozon layer depletion, acidification and eutrophication). According to the results of LCA and monetization, the most effective activity was the energy consumed.

**Keywords:** Carbon nanotubes (CNT), Chemical vapor deposition (CVD), Environmental impacts, Life cycle assessment (LCA), Monetization

## ÖNSÖZ

Bu tezin planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren başta danışman hocam Prof. Dr. Aysun ÖZKAN olmak üzere Prof. Dr. Müfide BANAR ve Dr. Öğr. Üyesi Zerrin GÜNKAYA'ya

Çalışmamın her safhasında benden bir an olsun bilgi, yardım ve desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Ece YAPICI, Hasret AKGÜN ve Müge TAŞ'a

Tüm hayatım boyunca maddi manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan ve daima yanımda olan sevgili aileme;

Hayatımın her alanında olduğu gibi, bu sürecin her aşamasında gösterdiği ilgi, yardım ve anlayışından dolayı sevgili eşim Alper TOPBAŞ'a

Sonsuz sevgi ve en içten teşekkürlerimi sunarım.

Kübra CEBECİ TOPBAŞ

Ağustos 2019

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Kübra CEBECİ TOPBAŞ

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                      |      |
|----------------------------------------------------------------------|------|
| BAŞLIK SAYFASI .....                                                 | i    |
| JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI .....                                          | ii   |
| ÖZET.....                                                            | iii  |
| ABSTRACT .....                                                       | iv   |
| ÖNSÖZ.....                                                           | v    |
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....                    | vi   |
| İÇİNDEKİLER .....                                                    | vii  |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                              | x    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                | xi   |
| GÖRSELLER DİZİNİ.....                                                | xiii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                                 | xiv  |
| 1.GİRİŞ .....                                                        | 1    |
| 2.KARBON NANOTÜP (CNT) VE SENTEZ YÖNTEMLERİ .....                    | 6    |
| 2.1. Tarihsel Bakış .....                                            | 7    |
| 2.2. Sentez Yöntemleri .....                                         | 9    |
| 2.2.1. Katı karbon kaynağı temelli sentez yöntemleri.....            | 10   |
| 2.2.2. Gaz karbon kaynağı temelli sentez yöntemleri.....             | 11   |
| 2.2.2.1. <i>Heterojen süreçler</i> .....                             | 12   |
| 2.2.2.2. <i>Homojen süreçler</i> .....                               | 13   |
| 2.2.2.3. <i>Kalıplama tekniği</i> .....                              | 14   |
| 2.2.3. Yaygın Olmayan Diğer Yöntemler .....                          | 15   |
| 2.3. Karbon Nanotüplerin Çevre ve Sağlık Üzerine Olan Etkileri ..... | 17   |
| 3.YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ (LCA) VE PARASALLAŞTIRMA.....                | 20   |
| 3.2. Uluslararası Uyum ve Standardizasyon .....                      | 20   |
| 3.2.1. Bilimsel iş birliği ve fikir birliği oluşturma.....           | 20   |
| 3.2.2. Ulusal standardizasyon .....                                  | 21   |

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.3. ISO standartlarının ötesinde metodolojinin standardizasyonu .....                               | 22 |
| 3.3. Kullanım Alanları ve Potansiyel Kullanıcı Grupları .....                                          | 23 |
| 3.4. Sistemin Yapısı .....                                                                             | 24 |
| 3.4.1. Hedef ve kapsamın belirlenmesi .....                                                            | 25 |
| 3.4.1.1. <i>Hedef</i> .....                                                                            | 26 |
| 3.4.1.2. <i>Kapsam</i> .....                                                                           | 27 |
| 3.4.1.3. <i>Sistem sınırları</i> .....                                                                 | 32 |
| 3.4.1.4. <i>Veri kalitesi</i> .....                                                                    | 33 |
| 3.4.1.5. <i>Kritik gözden geçirme</i> .....                                                            | 35 |
| 3.4.2. Envanter analizi/değerlendirmesi .....                                                          | 36 |
| 3.4.2.1. <i>LCI modeli için süreç belirleme</i> .....                                                  | 37 |
| 3.4.2.2. <i>Veri planlama ve toplama</i> .....                                                         | 38 |
| 3.4.2.3. <i>Yapılandırma ve kalite kontrol birimi süreçleri</i> .....                                  | 39 |
| 3.4.2.4. <i>LCI modelinin oluşturulması ve LCI sonuçlarının hesaplanması</i> .....                     | 39 |
| 3.4.2.5. <i>Belirsizlik ve hassasiyet analizi için temel hazırlanması</i> ....                         | 39 |
| 3.4.2.6. <i>Raporlama</i> .....                                                                        | 40 |
| 3.4.3. Etki değerlendirmesi .....                                                                      | 40 |
| 3.4.3.1. <i>Etki kategorilerinin seçimi, kategori indikatörleri ve karakterizasyon modelleri</i> ..... | 41 |
| 3.4.3.2. <i>Sınıflandırma</i> .....                                                                    | 42 |
| 3.4.3.3. <i>Karakterizasyon</i> .....                                                                  | 43 |
| 3.4.3.4. <i>Normalizasyon</i> .....                                                                    | 51 |
| 3.4.3.5. <i>Ağırlıklandırma</i> .....                                                                  | 52 |
| 3.4.3.6. <i>Gruplandırma</i> .....                                                                     | 52 |
| 3.4.4. Yorum .....                                                                                     | 52 |
| 3.4.4.1. <i>Önemli sorunların tanımlanması</i> .....                                                   | 53 |
| 3.4.4.2. <i>Değerlendirme</i> .....                                                                    | 53 |
| 3.4.4.3. <i>Sonuçlar, kısıtlamalar ve öneriler</i> .....                                               | 54 |
| 3.4.4.4. <i>Karşılaştırmalı çalışmalar için yorum</i> .....                                            | 54 |
| 3.5. Parasallaştırma .....                                                                             | 55 |
| 3.5.1. Çevresel dışsalıkları ölçmek için parasallaştırma yöntemleri .....                              | 57 |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5.1.1. Ürün Tasarımında Çevresel Öncelikler Stratejileri (EPS) .       | 57 |
| 3.5.1.2. Dış enerji maliyetleri (ExternE) .....                          | 58 |
| 3.5.1.3. Ecotax.....                                                     | 58 |
| 3.5.1.4. Stepwise 2006 .....                                             | 59 |
| 4.LİTERATÜR.....                                                         | 60 |
| 5.MATERYAL VE YÖNTEM.....                                                | 63 |
| 5.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA).....                            | 63 |
| 5.1.1. Hedef ve kapsam tanımı .....                                      | 63 |
| 5.1.2. Yaşam döngüsü envanter analizi .....                              | 64 |
| 5.1.2.1. Sistem tanımı.....                                              | 65 |
| 5.1.3. Etki Analizi .....                                                | 72 |
| 5.1.4. Yorum.....                                                        | 73 |
| 5.2. Parasallaştırma .....                                               | 73 |
| 5.2.1. Hedef ve kapsam tanımı .....                                      | 74 |
| 5.2.2. Maliyet bileşenlerinin belirlenmesi.....                          | 75 |
| 5.2.3. Maliyet verilerine ait envanterin oluşturulması .....             | 75 |
| 6.BULGULAR VE DEĞERLENDİRME .....                                        | 76 |
| 6.1. CNT Sentezinin LCA Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....              | 76 |
| 6.2. CNT Sentezinin Parasallaştırma Sonuçları ve Değerlendirilmesi ..... | 86 |
| 7.SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER .....                                      | 88 |
| KAYNAKÇA.....                                                            | 91 |
| EKLER                                                                    |    |
| ÖZGEÇMİŞ                                                                 |    |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 1.1.</b> En yaygın kullanılan plastik türlerinin karbon içeriği.....            | 3  |
| <b>Çizelge 3.1.</b> CML 2000 yöntemine göre etki kategorileri.....                         | 42 |
| <b>Çizelge 5.1.</b> Gaz ürün bileşenleri.....                                              | 68 |
| <b>Çizelge 5.2.</b> Deneysel çalışmayla ilgili envanter verileri .....                     | 72 |
| <b>Çizelge 5.3.</b> Etki kategorilerinin ağırlıklandırma faktörleri .....                  | 74 |
| <b>Çizelge 5.4.</b> Yaşam döngüsü maliyet bileşenlerinin sınıflandırılması .....           | 75 |
| <b>Çizelge 6.1.</b> 0,553 g CNT üretiminin karakterizasyon ve normalizasyon sonuçları..... | 76 |
| <b>Çizelge 6.2.</b> LCA sonuçlarına göre belirlenen parasallaştırma değerleri.....         | 86 |
| <b>Çizelge 6.3.</b> İçsel ve dışsal maliyet sonuçlarının dağılımı .....                    | 87 |
| <b>Çizelge 7.1.</b> Konuyla ilgili literatür karşılaştırılması .....                       | 89 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.1.</b> Kuvars tüp CCVD reaktörünün şematik çizimi.....                                                                                  | 14 |
| <b>Şekil 3.1.</b> LCA çerçevesinin gelişimi .....                                                                                                  | 22 |
| <b>Şekil 3.2.</b> ISO 14040 standardından uyarlanmış LCA çerçevesi.....                                                                            | 25 |
| <b>Şekil 3.3.</b> Kapsamlı ürün sistemi için ekosfer ve teknofer arasındaki bölünme.....                                                           | 29 |
| <b>Şekil 3.4.</b> Kapsamlı ürün sistemi için LCI modeli .....                                                                                      | 30 |
| <b>Şekil 3.5.</b> Temel akışları birbirine bağlayan ILCD karakterizasyonu çerçevesi.....                                                           | 46 |
| <b>Şekil 5.1.</b> Laboratuvar ölçeğinde üretilen karbon nanotüpün sistem sınırı.....                                                               | 64 |
| <b>Şekil 6.1.</b> 0,553 g CNT sentezinin karakterizasyon sonuçları (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik)..... | 77 |
| <b>Şekil 6.2.</b> 0,553 g CNT sentezinin karakterizasyon sonuçları (Vaks ve alüminyum kazanımı) .....                                              | 78 |
| <b>Şekil 6.3.</b> 0,553 g CNT sentezinin ADPe etkisi (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik).....               | 78 |
| <b>Şekil 6.4.</b> 0,553 g CNT sentezinin ADPe etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı).....                                                             | 79 |
| <b>Şekil 6.5.</b> 0,553 g CNT sentezinin ADPff etkisi (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik).....              | 79 |
| <b>Şekil 6.6.</b> 0,553 g CNT sentezinin ADPff etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı).....                                                            | 80 |
| <b>Şekil 6.7.</b> 0,553 g CNT sentezinin GWP etkisi (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik) .....               | 80 |
| <b>Şekil 6.8.</b> 0,553 g CNT sentezinin GWP etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı).....                                                              | 81 |
| <b>Şekil 6.9.</b> 0,553 g CNT sentezinin ODP etkisi (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik) .....               | 81 |
| <b>Şekil 6.10.</b> 0,553 g CNT sentezinin ODP etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı).....                                                             | 82 |
| <b>Şekil 6.11.</b> 0,553 g CNT sentezinin HTP etkisi (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik).....               | 82 |

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 6.12.</b> 0,553 g CNT sentezinin HTP etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı).....                                              | 83 |
| <b>Şekil 6.13.</b> 0,553 g CNT sentezinin POP etkisi (CNT sentezi, azot üretimi,diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik)..... | 83 |
| <b>Şekil 6.14.</b> 0,553 g CNT sentezinin POP etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı).....                                              | 84 |
| <b>Şekil 6.15.</b> 0,553 g CNT sentezinin AP etkisi (CNT sentezi, azot üretimi,diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik) ..... | 84 |
| <b>Şekil 6.16.</b> 0,553 g CNT sentezinin AP etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı)...                                                 | 85 |
| <b>Şekil 6.17.</b> 0,553 g CNT sentezinin EP etkisi (CNT sentezi, azot üretimi,diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik).....  | 85 |
| <b>Şekil 6.18.</b> 0,553 g CNT sentezinin EP etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı)...                                                 | 86 |

## GÖRSELLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Görsel 2.1.</b> Grafen bir levhadan nanotüp oluşumu .....                      | 6  |
| <b>Görsel 2.2.</b> Karbon nanotüp türleri .....                                   | 7  |
| <b>Görsel 2.3.</b> Termal CVD yöntemiyle MWCNT sentezlenmesi .....                | 9  |
| <b>Görsel 2.4.</b> Elektrik ark deşarjı reaktörünün şematik çizimi.....           | 11 |
| <b>Görsel 5.1.</b> Piroliz reaktörü .....                                         | 66 |
| <b>Görsel 5.2.</b> CNT sentezinde kullanılan kimyasal buhar çöktürme fırını ..... | 70 |
| <b>Görsel 5.3.</b> CNT örneğine ait SEM görüntüsü.....                            | 71 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|        |                                                                                                                                                           |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AC     | : Alternatif Akım (Alternating Current)                                                                                                                   |
| ADP    | : Abiyotik Kaynakların Tükenmesi Potansiyeli (Abiotic Depletion Potential)                                                                                |
| AP     | : Asidifikasyon Potansiyeli (Acidification Potential)                                                                                                     |
| CALCAS | : Sürdürülebilirlik için Yaşam Döngüsünün Analizi için Koordinasyon Eylemi (Coordination Action for innovation in Life Cycle Analysis for Sustainability) |
| CF     | : Karakterizasyon Faktörü (Characterisation Factor)                                                                                                       |
| CNT    | : Karbon Nanotüp (Carbon Nanotube)                                                                                                                        |
| CVD    | : Kimyasal Buhar Çöktürme (Chemical Vapour Deposition)                                                                                                    |
| CCVD   | : Katalitik Kimyasal Buhar Çöktürme (Catalytic Chemical Vapour Deposition)                                                                                |
| C/LDPE | : Kompozit Düşük Yoğunluklu Polietilen (Composite-Low-density polyethylene)                                                                               |
| DC     | : Doğru Akım (Direct Current)                                                                                                                             |
| DWNT   | : Çift Duvarlı Karbon Nanotüp (Doubled Walled Carbon Nanotube)                                                                                            |
| EEIO   | : Çevresel Olarak Genişletilmiş Girdi-Çıktı Analizi (Environmentally Extended Input–Output Analysis)                                                      |
| EP     | : Ötrofikasyon Potansiyeli (Eutrophication Potential)                                                                                                     |
| FAETP  | : Yüzey Sularına Olan Eko toksite Potansiyeli (FreshwaterAquatic Ecotoxicity Potential)                                                                   |

|      |                                                                                            |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| FB   | : Akışkan Yatak (Fluidized Bed)                                                            |
| GDP  | : Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (Gross Domestic Product)                                       |
| GWP  | : Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential)                                    |
| HTP  | : İnsanlar Üzerine Olan Toksik Etki Potansiyeli (Human Toxicity)                           |
| ILCD | : Uluslararası Yaşam Döngüsü Veri Sistemi (International Life Cycle Data System)           |
| IPCC | : Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (The Intergovernmental Panel on Climate Change) |
| IPP  | : Entegre Ürün Politikası (Integrated Product Policy)                                      |
| IS   | : Etki Puanı (Impact Score)                                                                |
| ISO  | : Uluslararası Standart Organizasyonu (International Organization for Standardization)     |
| LCA  | : Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Analyses/Assesment)                                    |
| LCI  | : Yaşam Döngüsü Envanteri (Life Cycle Inventory)                                           |
| LCIA | : Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (Life Cycle Impact Assesment)                         |
| LCM  | : Yaşam Döngüsü Yönetimi (Life Cycle Management)                                           |
| LCSA | : Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi (Life Cycle Sustainability Assessment)   |
| LDPE | : Düşük Yoğunluklu Polietilen (Low-density polyethylene)                                   |
| HDPE | : Yüksek Yoğunluklu Polietilen (High-density polyethylene)                                 |
| ODP  | : Ozon Tabakasının Tükenmesi Potansiyeli (Ozone Depletion Potential)                       |
| OEF  | : Kurumsal Çevre Ayak İzi (Organisational Environmental Footprint)                         |

|         |                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MSW     | : Kentsel Katı Atık (Municipal Solid Waste)                                                                                                             |
| MWNT    | : Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (Multi Walled Carbon Nanotube)                                                                                             |
| PAGÇEV  | : Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı<br>Geri Dönüşüm İktisadi İşletmesi                                                     |
| PAGEV   | : Türk Plastik Sanayicileri Araştırma, Geliştirme ve Eğitim Vakfı                                                                                       |
| PE      | : Polietilen                                                                                                                                            |
| PEF     | : Ürün Çevresel Ayak İzi (Product Environmental Footprint)                                                                                              |
| PET     | : Polietilentereftalat                                                                                                                                  |
| POP     | : Fotokimyasal Oksidasyon Potansiyeli (Photochemical oxidation<br>Potential)                                                                            |
| PP      | : Polipropilen                                                                                                                                          |
| PPP     | : Satın Alma Gücü Paritesi (Purchasing Power Parity)                                                                                                    |
| PS      | : Polistiren                                                                                                                                            |
| PVC     | : Polivinil klorür                                                                                                                                      |
| REPA    | : Kaynak ve Çevresel Profil Analizi (Resource and Environmental<br>Profile Analysis)                                                                    |
| SCP/SIP | : Sürdürülebilir Tüketim ve Üretim ve Sürdürülebilir Sanayi<br>Politikası (Sustainable Consumption and Production and<br>Sustainable Industrial Policy) |
| SEM     | : Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)                                                                                           |
| SETAC   | : Çevresel Toksikoloji ve Kimya Birliği (Society of Environmental<br>Toxicology and Chemistry)                                                          |
| SWNT    | : Tek Duvarlı Karbon Nanotüp (Single Walled Carbon Nanotube)                                                                                            |

- TEM : Geçirimli Elektron Mikroskobu (Transmission Electron  
Microscope)
- WICE : Çevre için Dünya Endüstri Konseyi (World Industrial Council for  
Environment)
- WF : Ağırlıklandırma faktörü (Weighting Factor)
- WTP : Ödeme istekliliği (Willingness to Pay)



## 1. GİRİŞ

Ulaşım, ambalaj, tarım ve inşaat endüstrisi gibi birçok uygulama alanında plastikler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kadar yaygın kullanım ve üretim hacmindeki artış, plastikle ilişkili önemli toplumsal faydaların olduğunun göstergesidir. Fakat plastikler, son zamanlarda, çeşitli uygulama alanlarında ciddi sorunları beraberinde getirmiştir. Bunlar, gıda ile temas halindeki plastik ambalajlardan sızan katkı maddelerinden kaynaklı potansiyel sağlık tehlikelerinden, deniz ekosistemine tehdit oluşturan okyanuslardaki mikro plastiklerin ortaya çıkmasına kadar uzanmaktadır. Bu endişelere rağmen, plastiklerin sürekli büyümesi hız kesmeden devam etmektedir. Geleneksel malzemeler yerine plastik kullanılmasının avantajları, en az üç geniş uygulama alanında bariz bir şekilde görülmektedir. Bunlar; enerji tasarruflu kullanımlar, malzemeleri koruyan kullanımlar ve tüketici sağlığı ve güvenliğini sağlayan kullanımlardır (Andrady, 2015). Dünyada son 50 yılda plastik üretimi yirmi kat artarak, 2015 yılında 322 milyon tona ve 2016 yılında 335 milyon tona ulaşmıştır. Plastik talebini sırasıyla ambalaj sektörü (%39,9), inşaat (%19,7), otomotiv (%10), elektrikli ve elektronik cihaz sektörleri (%6,2), ev, eğlence ve spor sektörleri (%4,2), tarım (%3,3) ve diğer sektörler (%16,7) takip etmektedir (Plastics Europe, 2018).

Günümüzde, çoğu plastik tek kullanımlık uygulamalar için üretilmekte ve kullanım ömürleri genellikle bir yıldan az olmaktadır. Ne yazık ki, bu malzemeler yüzyıllar boyunca çevrede kalmaktadır (Sardon and Dove, 2018). Son yıllarda, plastik atıklar hacim olarak oldukça artmıştır. Atık akışındaki plastiklerin oranı, kentsel katı atık (MSW, Municipal Solid Waste) akışının kendisinden daha hızlı bir oranda artmıştır. MSW’de ambalajlama ve gıda maddesi bileşenleri gibi tek kullanımlık plastik ürünlerin miktarı plastik hacmine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır (Andrady, 2015). Atık plastiklerin etkili arıtımı, hala büyük bir sorundur. Yakma veya düzenli depolama gibi geleneksel yöntemler, çevrede, toz, duman ve zehirli gazların oluşumu, yer altı suları ve diğer kaynakların kirlenmesi gibi olumsuz etkilere neden olmaktadır. Geri dönüşüm süreci, atık plastik yönetiminin en iyi yoludur (Zare, 2012). Plastiklerin MSW’den geri kazanılması, bir malzeme kaynağı (malzeme geri dönüşümü), bir hammadde kazanımı (termal veya kimyasal bozunma ile) veya enerji olarak (yakma veya biyolojik arıtma ile) mümkündür (Andrady, 2015). Atık plastiklerin işlenmesinde iki temel alternatif; mekanik ve kimyasal geri dönüşümdür. Kullanılmış plastiklerin yeni ürünlere mekanik geri dönüşümü, atık plastikler için tercih edilen geri kazanım yöntemidir. Bu yöntemde, tüm atık plastiklerin

sadece %15-20'si, mekanik geri dönüşüm teknolojileriyle etkili bir şekilde geri dönüştürülebilmektedir. Kimyasal geri dönüşüm yöntemi, atık plastiklerin hidroliz, alkoliz, glikoliz, piroliz, gazlaştırma, hidrokraking ve katalitik bozunuma gibi çeşitli kimyasal tepkimelerle kimyasallara dönüştürülmesidir. Bununla birlikte, elde edilen ürünlerin piyasa değerinin düşük olması sebebiyle belli polimerler (polimetil metakrilat gibi) dışında, endüstriyel kimyasal geri dönüşüm henüz geniş çapta mevcut değildir (Liu vd., 2011).

Geri dönüşüm tesislerine erişim eksikliği, atık tanımlama karmaşıklığı, atığın ayrıştırılması, temizliği ve geri dönüştürülmüş plastikler için sınırlı pazarların oluşu düşük geri dönüşüm oranlarına sebep olan faktörlerden bazılarıdır. Son yıllarda, kamu bilinci, mevzuatlar ve teknolojiye gelişmeler bu sorunu kısmen ele almıştır. Bununla birlikte, geri dönüştürülmüş plastikler genellikle başlangıçta sahip oldukları özellikleri kaybettikleri için, orijinal uygulamalarında yeniden kullanımları zordur. Geri dönüşüm piyasası döngüseldir ve aynı zamanda ekonominin gücüne ve uygulanabilirliğine bağlıdır. Bu nedenle, bu tür çabaların genel olarak ekonomi tarafından büyük ölçüde etkilendiği göz önünde bulundurulduğunda, geri dönüşüm kendi başına sürdürülebilir bir çözüm olarak değerlendirilemez. Geri dönüştürülmüş ürünler için yüksek kapasiteli pazarların belirlenmesi zorunludur, bu nedenle geri dönüştürülmüş plastikler için, özellikle de yüksek değerli ürünlere yol açan yeni pazarların oluşturulması gereklidir. Böylece, bu polimerlerin geri dönüşümü ve yeniden kullanımı ilgi çekecek ve toplumun geri dönüşüme yönelik zihniyetinde faydalı olacaktır.

Kimyasal geri dönüşümün ürünleri genellikle yakıt olarak kullanılan hidrokarbonlar ya da monomerler gibi yeni malzemeler üretecek hammaddelerdir. Geleneksel kimya endüstrisinde hammaddelerin üretim maliyetlerinin %60-90'ını oluşturduğu, bu nedenle kimyasal geri dönüşümden kaynaklanan ucuz hammaddelerin, katma değerli ürünlerin üretim maliyetini düşürmek için yeni bir yol sağlayacağı öne sürülmüştür. Bu süreç, nihai ürünlerin kalitesi ve değerini yükselttiğinden ileri dönüşüm süreci olarak adlandırılmaktadır. Atık plastiklerin monomer hammaddeler için kimyasal maddelere dönüştürülmesi ve yakıt olarak kullanılması bu sürece bir örnektir.

Karbonun plastiklerin ana bileşeni olması nedeniyle (Çizelge1.1.) atık plastikler, karbon bazlı katma değerli ürünler için bir kaynak sağlamaktadır. Bu ürünler arasında başlıca hidrokarbonlar, karbon siyahı/aktif karbon, karbon fiberler, fullerenler, grafen ve karbon nanotüpler bulunmaktadır. Atık plastikleri, uygulama alanları giderek artan

karbon nanotüpler gibi katma değeri yüksek ürünlere dönüştürmek, çok uygun bir ileri dönüşüm örneğidir (Zhuo and Levendis, 2014).

**Çizelge1.1.** En yaygın kullanılan plastik türlerinin karbon içeriği (Zhuo and Levendis, 2014).

| Polimer                     | Molekül formülü                                               | Karbon içeriği (% , ağırlıkça) |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Polietilen (PE)             | (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) <sub>n</sub>                 | 85,6                           |
| Polipropilen (PP)           | (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> ) <sub>n</sub>                 | 85,6                           |
| Polistiren (PS)             | (C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> ) <sub>n</sub>                 | 92,2                           |
| Polietilen Tereftalat (PET) | (C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>n</sub> | 62,6                           |

Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı Geri Dönüşüm İktisadi İşletmesi (PAGÇEV) tarafından yayınlanan istatistiklere göre, Türkiye’de 2015 yılında 2,244,973 ton plastik ambalaj üretilmiş olup, bu oluşan plastik atıkların 501,455 tonu geri dönüştürülmüştür. Türk Plastik Sanayicileri Araştırma, Geliştirme ve Eğitim Vakfı (PAGEV) tarafından yayınlanan Türkiye Pet Termoform Sektör Raporu’na göre, 2016 yılında, 1,054 bin ton PET, 651 bin ton LDPE (Low-density polyethylene, Düşük Yoğunluklu Polietilen), 527 bin ton PP, 465 bin ton HDPE (High-density polyethylene, Yüksek Yoğunluklu Polietilen), 155 bin ton PVC (Polivinil klorür) ve 93 bin ton PS tüketim miktarı mevcuttur. Diğer plastik hammaddelerin yıllık ortalama tüketimi 155 bin tondur.

Ülkemizde yürürlüğe giren 2 Nisan 2015 tarih ve 29314 sayılı Atık Yönetimi Yönetmeliği’ne göre, kompozit ambalajlar 150105 atık koduyla verilmektedir. Bu ambalajlar farklı malzemelerden yapılmış, elle birbirinden ayrılması mümkün olmayan, ambalajın dayanıklılığını arttırmak ve malzemelerin kendilerine özgü özelliklerini birleştirmek amacıyla en az iki farklı malzemenin tam yüzeylerinin birleştirilmesi ile elde edilen ve geri dönüşümleri de oldukça zor olan ambalaj türleridir. Kompozit ambalajlar eğer kağıt içeriyorsa, öğütme ve ayrıştırma işlemlerinden sonra kağıt ve alüminyum/polietilen kısım birbirinden ayrılmaktadır. Geri kazanılan kağıt, bir seri kağıt geri dönüşüm işleminden geçirilerek, kağıt mendil, tuvalet kağıdı ve oluklu mukavva vb. ürünlerin üretiminde kullanılabilmektedir. Kağıt kısmı ayrıldıktan sonra geri kalan kısım (alüminyum ve polietilen/veya başka bir malzeme) ise, ısı değeri yüksek olduğu için çimento fabrikalarında ilave yakıt olarak kullanılmakta ya da depolama sahalarına gönderilmektedir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nın 2014 yılı verilerine göre, piyasaya sürülen 107,721 ton kompozit malzemenin 76,216 tonu atık olarak piyasadan

toplanmıştır. Bunların arasından, C/PAP atıklarından (tetrabrik aseptik ambalaj) levha üretimi vb. gerçekleştirilirken, diğer kompozitler genel olarak depolama alanlarına veya yakmaya gitmektedir.

Bu tezde, diğer tüm atık türlerinde olduğu gibi, kompozit ambalaj atıklarının da hem çevresel hem de ekonomik açıdan değerlendirilmeleri gerekliliğinden yola çıkılmıştır. C/LDPE (Composite/Low-density polyethylene, Kompozit/Düşük Yoğunluklu Polietilen) ambalajlar, Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği'ne göre, plastik/alüminyum sınıfında yer almakta olup, 90 numarasıyla verilmekte ve plastik içeriği alüminyum içeriğinden fazla olduğu için kodlamada LDPE kısaltması kullanılmaktadır. Bu malzemeler, özellikle hazır çorba, kahve, kuru meyve vb. gıda ürünlerinin ambalajlanmasında kullanılmaktadır. Atık C/LDPE ambalajlarının, ileri malzemeler haline dönüştürülmeleri şüphesiz ki çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan fayda sağlayacaktır. Karbon, plastiklerin ana bileşeni olduğundan, atık C/LDPE ambalajlarından karbon nanotüp (CNT) üretimi, kompozit ambalaj atığı yönetimine önemli bir alternatiftir. Bunun yanı sıra, olası çevresel etkilerinin ve maliyetinin belirlenmesi çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik ilkelerinin sağlanması açısından çok önemlidir.

Tezin ilk aşamasında, laboratuvarında kimyasal buhar çöktürme (CVD) yöntemi ile üretilen CNT'lerin çevresel performansının belirlenmesi için yaşam döngüsü analizi (LCA, Life Cycle Analysis) çalışması gerçekleştirilmiştir. LCA, bir ürün ya da sürecin tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkabilecek çevresel etkilerini kapsadığından, değerlendirilen bu çevresel etkileri, tüm boyutlarıyla ve kapsamlı olarak yansıtmaktadır. LCA sistemi, temel olarak, bir ürün ya da hizmet eldesi sürecinde kullanılan enerji, su ve diğer hammaddeler ile doğal kaynakları ve bununla 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 (Özdemir, 2013). Tezin bu aşamasında, yaşam döngüsü değerlendirmesi dört adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda, hedef ve kapsam tanımı ile çalışmanın amaçları ve hedeflenen çıktılara ulaşmak için gerekli olan ana bileşenler ortaya konularak, sistem sınırları ve fonksiyonel birim belirlenmiştir. İkinci adımda, yaşam döngüsü envanter analizi (LCI, Life Cycle Inventory) için malzeme ve enerji akışının sayısal ve teknik verilerinin toplanması ve değerlendirilmesi gerektiği için, sistem sınırları kapalı bir kutu olarak ele alınarak, bu

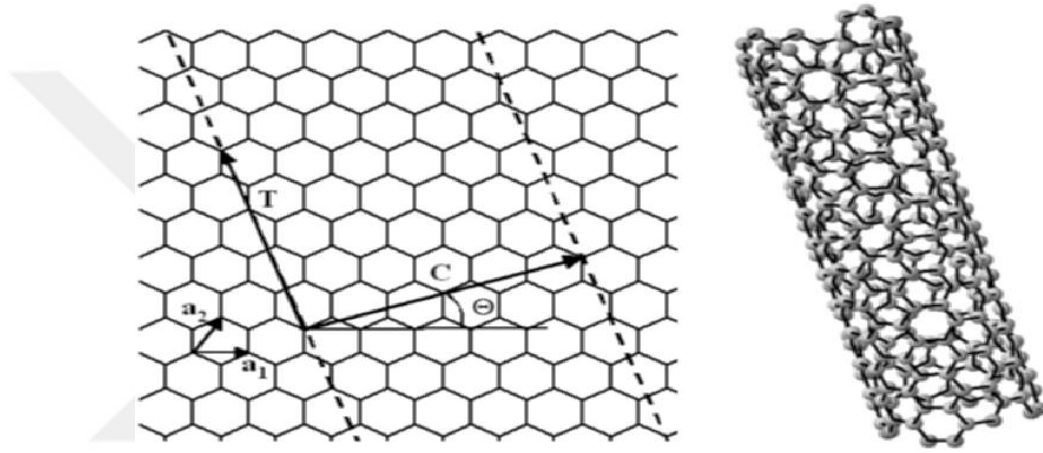
kutuya giren tüm hammadde ve enerji bileşenleri ile kutudan çıkan kirletici bileşenler fonksiyonel birim bazında değerlendirilmiştir. Üçüncü adımda, yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (LCIA, Life Cycle Impact Assessment) ile lisanslı SimaPro 8.5.0.0 (PRE Consultants, Netherland) yazılımında CML-IA (v.3.03/EU25+3,2000) yöntemi kullanılarak, CNT üretiminin tüm bileşenlerin çevresel etkileri; etki kategorileri bazında belirlenmiştir. Etki kategorileri ise elementel bazda abiyotik kaynakların tükenmesi ( $ADP_e$ , kg Sb ed.), fosil yakıt bazlı abiyotik kaynakların tükenmesi ( $ADP_{ff}$ , MJ), küresel ısınma potansiyeli (GWP, kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri ed.), asidifikasyon potansiyeli (AP, kg SO<sub>2</sub> ed.), ötrofikasyon potansiyeli (EP, kg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> ed.), insanlara olan toksik etki (HTP), fotokimyasal oksidasyon potansiyeli (POP, kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ed.) ve ozon tabakasının tükenmesi potansiyeli (ODP, kg CFC-11 ed.) olarak ele alınmıştır. Dördüncü aşamada ise etki değerlendirmesi sonuçları yorumlanmıştır.

Tezin ikinci aşamasında, LCA ile paralel olarak parasallaştırma (monetization) çalışmaları yürütülmüştür. Parasallaştırma çalışmaları ise dört adımda gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, sentezlenen karbon nanotüp için hedef ve kapsam tanımı yapılmıştır. İkinci adımda, maliyet prosesleri detaylı bir şekilde incelenerek maliyet faktörleri belirlenmiş ve kategorilere ayrılmıştır. Üçüncü adımda, maliyet verileri toplanarak envanter oluşturulmuştur. Dördüncü adımda, parasallaştırma modeli, LCA sonuçlarına göre yorumlanmıştır.

Bu bağlamda, bu tez çalışmasının ilk aşamasında; C/LDPE malzemesinin piroliziyle elde edilen gaz üründen CVD yöntemiyle üretilen karbon nanotüp ve çevresel etkilerini belirlemek amacıyla LCA çalışması yapılmıştır. İkinci aşamada ise üretilen karbon nanotüpün maliyet hesabı için parasallaştırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

## 2. KARBON NANOTÜP (CNT) VE SENTEZ YÖNTEMLERİ

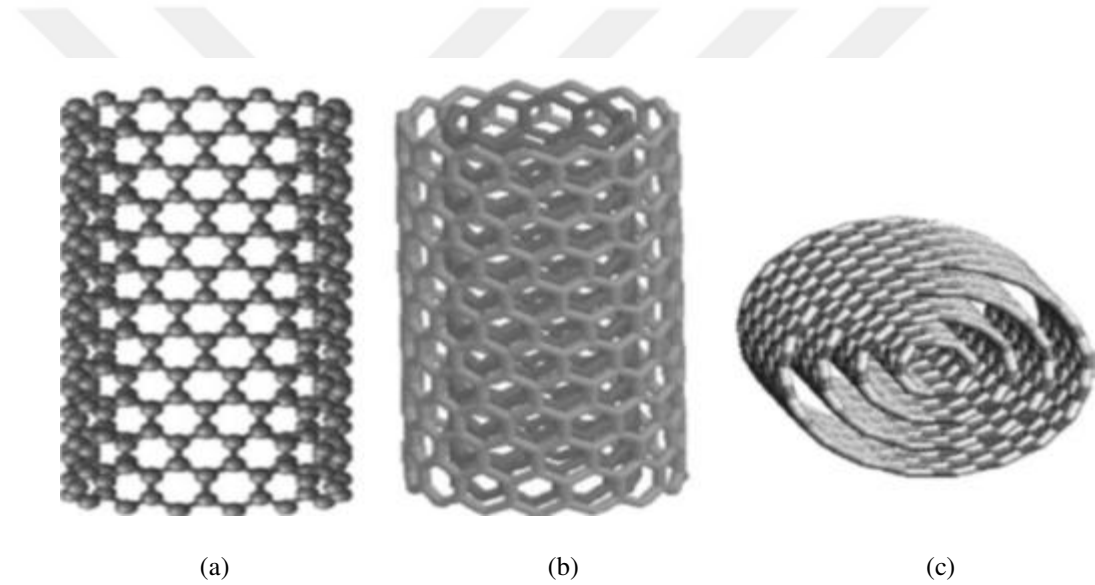
Karbon, sembolü C, atom numarası 6 ve elektron dizilimi  $2s^2 2p^2$  olan kimyasal bir elementtir. İsmi kömür anlamına gelen Latin karboyu ve Fransız şarbonundan gelmektedir. Karbon, evrendeki kütleyle göre en çok bulunan dördüncü kimyasal elementtir. Karbonun en çok bilinen allotropları, elmas, grafit, amorf karbon ve fullerenlerdir (Ren vd., 2013). Karbon atomunun bal peteği örgülü yapılarından biri olan grafen; grafit, fulleren ve karbon nanotüpler dahil olmak üzere bazı karbon yapılarının (Görsel 2.1) ana elementidir (Ferraira vd., 2016).



**Görsel 2.1.** Grafiten bir levhadan nanotüp oluşumu (Loiseau vd., 2006).

CNT'ler, 1 nm kadar küçük çapa ve birkaç nm ila mikron uzunluğuna sahip boru şeklindeki karbon formudur (Purohit vd., 2014). Bir CNT içindeki karbon atomları, diğer fullerenlere benzer şekilde, nano ölçekteki içi boş bir silindir oluşturan eğri bir tabakada (grafit tabaka) trigonal olarak bağlanır. CNT'lerin uzunluğu bir mikrondan birkaç milimetreye hatta santimetreye kadar değişebilir. CNT'ler tipik olarak tek duvarlı (SWCNTs, Single Walled Carbon Nanotubes), çift duvarlı (DWCNTs, Doubled Walled Carbon Nanotubes) ve grafit tabakalarının sayısına göre çok duvarlı (MWCNTs, Multi Walled Carbon Nanotubes) olarak kategorize edilmektedir (Görsel 2.2.). Bir CNT'deki atomik bağın doğası, uygulanan kuantum kimyası veya özellikle orbital hibridizasyon ile tarif edilir. CNT'lerdeki kimyasal bağların hepsi grafitle benzer olan  $sp^2$  bağlarıdır (Ren vd., 2013). Karbon nanotüp özellikleri, C–C bağına bazı  $sp^3$  karakterleri veren eğrilikler, tek boyutlu oluşu ve kusursuz silindirik yapıları gibi ayırt edici topolojik özelliklerle

belirlenmektedir (Loiseau vd., 2006). CNT'ler, paslanmaz çelikten 100 kat daha güçlü ve altı kat daha hafif, elmas kadar sert, termal kapasitesi saf elmasın iki katı, taşıma kapasitesi bakırdan 1000 kat daha yüksek, termal olarak 4000 K'ye kadar stabil, çaplarına ve kirallığına bağlı olarak metalik veya yarı iletken olan malzemelerdir (Purohit vd., 2014). CNT'lerin  $10^7$ 'yi aşan eşi görülmemiş uzunluk/çap oranı vardır (Jorio vd., 2008). Benzersiz elektrik, mekanik, optik, termal ve diğer özellikleri nedeniyle CNT'ler çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. CNT'lerin olası uygulamaları; iletken filmler, güneş pilleri, yakıt hücreleri, süper kapasitörler, transistörler, bellekler, ekranlar, ayırma membranları ve filtreleri, arıtma sistemleri, sensörler, giysiler vb. gibi birçok alanı kapsamaktadır (Purohit vd., 2014).



**Görsel 2.2.** Karbon nanotüp türleri: (a) SWCNT, (b) DWCNT ve (c) MWCNT (Ferreira vd., 2016).

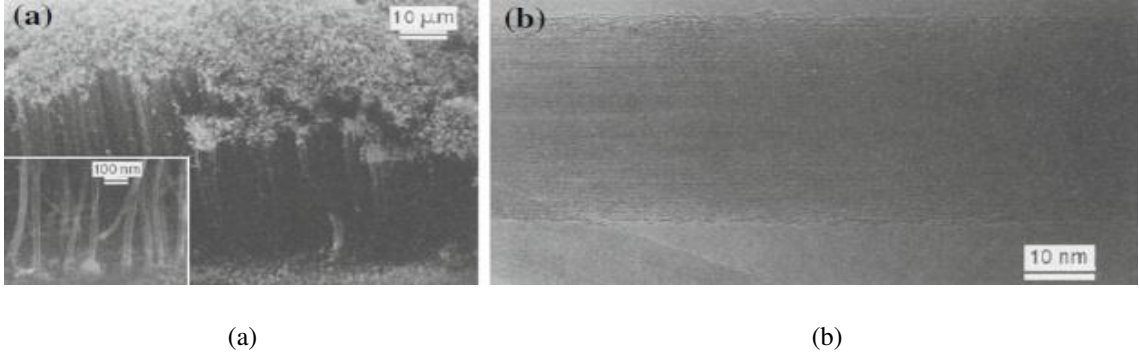
## 2.1. Tarihsel Bakış

CNT'lerin tartışmalı olan uzun bir keşif tarihi vardır. İlk karbon filamanının, 1889 yılında Thomas Alva Edison döneminde, akkor lambalar için bir ampul filamenti araştırıldığında sentezlendiği ileri sürülmüştür. Karbon filamanları, ampul filamentlerini yapmak için gaz halindeki hidrokarbonun (metan) termal ayrışmasıyla üretilmiştir. Bu dönemde, zaman içinde kullanılan optik mikroskopların düşük çözünürlüğü nedeniyle, çap olarak birkaç mikrondan daha küçük karbon filamanları gözlemlenememiştir. İlgili patentte tarif edilen deneysel yöntem ve koşullara dayanarak, kanıt olarak hiçbir görüntü kaydedilmemiş olmasına rağmen, içi boş karbon liflerinin o dönemde üretildiği

düşünülmektedir. Bu dönemlerde, CNT'ler sentezlenmiş olsa bile, nano ölçekli materyaller gözlenememiştir. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM), 1931 yılında Ernst Ruska ve Max Knoll tarafından icat edildikten ve 1939'da Siemens Inc. tarafından ticarileştirildikten sonra, nano ölçekli malzemelerin doğrudan görselleştirilmesi mümkün olmuştur. Nano ölçekli karbon filamentlerinin ilk tüp şeklindeki görünüşü TEM ile 1952'de yayınlanmıştır. 1985'te ark deşarjı ile keşfedilen bukminster fuleren (C<sub>60</sub>) ise bilim insanlarının nano malzemelere olan ilgisini arttırmıştır. Kısa bir süre sonra, Iijima, C<sub>60</sub> üretmek için aynı yöntemi (ark deşarjını) kullanarak, katot birikimin merkezi çekirdeğinin, nanopartiküller ve nanotüpler dahil olmak üzere çeşitli kapalı grafit yapılar içerdiğini bulmuştur. Elde edilen CNT'ler MWCNT'lerdir.

1991 yılında Iijima tarafından yapılan MWCNT araştırmalarından sonra, çalışmalara metal katalizörler (Fe veya Co) eklenerek ve ark deşarjı yöntemi kullanılarak SWCNT'ler sentezlenmiştir. SWCNT'lerin sentezi, CNT araştırmalarının geliştirilmesinde önemli bir yapı taşıdır çünkü CNT özelliklerinin birçok teorik öngörüsü, en basit SWCNT yapıları üzerinde daha kolay test edilmiştir. Ark deşarjı ile üretilen malzemeler, düşük CNT verimine sahip olan amorf karbon, grafit ve CNT'lerin karışımıdır. Saf CNT'ler genellikle çeşitli saflaştırma yöntemleri ile elde edilmektedir. Zor bir saflaştırma prosedürü ve düşük verim olsa da, ark deşarjı ile üretilen CNT'ler iyi bir kristallik derecesine ve çok az kusura sahiptir. Ark deşarjı yöntemi bugün hala yaygın olarak kullanılmaktadır. 1995 yılında, grafit hedefin lazerle buharlaştırılmasıyla SWCNT'leri üretmek için alternatif bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, aynı çaplara sahip yüksek SWCNT verimi ile sonuçlanmıştır (Ren vd., 2013).

Daha sonra, büyük ölçekli MWCNT'ler, termal CVD yöntemi kullanılarak küçük gözenekli silika içinde gömülü demir nano partiküllerden üretilmiştir. Karbon kaynağı olarak asetilen kullanılan çalışmada sentezlenen MWCNT'ler, Görsel 2.3.'te gösterilmiştir. Elde edilen MWCNT'ler silikanın yüzeyine neredeyse dik ve yaklaşık 100 nm'lik aralık ile tüpler hizalı bir dizi oluşturmuştur (Li vd., 1996).



**Görsel 2.3.** Termal CVD yöntemiyle MWCNT sentezlenmesi (a)Mezoporöz demir/silika substrattan dışarı büyüyen ve bir dizi oluşturan karbon nanotüplerin yüksek büyütme taramalı elektron mikroskobu(SEM, scanning electron microscope) görüntüsü. Bu karbon nanotüpler 30 nm çapa sahiptir. Tüpler arasındaki boşluklar 100 nm'dir. Karbon nanotüplerin çoğu silikanın yüzeyine yaklaşık olarak diktir. (b) CNT filmini meydana getiren bir CNT'nin Yüksek Çözünürlüklü TEM görüntüsü, 0,34 nm'lik bir tabaka aralığı olan yaklaşık 40 eşmerkezli grafitli kabuktan oluşmaktadır. Tüpün iç ve dış çapları sırasıyla 4 ve 34 nm'dir (Li vd., 1996).

Düz, iyi hizalanmış ve ayrılmış CNT dizileri, 666 °C'nin altında bir plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buhar çöktürme yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde 1998 yılında üretilmiştir. Nikel kaplamalı cam üzerinde birkaç santimetrekareye kadar olan alanlara dizilmiş ve çok düz yapı göstermiştir. Katalitik nikel nano partikülleri radyo frekansı magnetron püskürtme ile üretildiğinden, nano partiküller cam substrat üzerine rasgele dağıtılmış ve dikey CNT'ler cam yüzeyde rastgele gelişmiştir. Daha sonra, CNT'lerin büyük periyodik dizileri, elektron demeti litografisi ile hazırlanan nikel noktalarının periyodik dizileri üzerinde plazma ile güçlendirilmiş sıcak filament CVD ile büyütülmüştür. Periyodik katalitik nanopartikülleri ucuza elde etmek için, polistiren mikrosfer litografi geliştirilmiştir. O zamandan itibaren, dikey olarak yetiştirilen CNT'ler kontrol altına alınmıştır. Bu hizalanmış CNT'ler, alan emisyonu göstergeleri, fiziksel ve biyolojik sensörler vb. gibi geniş uygulamalara sahiptir (Ren vd., 2013).

## 2.2. Sentez Yöntemleri

Tarihsel olarak, karbon nanotüp üretimi için en eski yöntem elektrik ark deşarjıdır. Bu teknik, altmışlı yılların başlarında, karbon liflerinin sentezi için R. Bacon tarafından kullanılmıştır. Aynı teknik, Krätschmer ve Huffman tarafından iyi verimlerde fullerenler üretmek için 1990 yılında uyarlanmıştır ve daha sonra bu yöntem geliştirilmiş ve sonrasında MWNT ve SWNT karbon nanotüplerin sentezi için uygulanmıştır. Karbon nanotüp üretiminde lazer buharlaşma/ablasyon ve CVD gibi diğer yöntemler de başarılı

bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Lazer buharlaştırma işlemi teknik olarak ark deşarj yöntemiyle benzerdir. Bu iki yöntem arasındaki fark, elde edilen ürünlerin kalitesi ve saflığıdır. Bununla birlikte, ark deşarjı ve farklı CVD tipleri karbon nanotüplerin büyük ölçekli üretiminde en umut verici ve en yaygın tekniklerdir (Szabó vd., 2010). Sentezin, yüksek saflıkta istenmesi, düşük sıcaklıklarda çalışmak istenmesi ve üretim kapasitesinin artırılması üzerine yapılan çalışmalardan ortaya çıkan yöntemler; katı halde olan karbondan ve gaz halde bulunan karbondan sentez şeklinde sınıflandırılmıştır (Küçükyıldırım ve Eker, 2012).

### **2.2.1. Katı karbon kaynağı temelli sentez yöntemleri**

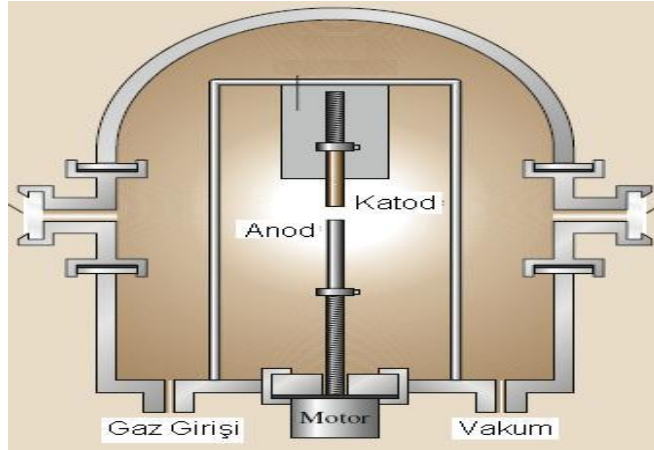
CNT'lerin üretilmesinin bir yolu, yüksek sıcaklık ( $T > 5000K$ ) gereken bir proseste katı karbon kaynağını (genellikle grafit) buharlaştırmaktır. Bunun için lazer ablasyon, doğru akım (DC, direct current) elektrik ark, solar fırın gibi çeşitli teknikler kullanılmıştır. DC elektrik ark tekniğinin aksine, diğer yöntemler dayanıklılık açısından daha zayıf olduğu için neredeyse terk edilmiştir.

Elektrik ark deşarjı yöntemi, inert gaz atmosferinde düşük basınçta karbon buharlaşmasına dayanmaktadır. Karbon nano yapılarının ve SWNT verimlerinin morfolojileri, özellikle deney koşullarına göre farklılık göstermektedir. Elektrik ark deşarjı, fullerenlerin nispeten büyük miktarlarda üretilmesinin ilk yöntemidir ve halen kullanılmaktadır. Fullerenlerle birlikte oluşturulan diğer karbon nano yapılarını ve özellikle katot üzerinde oluşan katı karbon birikimini araştırırken, Iijima, mükemmel MWNT tipi CNT'lerin katalizsiz oluşumunu keşfetmiştir. Daha sonra, büyüme sırasında metallerle MWNT'leri doldurmaya yönelik bir girişimde, geçiş metali miktarları anot içine sokulduktan sonra, SWNT'lerin katalizör destekli oluşumu tesadüfi olarak keşfedilmiştir. O zamandan beri, MWNT veya SWNT'lerin sentezinde nanotüp büyümesinin mekanizmalarını anlamak için bu tekniği kullanan birçok grup tarafından çok fazla çalışma yapılmıştır. Bu yüksek sıcaklık tekniğinde yer alan farklı mekanizmalar nano saniyeden mikro saniyelere ve hatta milisaniyeden farklı zaman ölçeklerinde gerçekleşmektedir.

Elektrik ark yöntemi, elektrot ve plazma arasındaki etkileşimden kaynaklanan enerji transferine dayanmaktadır. Bu sentez tekniğinin avantajlarından birisi, yüksek sıcaklık ortamının bileşimini değiştiren ve sonuç olarak en ilgili plazma özelliklerinin belirlenmesine olanak tanıyan çok çeşitli parametrelerin değiştirilebilmesidir, böylece CNT oluşumunun kontrolü için en uygun koşullar sağlanmaktadır. Bununla birlikte, bu

teknik ve SWNT'lerin üretilmesinde kullanılan başka herhangi bir teknik önemli bir dezavantajı, oluşturulan SWNT'lerin saf olmayışıdır. Sebebi ise, diğer karbon fazlarıyla ve katalizörün kalıntılarıyla ilişkilidir. Saflaştırma işlemleri mevcut olmasına rağmen, bunların hepsi SWNT yapısını önemli ölçüde etkileyecek olan  $\text{HNO}_3$  veya havadaki ısıtma işlemleri gibi oksidasyon işlemlerine uzanmaktadır.

Bu yöntemde; demir, nikel, kobalt, itriyum, bor, gadolinyum veya seryum gibi çeşitli elementler katalizör olarak kullanılmaktadır. En yüksek verimler bir geçiş metali (tipik olarak Ni) ve bir nadir toprak (tipik olarak itriyum) olmak üzere iki metalli katalizör kullanılarak elde edilmektedir. İnert gaz atmosferi, argon veya tercihen helyumdan oluşmaktadır. Görsel 2.4.'te bir reaktör örneği gösterilmiştir. Yaklaşık 30 cm çapında bir silindir ve yaklaşık 1 m yüksekliğindeki iki kapaktan oluşmaktadır, biri haznenin birincil tahliyesini gerçekleştirmek, diğeri de arzu edilen çalışma basıncına kadar nadir bir gazla doldurmak için kullanılır. Reaktörün farklı bölgelerinde karbon nano formlar bulunmaktadır. Reaktör yatay veya dikey olarak tasarlanabilmektedir. Dikey oluşunun avantajı, konveksiyon akışları ile ilgili bilgisayar modellemesini kolaylaştıran yer çekimi ile ilgili simetridir (Brushan, 2017).



**Görsel 2.4.** Elektrik ark deşarjı reaktörünün şematik çizimi (Küçükyıldırım ve Eker, 2012).

### 2.2.2. Gaz karbon kaynağı temelli sentez yöntemleri

Genellikle katalitik kimyasal buhar çöktürme (CCVD, Catalytic Chemical Vapour Deposition) olarak adlandırılan bir gaz halindeki karbon kaynağının (genellikle hidrokarbonlar, CO) katalizörle güçlendirilmiş termal çatlamasının, bir yüzyıldan uzun

bir süredir karbon nanofilamentler ürettiği bilinmektedir. Önceki çalışmalarda, karbon nanofilamentleri esas olarak, katalizör içermeyen CVD işlemlerinde kalınlaştırma yoluyla buharla büyütülmüş karbon fiberler olarak adlandırılan daha büyük (mikrometrik) karbon fiberlerin büyümesi için bir çekirdek substrat olacak şekilde üretilmiştir. Daha sonra 1990'lardaki girişimler, CCVD tarafından CNT'lerin tek veya çok duvarlı sentezine odaklanmıştır. Bu yöntem, eğer katı bir substrat söz konusu ise heterojen bir yöntemle veya her şey gaz fazında gerçekleşirse homojen bir süreçle karbon içeren bir kaynağın küçük metalik parçacıklar veya kümeler üzerindeki katalitik ayrışmasını içermektedir. Bu reaksiyonlarda genellikle kullanılan metaller Fe, Co ve Ni gibi geçiş metalleridir. Bu yöntemle hazırlanan CNT'ler genellikle ark deşarjı (birkaç mikrometre) ile elde edilenlerden çok daha uzundur (birkaç on ila yüzlerce mikrometre). CCVD süreçleri, tipik olarak 600-1000°C arasındaki sıcaklıklarda çalışılan bir yöntemdir. Ark deşarjı gibi katı karbon kaynağı bazlı yöntemlerle karşılaştırıldığında, tercihen grafitli parçacıklar ve amorf karbon gibi MWNT'lerin üretimi için yüksek seçiciliğe olanak sağlamaktadır. Buna karşılık, düşük reaksiyon sıcaklığı yapısal düzenlemelere izin vermediğinden ark deşarjı ile karşılaştırıldığında, üretilen MWNT'ler için daha fazla yapısal hatalara sahiptir. Bu kusurlar, sonraki ısı işlemleriyle vakum veya inert atmosferde giderilmektedir. CCVD, özellikle bir akışkan yataklı reaktörde gerçekleştirildiğinde ve endüstriyel ölçekli düşünüldüğünde, CNT üretiminde önemli bir role sahiptir. Özellikle seri üretim ve düşük maliyet konusunda çok iyi olanaklar sunmaktadır (Brushan, 2017).

#### **2.2.2.1. Heterojen süreçler**

Heterojen CCVD işlemleri, bir fırında Fe, Co ve Ni gibi küçük geçiş metali parçacıkların üzerinde belirli bir oranda hidrokarbon (esas olarak CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> veya C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, genellikle H<sub>2</sub> veya Ar gibi inert bir gazla karıştırılmış olarak) içeren bir gaz akışının geçirilmesini içerir. Ayrıca, hidrokarbonlar yerine CO de kullanılabilir. Parçacıklar, üzerinde metal parçacıkların bir süspansiyonunu ya da başka bir yöntemle püskürtmek suretiyle bir inert substrat üzerine çökeltir. Reaksiyon, katalizörle güçlendirilmiş termal çatlama olarak tanımlanır ve on dokuzuncu yüzyılın sonlarından beri kullanılmaktadır. SWNT'ler ve MWNT'ler için oluşum mekanizmaları oldukça farklı olsa da; sıcaklık, işlem süresi, gaz bileşimi, akış hızı, katalizör ve katalizör boyutu gibi katalitik proses parametrelerinin birçoğu oluşan nanotüp tipinde benzer roller oynamaktadır. Belirli bir sıcaklıkta, esas olarak katalizörün ve karbon içeren gazın yapısına bağlı olarak, önce metal parçacıklarının yüzeyinde katalitik ayrışma

gerçekleşmekte, ardından karbon konsantrasyonu çözünürlük sınırını aşana kadar yeni üretilen karbonun yüzey veya hacim difüzyonu ile kütle taşınımı gerçekleşmektedir.

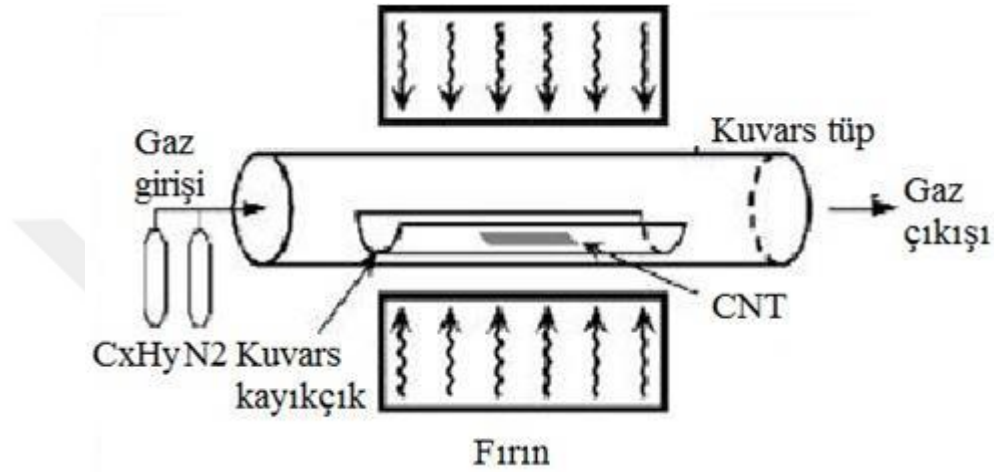
CCVD CNT'ler, genellikle nanometre aralığındaki çok küçük metal partiküller üzerinde oluşmaktadır. Bu katalitik metal parçacıkları, esas olarak, karbon içeren gazın gerekli olduğu nanotüp oluşumu aşamasından önce  $H_2$  ile geçiş metali bileşiklerinin (tuzlar, oksitler) indirgenmesinden meydana gelmektedir. Bu katalitik metal partiküllerini, karbon kaynağının varlığında yerinde üretmek mümkündür, bu da prosesin tek adımda gerçekleşmesine izin vermektedir. Metal parçacık boyutunun kontrol edilmesi önemli bir konudur. Kaynaşma, genellikle düşük konsantrasyonlarda katalitik metal öncülerinin kullanılması veya metal parçacıkların bir oksit ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , zeolit,  $MgAl_2O_4$ ,  $MgO$ ) gibi inert bir destek üzerine veya daha nadiren grafit üzerinde yerleştirilmesiyle önlenir. En kolay ve en sık kullanılan yol, desteklenmiş katalizörleri gaz akışına yerleştirilen statik bir faz olarak kullanmaktır.

CCVD ile saf nanotüplerin elde edilmesi, diğer tüm tekniklerde olduğu gibi katalizörün ayrıştırılmasını gerektirmektedir. Katı bir çözelti içinde desteklenen katalizörlerde, destekleyici ve katalitik olarak aktif olmayan oksit, hem ağırlık hem hacim olarak ana kirliliktir.  $Al_2O_3$  veya  $SiO_2$  gibi oksitlerin uzaklaştırılması zararlı işlemler gerektirmektedir.  $Al_2O_3$  için KOH ve NaOH'nin sıcak çözeltileri veya  $SiO_2$  için asidik bir HF çözeltisi yapılması gereklidir. Bununla birlikte, bu tür arıtmaların amorf benzeri karbon, grafitleştirilmiş karbon parçacıkları, karbon kabukları ve diğer karbon formları üzerinde hiçbir etkisi yoktur (Brushan, 2017).

#### **2.2.2.2. Homojen süreçler**

Yüzey katalizör metodu olarak da adlandırılan homojen süreç, diğer CCVD bazlı metotlardan farklıdır çünkü sadece katalizör ve karbon prekürsörleri olarak gaz türlerini kullanmaktadır. Mekanizmaları diğer CCVD işlemlerine benzer olan bu tekniğin temel prensibi, katalizör parçacıklarının bir gaz öncüsü yardımıyla yerinde üretilmesi ve daha sonra CNT'lerin elde edilmesi için bir gaz halindeki karbon kaynağının ayrıştırılmasıdır. Bu teknikte kullanılan tipik reaktör (Şekil 2.1), metal prekürsörü, karbon kaynağı, bazen hidrojen ve bir vektör gazı ( $N_2$ , Ar veya He) içeren gazın bir fırın içine yerleştirilmiş bir kuvarz tüpe beslenmesidir. Reaktörün birinci bölgesi, katalizör parçacıklarını üretmek için daha düşük bir sıcaklıkta tutulur ve ikinci bölge, CNT'leri oluşturmak için 700-1200°C'ye ısıtılır. Metal prekürsörü, genellikle,  $Fe(CO)_5$  gibi diğer elementlerle

tepkimeye girmeyen bir karbonil bileşiği olan metal organik bir bileşik veya ferrosen, nikelosen veya kobaltosen gibi bir metalosendir. Son çalışmalarda, ferrosen, etanol veya benzende seyreltilmekte ve sıvı çözelti, hem metal hem de karbon öncülerini içeren bir gaz karışımı oluşturmak için reaktörün girişinden hemen önce veya girişinde buharlaştırılmaktadır. Kobalt nitrat gibi metal tuzlarının kullanılması da literatürde görülmüştür.



Şekil 2.1. Kuvarts tüp CCVD reaktörünün şematik çizimi (Özkan vd., 2018).

Bu teknik oldukça değişkendir ve karbon besleme gazına bağlı olarak CNT'ler farklı boyutlarda elde edilmektedir. Bu işlemin temel dezavantajı, metal nano partiküllerin büyüklüğünü kontrol etmenin zorluğudur. Bu nedenle CNT oluşumuna çoğu zaman istenmeyen karbon formlarının üretimi eşlik etmektedir. İstenen CNT'lerin morfolojisi ve yapısını titizlikle elde etmek için heterojen CCVD işlemleriyle aynı olan; karbon kaynağı seçimi, reaksiyon sıcaklığı, gelen gaz halindeki hammaddenin bileşimi, hidrojenin varlığı ve oranı gibi proses parametreleri iyi kontrol edilmelidir (Brushan, 2017).

### 2.2.2.3. Kalıplama tekniği

Kalıplama tekniği, bir katalizör olmaksızın CNT'leri sentezleyebilen elektrik ark deşarjı tekniğinden başka tek yöntemdir. Bu yaklaşımın bir başka yararlı yönü, substrat çıkarılmadığı sürece, hizalanmış nanotüplerin doğal olarak elde edilmesine izin vermesidir. Bu tekniğin prensibi, CVD yönteminden elde edilen katı karbon kaplamanın gözeneklerinin paralel kanallarda düzenlenmiş olan gözenekli bir substratın duvarları

üzerine çökertilmesidir. Substrat, örneğin doğal kanal gözenekleri sunan alümina veya zeolit olabilir, tüm sistem karbon kaynağı olarak seçilen hidrokarbon moleküllerini kırarak bir sıcaklığa ısıtılmaktadır. Kimyasal buhar çöktürme mekanizmasının iyi kontrol edilmesi şartıyla, sentez, kanal gözenek duvarlarında değişken sayıda grafenle kaplanmaktadır. Bu yöntemle, eş merkezli MWNT'ler veya SWNT'ler elde edilmektedir. Elde edilen en küçük SWNT'ler (çaplar 0-4 nm) bu teknik kullanılarak sentezlenmiştir. Nanotüp uzunlukları doğrudan kanal uzunlukları, diğer bir deyişle substrat plakasının kalınlığı ile belirlenmektedir. Tekniğin en temel avantajı, katalizör kalıntıları ve birkaç diğer karbon fazı olmaksızın tüplerin saflığı ve iyi kalibre edilmiş, tek değerli çaplarıdır. Nanotüpün yapısı, bir ucunda veya her ikisinde açık olup, uygulamaya bağlı olarak bir avantaj veya dezavantaj olabilir. Kimyasal saldırılara karşı onları daha hassas hale getirebilir. Gözenekli matris, gerektiğinde tüpleri kurtarmak için saklanabilir veya çözülebilir. Vurgulamak gerekir ki, bu yöntem seri üretim için uygun değildir (Brushan, 2017).

### **2.2.3. Yaygın Olmayan Diğer Yöntemler**

Lazer ablasyon prosesi için, bir grafit pelet içeren katalizörler, odaklanmış bir lazer ışını kullanılarak buharlaştırılmaktadır (Brushan, 2017). Bu yöntem ilk olarak 1995 yılında, Rice Üniversitesinde keşfedilmiştir. Lazerle buharlaştırılan grafitten çıkan karbon kümeleri, helyum veya argon içeren soygaz ortamında su soğutmalı bakır toplayıcı üzerinde biriktirilmektedir. Bu birikimde karbon nanotüpler olduğu gibi, bir miktar da olsa nano parçacık bulunmaktadır (Küçükylıdırım ve Eker, 2012). Bu yöntemin iyileştirilmesi, daha iyi pelet ışınlanması veya aynı anda ışınlanmış iki peletin (biri grafit ve bir tanesi katalizörden yapılmış) kullanılması için ikinci bir darbeli lazerin kullanımını içermektedir. Lazer bazlı yöntemler, yüksek kaliteli SWNT'lerin üretimi için uygun olsa da, uzun vadede CNT'lerin düşük maliyetli üretimi için rekabetçi olarak kabul edilmemektedir (Brushan, 2017).

Üç fazlı alternatif akım (AC, alternative current) ark plazma, karbon nano malzemelerin yapımı için kullanılmıştır. Üç grafit elektrot arasında, 600 Hz'de çalıştırılan üç fazlı AC güç kaynağı ile 250-400A ark akımları arasında bir elektrik arkı kurulmuştur. Karbon prekürsörleri, gaz halinde, sıvı veya katı, istenen (değişken) pozisyonda plazma bölgesine enjekte edilmektedir. Bu plazma teknolojisinin, karbon siyahlarından

CNT'lere, yüksek ürün seçiciliğine sahip fullerenlere kadar geniş bir yelpazede karbon nano yapıları üretmek için kullanılabileceği kanıtlanmıştır (Brushan, 2017).

Solar fırınlı cihazlarda, solar ışınları nötr bir gaz odasında katalizörler içeren bir grafit pelet üzerine odaklandırılmaktadır. Birkaç grup tarafından ilk olarak fulleren üretmek için kullanılmış ve daha sonra cihazlar CNT üretimi gerçekleştirmek için değiştirilmiştir. SWNT'lerin 0,1-0,2'den 10 g/sa ve ardından mevcut fırınlar kullanarak 100 g/sa'te kadar büyümesi bu yöntemin çok yönlü olduğunu göstermektedir. Ürün kalitesini arttırmak için sayısal bir reaktör simülasyonu yapılmış ve daha sonra kurum içinde %40 SWNT'ye ulaşıldığı gözlemlenmiştir (Brushan, 2017). İşlem sıcaklıkları 4000°K düzeyinde olan bu yöntem düşük verime sahip olduğundan pek tercih edilmemekte ve hatta pek çok kaynakta bu yönteme değinilmemektedir. Yöntemin en önemli yanı güneş enerjisini kullanarak sentezin gerçekleştirilmesidir (Küçükyıldırım ve Eker, 2012).

Hidrotermal sentezleme yönteminde, çeşitli teknikler kullanılarak yüksek basınç altında bir sulu çözeltiden maddeler kristalize edilmektedir. Kristal büyümesi, besleyici malzemenin su ile beraber yollandığı çelikten yapılmış basınçlı bir kap olan otoklav içinde gerçekleşmekte ve odanın karşılıklı tarafları farklı sıcaklıklarda olmaktadır. Bu sayede sıcak tarafta besleyici madde çözülürken, soğuk tarafta büyüme sağlanmaktadır. Basit ve karmaşık oksitler, tungstatlar, molibdetler, karbonatlar, silikatlar, germanatlar gibi farklı sınıflara ait birçok bileşik, hidrotermal koşullarda üretilmektedir. Hidrotermal sentezleme karbon malzemelerin üretiminde de önemli bir yöntem olmuştur ve yapılan hidrotermal deneylerde içi boş bazı karbon yapılarına rastlanmıştır. Yöntemin uygulandığı deneylerde yüksek yoğunluklu polietilen levha ya da etilen glikol, su ve nikel tozu kullanılmış, bunlar altın kapsüller içinde yüksek basınç ve sıcaklık altında tepkimeye uğratılmış ve sonuç olarak, çapları 10 nm ila 1,3 µm arasında değişen çok duvarlı tüpler elde edilmiştir. Oluşan tüplerin oldukça düzgün sıralanmış grafitik duvar yapılarına ve geniş kanallara sahip olduğu görülmüştür. Hidrotermal karbon tüplerinin sentezlenmesi, karbon, oksijen ve hidrojen atomlarının gerekli oranının sağlanması dışında kullanılan karbon kaynağının çeşidine bağımlı değildir. Her ne kadar nikel katalizörü işlem için zorunlu gözüксе de, grafitin büyümesinin nikel ile ilişkili olmadığı görülmüştür. Ortamdaki suyun büyük iç kanalların ve yüksek grafitik yapının oluşumundan sorumlu olduğu bulunmuş vesu olmadan yapılan uygulamalarda daha az grafitik yapı ve çok sayıda kapalı içyapıların oluşumuyla karşılaşmıştır (Küçükyıldırım ve Eker, 2012).

MWNT'ler, anot olarak bir grafit pota ve katot olarak bir grafit çubuk arasında 3-5 A'lık bir akım çalıştırarak katalizörsüz (Li mevcut olmasına rağmen) elektrolitik yöntemle başarılı bir şekilde üretilmiştir. Grafit potası lityum klorür ile doldurulmuş, tüm sistem havada ya da argonda 600°C'de ısıtılmıştır. Diğer birçok teknikte olduğu gibi, kapsüllenmiş metal partiküller, karbon kabukları, amorf karbon ve benzeri ürünler oluşmuştur.

Sitrik asitin 50°C'de etilen glikol üzerine poliestерleştirilmesi, ardından 135°C'de polimerizasyon ve argon altında 300°C'de karbonizasyon, ardından 400°C'de havada oksidasyonu ile saf bir kimyasal yol önerilmiştir. İkinci oksidasyon aşamasına rağmen, katı ürün zayıf nano dokulara sahip olsa da kısa MWNT içermektedir. Karbon kabukları ve amorf karbon gibi ürünler de oluşmaktadır.

Difüzyon alev sentezi de denenmiş yöntemler arasındadır. Ferrosen buharı ile birlikte düzenli bir gaz halindeki hidrokarbon kaynağı (etilen ve diğerleri), hava ve 500-1200°C sıcaklıktaki CH<sub>4</sub>'ten türetilmiş bir laminar difüzyon alevi içerisine geçirilmiştir. Kapsüllenmiş metal parçacıkları, kurumlar ve benzerleri ile birlikte SWNT'ler oluşturmuştur. Düşük verime ek olarak, SWNT yapısı oldukça zayıf bulunmuştur.

Son olarak, bir demir katalizör destekli yüksek sıcaklıkta bir elektrokimyasal reaksiyonla CO<sub>2</sub>'nin SWNT'lere ayrışmasına dayanan Graphetron 1.0 prosesi olarak adlandırılan yeni ve orijinal bir teknoloji mevcuttur (Brushan, 2017).

### **2.3. Karbon Nanotüplerin Çevre ve Sağlık Üzerine Olan Etkileri**

Son yıllarda, mühendislik nano materyalleri ve nano teknolojileri, yaşam kalitesini artırmış, ekonomik büyümeye katkıda bulunmuş ve küresel olarak endüstrinin rekabet gücünü arttırmıştır. CNT'ler, yüksek özgül yüzey alanı, mukavemet, iletkenlik, manyetik duyarlılık ve katalitik aktivite gibi benzersiz fiziksel, kimyasal ve elektronik özelliklerinden dolayı nano materyaller arasında parlayan yıldızlardan biri haline gelmiştir. Mühendislik nano materyalleri yararlı özelliklere sahip olmalarının yanı sıra, aynı zamanda insanlara veya çevreye zararlı etkilere neden olabilmektedir. Mühendislik nano materyalleri yaşam döngüsü sırasında, bu malzemelerin üretimi, taşınması, uygulanması ve bertarafı sırasında yüzey suyu, atmosfer ve toprak dahil çevreye iz bırakılabilirler. CNT'lerin çevre ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel riskleri konusunda artan bir endişe vardır. Ancak, CNT'nin farklı ortamlarda veya insan sağlığına etkileri üzerine sistematik veri eksikliği, potansiyel riskleri ve CNT'lerin güvenliğini

değerlendirmeyi büyük bir zorluk haline getirmektedir. İşyerinde ve genel popülasyonda maruz kalmayla ilgili veri miktarı sınırlı olduğundan, CNT maruziyetinin risk değerlendirmesi pratik olarak mümkün olamamaktadır (Peng vd., 2017).

Endüstriyel uygulamalardaki CNT'lerin artan kullanım hacmi, elektronik, lityum-iyon pilleri, güneş pilleri, süper kapasitörler, termo plastikler, polimer kompozitleri, kaplamalar, yapıştırıcılar, biyosensörler, geliştirilmiş mikroskopi görüntüleme ve mürekkepleri kapsamaktadır. Ek olarak, CNT'ler; kemik greftleme, doku onarımı, ilaç verme ve hastalık teşhisi için farmasötik/biyomedikal cihazlarda da kullanılmaktadır. Küresel ticari pazarda, 2013 yılında MWCNT'ler için üretim yaklaşık iki bin ton ve SWCNT'ler için altı ton olup, 2022 yılında bu üretimin toplam değeri 3,42 milyar ABD doları olarak tahmin edilen yirmi bin tonu (SWCNT ve MWCNTs) aşması beklenmektedir. Çin, Japonya, ABD ve Hindistan hükümetleri yerel nanoteknolojiyi teşvik etmek için araştırma fonlarını artırmıştır. Önümüzdeki yıllarda CNT pazarı için yeni yolların açılması beklenmektedir. CNT'lerin giderek artan uygulama alanları ve daha yüksek üretim oranları şüphesiz ki çevre ve insan maruziyetinin artmasına neden olacaktır (Peng vd., 2017).

Maynard vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada bir laboratuvar üretim tesisinde rafine edilmemiş CNT' nin işlenmesinin etkisi araştırılmış ve eldivenler üzerindeki CNT birikintilerinin el başına yaklaşık 0,2-6 mg olduğu bulunmuştur, bu da korumasız vücut bölgelerinde dermal maruziyetin meydana geldiğini göstermektedir. Bu nedenle, CNT'lere dermal maruziyeti en aza indirmek için koruyucu giysi kullanılması önerilmiştir. Solunum yolu, üretim ve kullanım sırasında CNT'lere maruziyetin en olası yoludur. Aynı kütle dozunda daha büyük solunabilir parçacıklarla karşılaştırıldığında, nano tanecikli partiküller (<0,1 mm çap), derin pulmoner bölgelerde daha yüksek birikime sahiptir. Ultra ince ortam havası partiküllerinin, hava yollarına erişim sağladıklarında önemli sağlık riskleri oluşturduğu kanıtlanmış bir olaydır. Tartım, aktarma, karıştırma veya sonikasyon gibi işlemler işyerinde aerosol haline getirilmiş CNT'lerin maruziyetine yol açabilir. Ayrıca CNT'lerin, düşük yoğunluklarından dolayı havada asılı kalmaları solunmasına neden olabilir. Solunan CNT'ler solunum yolunun epitelyumundan interstisyuma geçebilir ve doğrudan veya lenfatik yollarla kan dolaşımına erişebilir ve yan etkilere neden oldukları merkezi sinir sistemi, karaciğer, dalak ve böbrek gibi diğer organ ve dokulara ulaşabilir. Bu nedenle, işyerlerinde havadaki

CNT parçacıklarından kaçınılmalı veya mesleki ortamlarda CNT'lere teneffüs maruziyetini sınırlamak için koruyucu önlemler alınmalıdır.

CNT nano partiküllerinin akciğer, deri, kardiyovasküler sistem ve bağışıklık sistemi dahil olmak üzere birçok organ ve sistem üzerinde zararlı etkileri olduğu görülmektedir. Bu etkiler inhalasyon, sindirim ve CNT'lere maruz kalma yoluyla ortaya çıkmaktadır. Eşsiz fizikokimyasal özelliklerinden dolayı, CNT'ler ayrıca genotoksositeye neden olarak bu bölümlerden geçme potansiyeline sahiptir. Birkaç çalışma CNT'lerin kanserojen olduğunu göstermiştir. Buna ek olarak, çevreye salınan CNT'ler, organik ve inorganik kimyasallar ve hümitik asitler gibi doğal bileşikler de dahil olmak üzere çeşitli kontaminantlarla birlikte yaşama eğilimindedir ve bu da büyük ölçüde CNT'lerin yaşam sistemlerinde davranışlarını değiştirmiştir. Bu alanlarda, CNT'lerin ve altta yatan mekanizmaların toksisitesini daha iyi anlamak için daha fazla çaba sarf edilmesi gerekmektedir ve en önemlisi, CNT'ye maruziyet ve toksisiteyi kontrol etmek için daha etkili müdahale ölçümleri sağlanmalıdır. İnsan sağlığı ve çevre üzerindeki potansiyel olumsuz etkilerinin riski, nanoteknolojilerin sürdürülebilir gelişimi için araştırılmalıdır (Peng vd., 2017).

### **3. YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ (LCA) VE PARASALLAŞTIRMA**

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 (Tok, 2016).

Parasallaştırma, sosyal ve biyofiziksel etki önlemlerinin para birimlerine dönüştürülmesi uygulamasına verilen isimdir. Parasallaştırma dışsallıklar kavramı ile ilgilidir. Dışsallıklar, bir ürünün/prosesin ekonomik faaliyetlerinden kaynaklanan ve hesaplanamayan maliyetler ve faydaların tümü olarak nitelendirilmektedir. Ekonomik açıdan “optimal” kaynak tahsisi olarak tanımlanan şeyi elde etmek için dışsallıklar içselleştirilmeli ve ilgili karar almada hesaba katılmalıdır. Ayrıca parasallaştırma, insan yaşamının mutlak değerinin bir ölçüsünü sağlamaya çalışmak yerine, bireylerin küçük bir değişiklik için ödemek istedikleri değeri ölçmek istemektedir. Yaygın karar destek aracı olan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde (LCA) parasallaştırma yaygın olarak uygulanmamaktadır (Çapa, 2019).

#### **3.2. Uluslararası Uyum ve Standardizasyon**

##### **3.2.1. Bilimsel iş birliği ve fikir birliği oluşturma**

Çevresel Toksikoloji ve Kimya Birliği (SETAC, Society of Environmental Toxicology and Chemistry), 1990 yılında “Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi için Teknik Çerçeve” konulu bir çalıştay düzenlemiştir (SETAC 1991). Bu ilk etkinliği, LCA metodolojisinin merkezi unsurlarını hedefleyen bir dizi çalıştay izlemiştir. Hollanda'daki Leiden'de (1991) (SETAC 1992), Sandestin Florida'da (SETAC 1993a) ve Wintergreen'de (1992) (SETAC 1994), LCA metodolojisi ortak bir çerçeve geliştirmek ve ilke ve araştırma ihtiyaçları üzerinde uzlaşmak amacıyla tartışılmıştır. Bu seri, 1993 yılında Portekiz'in Sesimbra kentinde düzenlenen ve LCA için ilk resmi kılavuz ilkelerin (SETAC 1993b) geliştirilmesine yol açan bir Uygulama Tüzüğü çalıştayıyla sonuçlanmıştır.

1990'ların geri kalanı boyunca, Avrupa ve Kuzey Amerika'daki SETAC çalışma grupları, özellikle envanter modelleme ve yaşam döngüsü etki değerlendirmesine

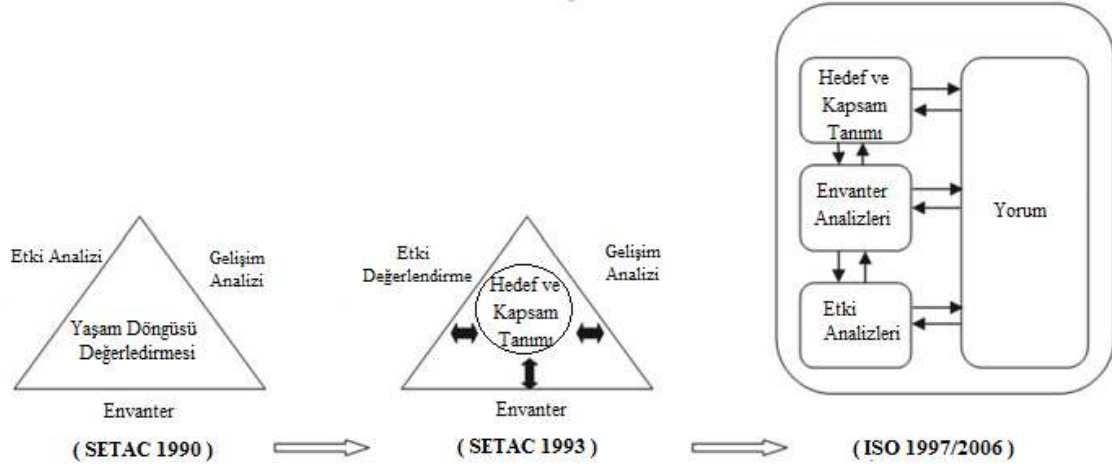
odaklanan metodolojik unsurları tartışmıştır. Kararlaştırılan durumu ortaya koyan ve ileri araştırmalar için öneriler sunan SETAC, çalışma grubu raporlarında düzenli olarak önerilerini yayınlamıştır. Çalışma grupları, LCA yöntemlerini geliştiren farklı araştırma ekipleri arasındaki işbirliğinin geliştirilmesine ve işbirliğinin güçlendirilmesine yardımcı olmuş ve 1990'larda LCA metodolojisindeki güçlü gelişmelerde önemli rol oynamışlardır. Bu uluslararası forumdaki çalışmalar, Nordik LCA Kılavuzu (Nordic LCA Guideline) projesi, Hollanda LCA Rehberi (The Dutch LCA Handbook) ve Danimarkalı EDIP projesi gibi birçok önemli ulusal ve bölgesel metodoloji geliştirme projesi üzerinde yoğunlaşmaktaydı.

1990'ların sonunda, SETAC çalışma grubunun önde gelen araştırmacıları, yaşam döngüsü etki değerlendirmesi hakkında, iyi bir LCA uygulamasının ve Avrupa, Kuzey Amerika ve Japonya'nın ötesinde küresel yayılımın daha da geliştirilmesi için bir ortaklık oluşturmak üzere Birleşmiş Milletler Çevre Programı'na (UNEP, United Nations Environmental Program) ulaşmıştır. UNEP/SETAC Yaşam Döngüsü Girişimi 2002 yılında başlatılmış ve değişen çalışma grupları SETAC'ın yöntem geliştirme faaliyetlerini devralmış ve eğitim materyallerinin geliştirilmesi ve araçlara erişim ile destek yoluyla yaşam döngüsü uygulamalarının gelişmekte olan ekonomilere yayılmasına odaklanmıştır. Metodolojik öneriler, UNEP/SETAC Yaşam Döngüsü Girişimi kapsamında resmi bir gözden geçirme prosedürüyle daha otoriter bir statü kazanmıştır (Hauschild vd., 2018).

### **3.2.2. Ulusal standardizasyon**

1993 yılında LCA için SETAC uygulama pratiğinin geliştirilmesinden sonra, önceki yılların başarılarına dayanan LCA için küresel bir standart geliştirmek üzere Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) himayesinde resmi bir standardizasyon süreci başlatılmıştır. Standart, giderek daha yeşil ürünlerin geliştirilmesi ve pazarlanması için LCA'yı kullanmak isteyen sektörden gelen endişeleri karşılamayı amaçlamaktaydı. Ancak standartta, bir metodoloji eksikliğinin, aynı ürünün farklı çalışmalarının, somut metodolojik seçimlere bağlı olarak zıt sonuçlar verebileceği görülmüştür. Standart geliştirme, yedi yıl içinde ilkelerin ve çerçevenin (ISO 14040), hedef ve kapsam tanımının (ISO 14041), yaşam döngüsü etki değerlendirmesinin (ISO 14042) ve yaşam döngüsü yorumlamasının (ISO 14043) ele alındığı dört standardın benimsenmesi ve yayınlanmasıyla sonuçlanmıştır. 2006 revizyonunda, tüm standartlar, standartlarda

herhangi bir gereksinimi değiştirmeden gereklilik ve yönergeleri detaylandıran ISO 14044 standardında derlenmiştir. LCA erevesinin gelişimi şekil 3.1’de gösterilmiştir.



şekil 3.1. LCA erevesinin gelişimi (Curran, 2017).

ISO 14040 serisi standartlar LCA metodolojisine, ISO 14000 serisi ise evre Yönetimi standartlarına uygundur. LCA’nın uygulamaları için ayrıca eko tasarım (ISO 14062, ISO 14006), evresel performansın iletişimi (evre dostu logo zerine ISO 14020ve ISO 14063 serileri) ve sera gazı raporlaması ve azaltımı (ISO 14064) gibi konularda standartlar ve teknik kılavuz raporlar da vardır (Hauschild vd., 2018).

### 3.2.3. ISO standartlarının ötesinde metodolojinin standardizasyonu

LCA metodolojisi çok yeni ve henüz olgunlaşmamışken, ISO standardizasyon süreci 1990’larda gelişmiş ve bu nedenle ortaya çıkan standartlar çok fazla detay içermemektedir. Spesifik metodolojik tercihler yerine LCA’nın temel ilkelerine ve çerçevesine odaklanılmıştır. Bu da, UNEP/SETAC Yaşam Döngüsü Girişim çalışmasının alternatif uygulamaları değerlendirmek ve bilimsel bir bakış açısı ile öneriler geliştirmesinin nedenlerinden biridir. Ayrıca, Avrupa Komisyonu tarafından 2000’li yılların ortalarında, yaşam döngüsü envanter veri tabanıyla Uluslararası Yaşam Döngüsü Veri Sistemini (ILCD, International Life Cycle Data System) geliştirmek için başlatılan bir sürecin arka planıdır. Entegre rn Politikasının ve Sürdürülebilir Tüketim ve üretim eylem planının geliştirilmesiyle, LCA’nın güçlü bir metodolojik temeline ihtiyaç duyulmaktaydı. ISO standartlarının içerdiği belirsizlikler nedeniyle AB Komisyonunun

Ortak Araştırma Merkezi Çevre ve Sürdürülebilirlik Enstitüsü, ISO 14040 ve 14044 üzerine inşa edilen LCA'da kapsamlı bir kılavuz (EC-JRC 2010) geliştirmiştir. Bu kılavuzda 394 sayfadan fazlası ISO standartlarına açıklık bırakılmıştır. ILCD kılavuzuna bağlılık, farklı uygulamacılar tarafından gerçekleştirilen LCA'larda daha tutarlı ve tekrarlanabilir sonuçlarının elde edilmesini ve dolayısıyla farklı çalışmalardan elde edilen LCA sonuçlarının karşılaştırılabilirliğini arttırmayı amaçlamaktadır. ILCD çalışması ayrıca, mevcut tüm LCIA metodolojilerinin (2008 civarında) farklı orta nokta ve son nokta etki kategorilerinin değerlendirilmesine yönelik yaklaşımlarını karşılaştıran ve her etki kategorisi için karşılaştırmalı bir analizi de içermektedir. Her etki kategorisi için en iyi uygulamaların değerlendirilmesi ILCD etki değerlendirme yöntemi olarak derlenmiştir. 2012 yılında ILCD yönergelerinin yayımlanmasından sonra, AB Komisyonu, Ürün Çevresel Ayak İzi (PEF, Product Environmental Footprint) ve Kurumsal Çevre Ayak İzi (OEF, Organisational Environmental Footprint) Kılavuzlarını kısaltmıştır (Hauschild vd., 2018).

### **3.3. Kullanım Alanları ve Potansiyel Kullanıcı Grupları**

LCA, birçok ürün ve prosese uygulanabildiği gibi, ürün ve proses geliştirme, stratejik karar verme, eko-tasarım, ürün karşılaştırma, eko-etiketleme, pazarlama ve kamusal faaliyetler gibi bir dizi uygulama için de kullanılmaktadır. Günümüzde, farklı uygulayıcılar için ürünlerin yaşam döngüsü, farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Politik kararların alınmasında, eko-etiketleme için gerekli olan kriterlerin sağlanmasında, alıcılar için yeşil noktalı ürünleri tercih etme önerilerinde, şirket kararlarını desteklemede ve şirketlerde bir ürünün geliştirilmesinde sıklıkla LCA yönteminden yararlanılmaktadır. Ürünlerin geliştirilmesi ve çevresel etkilerin azaltılması için yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmaları; şirketlerin ve çalışanlarının çevre bilincini de geliştiren bir yoldur (Çokaygil, 2005).

Yürütülecek bir LCA çalışmasının başlangıcında amacının açıkça tanımlanmış olması çok önemlidir. İyi tanımlanmış bir amaç, çalışmanın kapsamını ve sınırlarını tanımlamaya yardımcı olmaktadır. 2006 ISO standardında, “çalışmanın kapsamının, derinliğinin ve detayının belirtilen hedefe ulaşmak için uygun ve yeterli olduğunu garantilemek için yeterince iyi tanımlanmalıdır” denilmektedir. İyi tanımlanmış bir amaç, gelecekteki veri toplama çabalarının yönlendirilmesinde de kritik öneme sahiptir. Bir LCA çalışmasının amacını ve kapsamını uygun bir şekilde tanımlamanın önemi

yadsınamaz. Bir LCA çalışması, karar vericilere, aşağıda verilen konular gibi bir takım önemli soruların cevaplanmasına yönelik yanıtların alınmasına yardımcı olmaktadır.

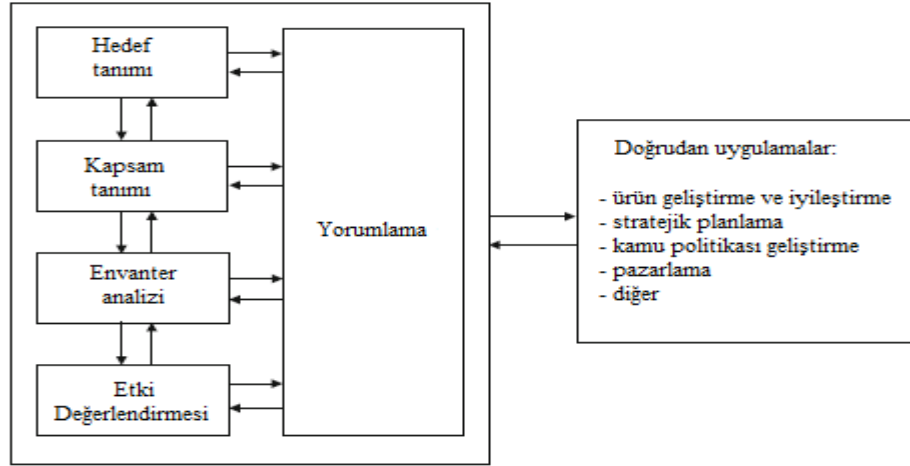
Örneğin:

- Bir ürün sisteminin belirli ilgili taraflara ve paydaşlara etkisi nedir?
- Hangi ürün veya süreç genel olarak veya yaşam döngüsünün her aşamasında en az çevresel etkiye neden olur?
- Mevcut sistemdeki değişiklikler tüm yaşam döngüsü aşamalarında çevresel etkileri nasıl etkileyebilir?
- Hangi teknoloji veya süreç en az miktarda asit yağmuru, fotokimyasal sis oluşumu veya ağaçlara (veya herhangi bir başka etki kategorisi) zarar verir?
- Sorunun çevresel etkilerini azaltmak için süreç nasıl değiştirilebilir? (Curran, 2017).

Firmalar, ticari birlikler, kamu kuruluşları, çevreciler ve tüketici kuruluşları gibi diğer kamu dışı kuruluşlar, LCA uygulamaları ve sonuçları ile ilgilenebilecek çeşitli kullanıcı gruplarıdır. Bu gruplar, çevre yönetimi ve harici amaçlar için LCA yönteminden yararlanabilirler. Harici amaçlar için kullanımı, yürütülen çalışmanın ayrıntı düzeyine bağlı olduğu gibi kullanılan veri ve metotların şeffaflık derecesine ve çalışmanın bütünlüğüne de bağlıdır. Çalışmanın amaç ve kapsamının belirlenmesi, sonuçların kamuoyu ile paylaşılması, sonuçlara dikkati çekilmesi istenen kitlenin eğitim düzeyi gibi faktörler de çalışmanın uygulama ve sınırlamalarına karar verirken göz önünde bulundurulması gereken konulardır. LCA çalışmaları, farklı uygulayıcılar için farklı amaçlar doğrultusunda yapılmaktadır. Örneğin; sanayide, stratejik planlama, ürün tasarımı veya bunların yenilenmesi ve geliştirilmesinde uygulanırken kamu sektöründe, idari düzenlemeler, araştırma projeleri ve kalkınma finansmanı gibi konulara karar verilirken uygulanmaktadır (Özdemir, 2013).

### **3.4. Sistemin Yapısı**

Şekil 3.2’de gösterildiği gibi ISO standardı, LCA’nın metodolojik çerçevesini; ürün geliştirme, eko-etiketleme, karbon ayak izi gibi çoklu farklı uygulamalarından ayırmaktadır. LCA çerçevesi, hedef ve kapsam tanımı, envanter analizi, etki değerlendirilmesi ve yorumlama olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır (Hauschild vd., 2018).



Şekil 3.2. ISO 14040 standardından uyarlanmış LCA çerçevesi (Hauschild vd., 2018).

### 3.4.1. Hedef ve kapsamın belirlenmesi

Hedef ve kapsam belirlenmesi yaşam döngüsü analizinin ilk aşaması olup, LCA'nın diğer aşamalarının gerçekleştirilmesinde güçlü bir etkiye sahip olması nedeniyle, kritik bir bölüm olarak ele alınmaktadır. Bu aşamada, LCA çalışmasının amaçları, sınır koşulları, hedef kitlesi ve çalışma sonrası beklentiler açık bir şekilde ortaya konulmalıdır (Özdemir, 2013). Hedef tanımı, LCA çalışmasının bağlamını belirlemekte ve değerlendirmenin öncelikli olarak hedef tanımına uygun olarak çerçevelendirildiği ve özetlendiği kapsam tanımının temelini oluşturmaktadır (Hauschild vd., 2018).

ISO 14040'a göre, bir LCA'nın hedefi şöyle ifade edilmiştir:

- İstenen uygulama,
- Karar bağlamı ve çalışmanın yürütülmesi için nedenler,
- İstenilen hedef kitle,
- Metodolojik seçimlerden kaynaklanan sınırlamalar,
- Özellikle çalışma, kamuya açıklanması amaçlanan karşılaştırmalı bir çalışmaysa, kritik gözden geçirme yapılması gerektiğini belirlemek,
- Çalışmanın yetkili kişisi ve diğer etkili aktörler.

Ayrıca standart, kapsamın aşağıdaki öğeleri içerdiğini belirtmektedir:

- Üzerinde çalışılacak ürün sistemi,
- Ürün sisteminin fonksiyonları,

- Fonksiyonel birimin tanımlanması: değerlendirmenin yapıldığı fonksiyon veya hizmetin nicel bir tanımı ve bir sonraki LCA fazı olan envanter analizinde veri toplanmasını ölçekleyen ürünün referans akışının belirlenmesinin temeli,
- Sistem sınırları,
- Paylaştırma (allocation) prosedürleri; Seçilen etki kategorileri ve etki değerlendirmesinin metodolojisi ve sonraki yorumlama,
- Veri gereksinimleri,
- Varsayımlar,
- Sınırlamalar,
- Başlangıç veri kalitesi gereksinimleri,
- Varsa, kritik incelemenin türü,
- Çalışma için gerekli raporun tipi ve formatı (Curran, 2017; Hauschild vd., 2018).

#### **3.4.1.1. Hedef**

Bir LCA gerçekleştirirken her yönün dikkate alınması gerekmektedir. Bütün LCA'lar, bir veya daha fazla ürün sistemi üzerinde çalışmayı içermektedir. Çeşitli uygulama alanları için hedef;

- Belirli malların veya hizmetlerin çevresel etkilerini karşılaştırmak,
- Çevresel etkilere (ürün geliştirmeye odaklanarak “etki nokta tanımlama”) katkıda bulunan bir ürünün sistem bölümlerini tanımlamak,
- Ürün tasarımlarındaki değişikliklerden iyileştirme potansiyellerinin değerlendirilmesi,
- Ürünlerin çevresel performansının belgelenmesi (örneğin, çevresel ürün deklarasyonu),
- Eko-etiket için kriterler geliştirmek ve
- Çevresel yönleri dikkate alan politikalar geliştirmek olabilir.

Metodolojik seçimlere bağlı kısıtlamalar, LCA sonuçlarının ne için kullanılabileceğinin ve kullanılamayacağının kritik bir yansıması olarak görülebilir. Bir çalışma sadece iklim değişikliğini kapsamıyorsa, çalışmanın, incelenen ürün üzerinde “çevre dostu olma” konusunda bir sonuca varmak için kullanılamayacağını vurgulamak

önemlidir. Örneğin, 1 ton alüminyum üretimini, madencilikten külçeye kadar 1 tonluk çelik üretimiyle karşılaştıran bir çalışma, bir otomobilde kullanmak için bu malzemeler arasında çevreye en duyarlı malzemeyi tanımlamak için kullanamaz. Çünkü iki metalin yoğunluk farkı, araç gövdesi için kullanılan metal miktarında ve araç kilometresindeki farklılıklara (kilometre başına yakıt tüketimi), kullanım aşamasında farklı çevresel etkilere ve son olarak da bertaraf aşamasında da farklılıklara yol açmaktadır.

Hedefin tanımı, çalışmanın hedef kitlesini, yani çalışma sonuçlarının iletilmesi amaçlanan kitlenin kim olduğunu belirtmelidir. Hedef kitle; tüketiciler, tüketici kuruluşları, şirketler (yöneticiler, ürün geliştiriciler, vb.), hükümet ve diğerleri olabilir. Hedef kitle, çalışmanın ayrıntılarının ne ölçüde belgeleneceğini, raporlamanın teknik düzeyini ve sonuçların yorumlanmasını büyük ölçüde etkilemektedir.

Hedef, LCA çalışmasının karşılaştırmalı bir nitelikte olup olmadığını ve kamuya açıklanmasının amaçlandığını açıkça belirtmelidir. Böyle bir durum söz konusu ise, ISO standardında çalışmanın yürütülmesi ve belgelenmesi ve harici bir gözden geçirme süreci ile ilgili bir dizi gereklilik vardır. Çalışmanın sonuçları, harici şirketler, kurumlar, tüketiciler ve diğer paydaşlar için potansiyel sonuçlara sahip olabilir. ISO gereklilikleri temel olarak bir çalışmanın şeffaflığını ve kaliteli olmasını sağlamak içindir.

Hedef tanımı, çalışmayı kimin yaptığını, kimin finanse ettiğini (genellikle faaliyete geçen kuruluş) ve çalışmayı yürüten LCA uzmanları dahil olmak üzere çalışma üzerinde etkisi olan diğer kuruluşları açıkça belirtmelidir. Hedef tanımının bu adımı, çalışmanın okuyucularına olası çıkar çatışmalarını vurgulamaktadır. Bu tür bir çıkar çatışması, önemli bir veri sağlayıcısı, belirli bir LCA sonuçlarına ve yorumlarına ekonomik olarak ilgi duyuyorsa ortaya çıkabilir. Karşılaştırmalı çalışmalarda, veri toplama istem dışı bir yanlılığa yol açabilir. Çalışmanın yetkili kişisi, güncel bilgiler sunmalı ve ürün için teknolojinin mevcut performansını yansıtmalıdır. Aksine, karşılaştırmadaki diğer ürün ve ürünler için veri toplama, tipik olarak, literatür ve veri tabanlarına dayanmak zorundadır ve dolayısıyla, önceki mevcut teknolojinin durumunu temsil etmektedir (Hauschild vd., 2018).

#### **3.4.1.2. Kapsam**

Kapsam tanımı, hangi ürün sistemlerinin değerlendirileceğini ve bu değerlendirmenin nasıl gerçekleştirileceğini belirlemektedir. Hedef tanımı ile birlikte kapsam tanımı, takip eden LCA aşamalarının nasıl gerçekleştirileceğine (envanter analizi,

belirsizlik ve hassasiyet analizi dahil olmak üzere etki değerlendirmesi ve yorumlama) ve LCA'nın nasıl rapor edileceğine dair sağlam bir kılavuz görevi görmektedir. Kapsam tanımının amacı; yöntemlerin, varsayımların ve verilerin tutarlılığını sağlamak ve belgelendirmek ve çalışmanın tekrarlanabilirliğini güçlendirmektir (Hauschild vd., 2018). Kapsam tanımının terminolojisinde aşağıda detayları verilen bazı anahtar kelimeler vardır.

### ***Birim süreci ve akışlar***

Bir birim prosesi, girdi ve çıktı verilerinin nicelleştirildiği bir yaşam döngüsü envanter modelinde dikkate alınan en küçük unsurdur. Bu nedenle birim süreçler, girdi ve çıktı verileriyle “birbirine yapışık” bir yaşam döngüsü envanter modelinin yapı taşları olarak kabul edilebilir.

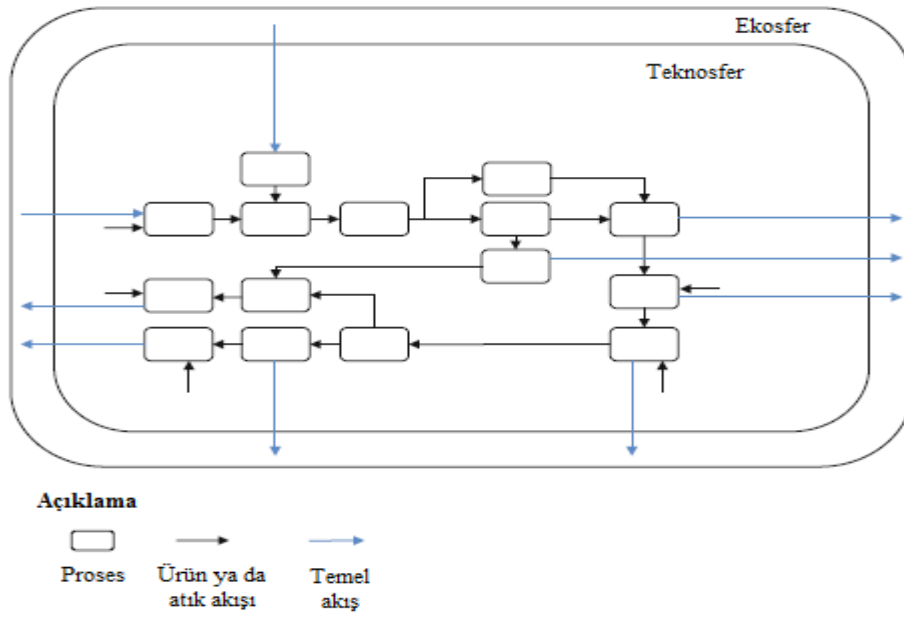
- Giriş akışları:
  - a) Malzemeler
  - b) Enerji
  - c) Kaynaklar
- Çıkış akışları:
  - d) Ürünler
  - e) Arıtılacak atık
  - f) Emisyonlar

Genel olarak, birim süreçler zamanla kütle kazanmaz ya da kaybetmez, bu nedenle tüm giriş akışlarının toplamı, element seviyesinde ve kümeleştğinde tüm çıkış akışlarının toplamına eşittir. Ürüne ya da atığa ait çıkış akışları, diğer birim süreçleri için malzeme ve enerji kategorilerine ait girdi akışları olarak hareket edebilir. Bu, birim süreçlerinin bir yaşam döngüsü envanter modeline nasıl bağlandığı ile ilgilidir. Karşılaştırma yapıldığında, birim süreçler arasında, kaynak ve emisyon akışları değiştirilmemektedir (Hauschild vd., 2018).

### ***Teknosfer ve ekosfer***

LCA, dünyayı bir teknosfer ve bir ekosfer içinde ayırmaktadır (Şekil 3.3). Teknosfer, kasıtlı olarak “insan yapımı” olan her şey olarak anlaşılabilir ve aynı zamanda insanlar tarafından manipüle edilen işlemleri de içermektedir. Bir LCI modelinin tüm birim süreçleri teknosferlere aittir. Ekosfer, bazen “çevre” ya da “doğa” olarak adlandırılır ve

kasıtlı olarak “insan yapımı” olmayan her şey olarak anlaşılabilir. Ekosistemde, LCA’nın ekosistemler, insan sağlığı ve kaynak kullanılabilirliğini korumak için tasarlandığı nitelikleri vardır. Bu nitelikler Koruma Alanları veya LCA alanında hasar kategoriler olarak adlandırılır. Ekosferdeki değişiklikler, teknosferdeki faaliyetlerin, “insan yapımı” sonuçları olarak düşünülebilir.



**Şekil 3.3.** Kapsamlı ürün sistemi için ekosfer ve teknosfer arasındaki bölünme. Temel akışlar mavi oklarla temsil edilirken, teknosferdeki akışlar siyah renktedir. (Hauschild vd., 2018).

Temel akışlar, teknofosfer ve ekosfer arasındaki sınırın ötesine geçen tek akışın tanımıdır ve bu akışlar, Koruma Alanları'nın, LCA'da değerlendirilen ürün sistemleri tarafından potansiyel olarak etkilenmesinden kaynaklanmaktadır. Teknosfer ve ekosfer arasında açık ve geniş ölçekli bir mekansal ayrım yoktur. İki alan aslında büyük ölçüde birbirine karışmış olduğu için oldukça soyuttur. Kuşkusuz, doğal rezervler ve gelişmemiş topraklar büyük ölçüde ekosferlere aittir, ancak bunların içinden geçen ulaşım ve turizm altyapısı (yollar, çöp kutuları, vb.) teknosferlere aittir (Hauschild vd., 2018).

### **Ön plan ve arka plan sistemi**

Genellikle bir LCA'da çalışılan ürünü tamamlamak için yüzlerce birim işlem gerekir. Ön plan ve arka plan sistemine ait birim süreçleri birbirinden ayırmak yararlıdır. Ön plan ve arka plan sistemleri, genel bir ürün sistemi için Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



yorumlanmasının bir parçası olarak önerilerde bulunmak için yararlıdır (Hauschild vd., 2018).

### ***Fonksiyonlar***

LCA, ürün sistemlerinin yaşam döngüsü boyunca aktif olan birçok birim işlem den oluşan bir veya daha fazla ürün sistemini incelemektedir. Bu sistemleri incelemek için sağladıkları fonksiyonlar çok iyi anlaşılmalıdır. LCA, önce fonksiyonlara odaklanan ihtiyaçların ve daha sonra bu fonksiyonları sağlamak için ihtiyaç duyulan ürünlerin çevresel değerlendirmesidir.

Bir LCA çalışması, bu nedenle ilk önce fonksiyonları kullanıcının bakış açısından tanımlamalıdır. Örneğin, iki farklı enerji teknolojisi, hane halklarına elektrik dağıtımını sağladıkları fonksiyon temelinde (ortak dağıtım sistemi aracılığıyla) karşılaştırılabilir. Fonksiyonlar özellikle, iki veya daha fazla ürün sistemi karşılaştırılırken önemlidir çünkü bir karşılaştırma, karşılaştırılan sistemlerin, kullanıcıya aynı fonksiyonları sağlaması durumunda adil ve anlamlı olmaktadır (Hauschild vd., 2018).

### ***Fonksiyonel birim***

Bir fonksiyon sağlamanın alternatif yollarının adil ve ilgili nicel karşılaştırmasını desteklemek için, alternatif bir ürün sistemi tarafından sağlanan fonksiyonların bilgisi, bir fonksiyonel birimi tanımlamak için kullanılmaktadır. Fonksiyonel bir birim nitel yönleri tanımakta ve genellikle “ne?”, “ne kadar?”, “ne kadar süre/kaç kez?”, “nerede” ve “ne kadar iyi” sorularını cevaplamayı içeren fonksiyonun nicel yönlerini nicelleştirmektedir.

Özellikle LCA’nın hedefi, iki veya daha fazla ürünü karşılaştırmak ise, fonksiyonel birimin dikkatli bir şekilde ele alınması önemli hale gelmektedir. Bu durumda, karşılaştırma esasının eşdeğer kullanım olması gerekmektedir, yani, her bir sistem eşit bir miktarda olacak şekilde tanımlanmalıdır. Örneğin, eğer bir kalıp sabun ile sıvı sabun karşılaştırılacaksa, karşılaştırma için mantıksal temel, belirli sayıda el yıkaması için gerekli olan iki ürünün miktarı olacaktır.

Fonksiyonel birimin ölçeğini doğru şekilde ayarlamak çok önemlidir. Eğer çok küçük ayarlanmışsa, etki değerlendirmesi, sisteme toplam girdinin küçük bir payını bildirebilir. İstenen fonksiyonu yerine getirmek için ihtiyaç duyulan ürün sistemi içindeki süreçler için referans akışlarının, yani fonksiyonu yerine getirmek için ihtiyaç duyulan ürünlerin miktarının belirlenmesi önemlidir (Curran, 2017). Bu durum, özellikle karşılaştırmalı çalışmalarda, LCA’nın gerçekleştirilme şeklini, sonuçlarını ve

yorumlamasını önemli ölçüde etkilemektedir. Karşılaştırılan ürünler arasında farklılık gösteren teknik olmayan özellikler ya fonksiyonel birime dahil edilmeli ya da LCA'nın yorum aşamasında ayrı olarak ele alınmalıdır (Hauschild vd., 2018).

### ***Referans akış***

Fonksiyonel birim tanımlandıktan sonra referans akışlar belirlenebilir. Bir referans akışı, ürün sistemindeki süreçler için, tüm giriş ve çıkışların aktığı ürün akışı ile niceliksel olarak ilişkili olmalıdır. Başka bir deyişle, referans akış, fonksiyonel birimin gerçekleştirilmesi için gerekli olan ürün miktarıdır. Referans akış, ürün özelliklerindeki farklılıklar nedeniyle, tipik bir ürün birimine göre farklı ürünler için tipik olarak niteliksel ve niceliksel olarak farklıdır. Referans akış, LCA'nın takip eden LCI analiz aşaması için başlangıç noktasıdır, çünkü çalışılan ürün sisteminin yaşam döngüsü boyunca ihtiyaç duyulan tüm ürün akışlarını ve bunlarla ilişkili temel akışlarını (kaynak kullanımları ve emisyonları) belirlemektedir (Hauschild vd., 2018).

#### ***3.4.1.3. Sistem sınırları***

Sistem sınırları, incelenen ürün sistemi ile çevre ekonomisi (teknosfer) ve çevre (ekosfer) arasındaki sınırları çizmektedir. “Bütünsellik gereksinimleri”, bir sistemin amacı ile uyumlu olması gereken ürün sistemi modellemesinde, sistem sınırları içerisinde hangi süreçlerin yer alması gerektiğini belirlemek için kullanılabilecek ilgili bir kavramdır. Sistem sınırlarının belirlenmesi, LCA sonuçları üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Çünkü çevresel etkilerin sayısallaştırılması gereken birim süreçlerini belirlemektedir. Kapsam tanımının bu noktasında, sistem sınırları, incelenen ürün sisteminin hangi bölümlerinin dahil edildiğine ve hariç tutulduğuna dair genel bir bakış sağlayan bir şemada temsil edilmelidir. Bu diyagramdaki detay seviyesi; yaşam döngüsü aşamaları (üretim, imalat, nakliye, perakende, kullanım ve bertaraf) veya ana proses aşamalarıdır.

İdeal olarak, sistem sınırları içerisinde, fonksiyonel birim tarafından tanımlanan referans akışları sağlamak için gereken tüm birim süreçler yer almalıdır. Çok fonksiyonelliğin sistem genişletme tarafından ele alındığı durumlarda, incelenen sistemle etkileşimde olan diğer sistemlerden gelen işlemler de yer almalıdır. İşlem akışında hiçbir malzeme, enerji, ürün ya da atık sistem sınırlarını geçmemelidir. İdeal sistem sınırları, böylece, kaynaklardan elde edilen enerji ve ürünleri üreterek, atık akışlarını sadece çıktıların emisyon olduğu noktaya kadar işleyerek, referans akışlarını sağlayacak ve

kullanılan tüm birim süreçlerini içerecektir. Bu durumda, envanter modeli tamamen tamamlanabilir, çünkü referans akışlarını sağlamak için gereken tüm birim süreçleri sistem sınırları içinde yer almaktadır (Hauschild vd., 2018).

#### **3.4.1.4. Veri kalitesi**

Fiziksel gerçekliği yansıtmak LCA'nın amaçlarından birisidir. Bu, modelin gerçekte ne olduğunu veya mümkün olduğu ölçüde gerçekleştiğini temsil etmesi gerektiği anlamına gelmektedir. Ürün sistemlerini modellemek için uygulanan birim süreçleri, analiz edilen ürün sisteminde fiilen kullanılan veya değerlendirilen ürünün piyasaya sürülmesinden dolayı etkilenen süreçleri de temsil etmelidir. Genel olarak, bir ön plan sistemin parçaları, LCA uygulayıcısı tarafından ilk elden toplanan verilere (temel akışlar, vb.) dayalı olacaktır. Bu birincil veri, verilerin toplandığı zamanda gerçekleşen belirli sürecin tanımına göre hiçbir hata içermemesi koşuluyla verilmektedir. Öte yandan, ön plan sisteminin diğer bölümleri ve tüm arka plan sistemi, ilk elden veri kaynaklarından başka bir şekilde oluşturulmuştur.

LCI verilerinin temsili nitelikleri birbiriyle zamanla ilgili, coğrafi ve teknolojik kapsam olmak üzere üç boyutta anlaşılmaktadır. İncelenen ürün sistemi ile ilgili hedef tanımına ve bilgiye dayanarak, kapsam tanımı, temsiliyetin her boyutu, LCI verilerinin temsiliyetine ilişkin envanter analizi için rehberlik ve şartlar sağlamalıdır. Envanter analizini yürütmek için bir rehber olarak hizmet etmenin yanı sıra, ürün sistemi modelinin gerçekte ne ölçüde örtüştüğünü yansıtmak için sonuçların yorumlanmasında verilerin temsil gücü de kullanılmalıdır.

#### **Coğrafi kapsam**

Envanter verilerinin konuma özgü parametrelere ilişkin gerçek süreçleri ne kadar iyi temsil ettiğini yansıtmaktadır. Coğrafi kapsamın, dikkate alınması önemlidir, çünkü aynı ürün çıktısını veren, ancak iki farklı yerde (örneğin, uluslar) yer alan iki süreç, diğer akışlar açısından oldukça farklı olabilir. Birim süreçler arasındaki farklar, yerel iklim ve doğal kaynaklara yakınlık gibi coğrafi farklılıklar, enerji vergileri ve emisyon eşikleri gibi düzenleyici farklılıklara bağlı olabilir. Ek olarak, bir arka plan sistemini modellemek için süreç karışımı kullanıldığında, modelde kullanılan karışımın gerçek lokasyonuna göre verileri dikkate alınmalıdır. Örneğin, Danimarka'nın (özellikle kömür ve rüzgar enerjisi) ve İsveç'in (özellikle nükleer ve hidroelektrik enerji) elektrik karışımları, iki ülkenin yakınlığına rağmen oldukça fazla değişmektedir. Bu kısmen coğrafi, sosyal ve politik

farklılıklar ile açıklanabilir; Danimarka düz bir alana sahipken, İsveç, sahip olduğu dağlar nedeniyle hidroelektrik potansiyelinin yanı sıra nükleer enerji santrallerine sahiptir.

Coğrafi kapsamın önemi nedeniyle LCA uygulayıcısı, kapsam tanımında, ürün sisteminin içinde yer alan süreçlerin veya süreçlerin kombinasyonlarının coğrafi kapsamını tanımlamalıdır. Başlangıç noktası, işlem yerlerinin tipik olarak yüksek kesinlik ile bilindiği ön plan sistemi olmalıdır. Coğrafi kapsamların (örneğin şehir, bölge, millet veya kıta) uygun çözümü, düzenlemenin mekânsal kapsamı (tipik olarak ulusal sınırların izlenmesi), coğrafi varyasyonlar (örneğin hava durumu, iklim) ve piyasaların mekânsal boyutu gibi faktörlere bağlıdır.

### ***Zamanla ilgili kapsam***

Aynı ürün çıkışını veren iki süreç, farklı konumlarda ortaya çıktığında farklı olduğu gibi farklı zamanlarda ortaya çıktığında da farklı olabilir. Bunun nedeni, zamanla daha verimli süreçlere, anlamsız girdilere ve bazen de istenmeyen çıktılara sebep olan teknolojik yenilik ve gelişmeden kaynaklanmaktadır. Zamanla ilgili kapsam, envanter verilerinin, ortaya çıktığı zaman (örn: yıl) ile ilgili gerçek süreçleri ne kadar iyi temsil ettiğini yansıtmaktadır. Teknolojik yenilik bazı sektörlerde diğerlerinden daha hızlıdır. Bu nedenle, ürün sistemindeki sürecin gerçekleşmesinden 10 yıl önce durumu yansıtan bir birim süreci, küçük teknolojik yeniliklere (örneğin kağıt hamuru ve kağıt endüstrisi gibi) sahip olgun bir sektöre aitse, zamanla ilgili bir temsil olabilir. Ancak, hızlı teknolojik gelişme, enerji ve atık arıtma ile sektörün bir parçasıysa, düşük bir temsil gücüne sahip olabilir.

Süreçlerin coğrafi kapsamını belirleme gereklilikleri doğrultusunda, LCA uygulayıcıları, kapsam tanımında yaşam döngüsünün farklı aşamalarındaki süreçlerin zaman çerçevesini tanımlamalıdır. Bu zamanlar, incelenen ürünlerin beklenen yaşam süresinden büyük ölçüde etkilenir. Örneğin, mobilya ile ilgili bir çalışmada, tüketici alımından bertarafına kadar beklenen yaşam süresi, atık arıtımının gerçekleşmesi beklenen zaman için belirleyicidir. Diğer durumlarda, ön plan sistemindeki kurulu güç ömrünün zaman dilimleri üzerinde büyük bir etkisi vardır. Örneğin, yeni bir yakma tesisi inşa etme kararını içeren bir çalışmada, faaliyete geçmesi planlanan yılların sayısı (tipik olarak 20-30 yıl), ilgili birim süreçlerinin zamanlaması için belirleyicidir. Her durumda, amaç tanımında belirtildiği gibi, bir çalışmanın yürütülmesi için sonuçların ve sonuçların uygulanması, zamana bağlı gereklilikleri yönlendirebilir.

### ***Teknolojik kapsam***

İki farklı teknoloji kullanılarak iki özdeş ürün üretilmekte ve böylece, farklı birim süreçleri ve ilgili akışlarla ilişkilendirilebilmektedir. Örneğin, ham çelik, farklı envanter akışlarını içeren ve çok farklı teknolojiler olan elektrik ark ocağı veya bazik oksijen fırını kullanılarak üretilir. Teknolojik kapsam envanter verilerinin, incelenen ürün sistemindeki gerçek teknolojileri ne kadar iyi temsil ettiğini yansıtmaktadır. Teknolojik kapsam, coğrafi ve zamansal kapsam ile bağlantılıdır. Örneğin, elektrik üretiminde (kömür gücü, doğal gaz, nükleer enerji, yel değirmenleri vb.) oluşan teknoloji karışımı, örneğin ülkeden ülkeye ve zaman içinde değişmektedir.

Sistemde modellenen birim süreçlerin dahilinde teknolojik olarak uyumlu olmasını sağlamak önem arz etmektedir. Bu, bir sürecin ürün çıktısının sistemdeki bir sonraki işlemin girdi gereksinimlerini karşılaması gerektiği anlamına gelmektedir. Örneğin, bir proses, malzeme girdisi olarak paslanmaz ve ısıya dayanıklı çelik gerektiriyorsa, bu özellikler olmadan temel kalitede çelik üreten bir birim prosesi ile uyumlu değildir. Bu nedenle, kapsam tanımı, ön planda sistemde ve bilinen bilginin varlığını sağlayan arka plan sisteminin bölümlerinde temsil edilen teknolojilerin bir listesini içermelidir. Bu liste kısmen, coğrafi kapsamın ve zaman çerçevelerinin sonuçlarının nerede ve ne zaman gerçekleştiğine göre belirlenmelidir (Hauschild vd., 2018).

#### ***3.4.1.5. Kritik gözden geçirme***

Kritik gözden geçirme prosesinin amacı, yaşam döngüsü analizinin kalitesinden emin olmaktır. Bu süreç, içsel veya dışsal olabilir ya da hedef ve kapsam tanımında belirtilen ilgili tarafları içerebilir. Kritik gözden geçirme prosesi,

- LCA'yı gerçekleştirmek için kullanılan metodun uluslararası standartlara uygunluğundan,
- LCA'yı gerçekleştirmek için kullanılan metodun bilimsel ve teknik açıdan uygunluğundan,
- Kullanılan verilerin, çalışmanın hedefiyle olan uygunluğundan ve kabul edilebilirliğinden,
- Yorumların, çalışmanın hedeflerini yansıtıp yansıtmadığından,
- Çalışma raporunun şeffaflığından ve tutarlılığından emin olmak için kullanılır (Çokaygil, 2005).

### 3.4.2. Envanter analizi/değerlendirmesi

Bir LCA'nın yaşam döngüsü envanteri (LCI) analiz aşaması sırasında, veri toplanması ve ürün sistemlerine, içeriden ve sistem içinden akışların modellenmesi yapılmaktadır. LCI sonucu, incelenen yaşam döngüsünün sistem sınırını geçen nicelleştirilmiş akışların bir listesidir ve sonrasında LCIA fazına girdi olarak kullanılmaktadır. Genellikle, LCI analizi, LCA uygulayıcısı için en fazla çaba ve kaynak gerektiren aşamadır. LCI'nın tüm süreçleri için en yüksek kalitede veri toplamak pratik olarak nadiren mümkündür. Bu nedenle, envanter analizi, ürünün yaşam döngüsünün genel etkilerinde en önemli olan bölümleri için veri toplamayı amaçlamış bir yaklaşım gerektirmektedir. Bir LCI analizi genellikle altı adımdan oluşmaktadır:

1. LCI modeli için süreç belirleme
2. Veri planlama ve toplama
3. Yapılandırma ve kalite kontrol birimi süreçleri
4. LCI modelinin oluşturulması ve LCI sonuçlarının hesaplanması
5. Belirsizlik ve hassasiyet analizi için temel hazırlanması
6. Raporlama.

Envanter modellemesi süreç bazlı (veya aşağıdan yukarıya) bir yaklaşımdır. Bir LCI oluşturmaya yönelik tamamlayıcı bir yaklaşım, farklı sektörlerdeki ekonomik faaliyet birimiyle ilişkili temel akışlar hakkında bilgi ve sektörler arasındaki ürün ve hizmet ticareti hakkında ulusal istatistiklerden yararlanılarak ürün için yaşam döngüsü envanterini makroskobik bir bakış açısından modellemektir. Buna çevresel olarak genişletilmiş girdi-çıktı analizi (EEIO, environmentally extended input-output analysis) denir ve süreç bazlı yaklaşımın tersine, envanter modellemeye yukarıdan aşağıya bir yaklaşım olarak görülebilir. EEIO'nun gücü, teorik olarak, eksik veri veya bütçe kısıtları nedeniyle hiçbir işlemin kesilmesi gerekmediği için, % 100'lük bir tamamlamanın başarılabileceğidir. EEIO yaklaşımının iki temel zayıf yönü ise, temel akışların kapsamının süreç temelli yaklaşımla karşılaştırıldığında oldukça sınırlı olması ve birçok ürün ve hizmet önermelerinin ulusal düzeyde tanımlandığı gibi birçok sektörün heterojen doğası nedeniyle ticaret istatistiklerinin oldukça düşük olmasıdır (Hauschild vd., 2018).

#### **3.4.2.1. LCI modeli için süreç belirleme**

LCI'nın bu ilk adımı, sistem sınırları kapsamında yapılan genel başlangıç sistem diyagramını detaylandırmak ve ilgili bütünsellik gerekliliklerine dayanmaktadır. Fiziksel değer zincirinin detaylandırılmasında; tüm karar bağlamlarında süreçleri tanımlamaya yönelik yaklaşım, referans akışla başlamak ve tüm ön plan sistemi sürecini seviyelere göre oluşturmaktır. Seviye 0'da; ürün akışı olarak referans akışa sahip birim prosesi önce tanımlanmalıdır. Seviye 1'de; referans akışta fiziksel olarak somutlaşacak akışları sağlamak için gereken prosesler tanımlanmalıdır. Seviye 2'de; Seviye 0 sürecine destekleyici bir fonksiyon gerçekleştiren akışların ortaya konulması için gereken süreçler tanımlanmalıdır. Seviye 3'te; Seviye 0 süreçlerine hizmet sunmak için gerekli olan süreçler tanımlanmalıdır. Seviye 4'te; Seviye 0 sürecini mümkün kılan altyapıyı üretmek ve sürdürmek için gerekli süreçler tanımlanmalıdır. Seviye 0 işlemine ait olan seviye 1, 2, 3 ve 4 süreçleri tanımladıktan sonra, aşağı akış süreçleri için de benzer bir süreç tanımlanmalıdır. Bu prosedürü uygularken, LCA uygulayıcısı, daha sonra ele alınacak çok fonksiyonlu süreçleri tanımlamalıdır. Çok fonksiyonlu süreç hiyerarşiye göre, tercih edilen çözüm, ilgili sürecin alt bölümüdür ve bu mümkün değilse, sistem genişletme ve son çare olarak paylaşımıdır.

#### **Alt bölüm (subdivision)**

Birim süreçler, birçok detay seviyesinde tanımlanabilir. Bu, modellemede uygulanan detayın arttırılmasıyla, çok fonksiyonluluğun yapay olarak ortaya çıkabileceği anlamına gelmektedir. Örneğin, iki farklı ürünü üreten bir fabrika düşünülürse; üretim için farklı ve bağımsız makineler ya da farklı iş istasyonları kullanılıyorsa, ilk süreç, her bir üründen yalnızca birinin üretimine katkıda bulunan iki veya daha fazla sürece bölünebilir. Fakat fabrikanın aydınlatmasını ya da ısıtmasını ortak ürünler arasında bölmek mümkün olmayabilir. Bu gibi durumlarda, alt bölümün çok işlevli bir yapıya eklenmesi veya başka bir çözümle değiştirilmesi gerekmektedir. Örneğin; elektrik tüketimi bazında veriler yalnızca tüm fabrika için mevcut ise, yani her bir makinenin elektrik tüketimi bilinmiyorsa, bu durumda, altbölüm pratik olarak imkansız olmaktadır.

#### **Sistem genişletme (system expansion)**

İki sürecin karşılaştırılmasında, ikinci sürecin, birinci sürecin ikincil işlevini sağlamanın en olası alternatif yolu ile genişletilmesi anlamına gelmektedir. Çalışılan ürün sisteminde, alternatif olarak teknosferde başka bir yerde üretilen ve ikincil işlevlerden

kaçınılmasıyla kredilendirilen matematiksel bir özdeştir. Kaçınılan süreçlerin tanımlanması karar bağlamına bağlıdır. Örneğin, eğer geri dönüştürülmüş çelik incelenen bir yaşam döngüsünün ortak ürünü ise, çelik üretmek için elektrik ark ocağı (EAF) ve bir temel oksijen fırınının (BOF) olduğu iki süreç vardır. Bu süreç miktarlarının sırasıyla 60 ve 140 milyon ton olduğu düşünülürse, ilgili pazarda ve referans yılda, piyasa karışımı %30 EAF ve %70 BOF olacaktır. Bu nedenle, LCI modeli, 1 birim EAF çeliğinin üretimi ile ilişkili akış miktarlarının %30'undan ve 1 birim BOF çeliğinin üretimi ile ilişkili akış miktarlarının %70'inden oluşan yapılandırılmış bir işlemle kredilendirilmelidir.

### ***Paylaştırma (allocation)***

Bazen, karşılaştırılan sistemler arasında tam fonksiyonellik elde etmek veya bir işlemin birincil fonksiyonunu ikincil fonksiyonlardan sistem genişletme yoluyla ayırmak mümkün değildir. Sistem genişletmenin mümkün olmadığı durumlarda veya hedef tanımıyla çelişen durumlarda ISO 14044 standardı, çok fonksiyonlu işlemin veya sistemin farklı ürün veya fonksiyonlar arasındaki giriş ve çıkışlarının paylaştırılmasını önermektedir. Örneğin, atık pil ve plastiği yakan bir atık yakma tesisi düşünülürse, prosten gelen zehirli metal kadmiyum emisyonları tamamen pillerden kaynaklanacaktır. Böylece nedensel bir fiziksel ilişki kurulabilir ve pillere %100 oranında kadmiyum emisyonu paylaştırılabilir.

Farklı çıktılar için, ortak bir temsilci fiziksel parametre belirlenemediğinde, arada başka bir ilişki kurulmalıdır. Örnek olarak, ISO standardı ekonomik bir ilişkiden bahseder ve bu sıklıkla uygulanan bir paylaştırmadır. Ekonomik paylaştırmada, fonksiyon veya sistemin girdileri ve çıktıları, kendi ekonomik değerleri uyarınca ürünler arasında bölünmektedir.

### ***3.4.2.2. Veri planlama ve toplama***

Sistem sınırları içerisine dahil edilen kapsam tanımına ve süreçlere bağlı olarak, bu süreçler için veri toplanması planlanmalı ve iyi yürütülmelidir. Planlama, veri toplama çabasını ilgili veri ve bilgilerin uygunluğu ile dengeleme amacına sahiptir. Verilerin planlanması ve toplanması iteratif süreçlerdir. Bu süreçler, aynı zamanda LCIA sonuçlarının hesaplanmasını da içeren LCA'nın tekrarlı yaklaşımının entegre bir parçasıdır. Örneğin, LCIA sonuçlarının ilk yinelemesi, uygulayıcıya hangi verilerin özellikle ikinci bir yinelemeye odaklanmak gerektiği konusunda yol gösterici olabilir.

#### **3.4.2.3. Yapılandırma ve kalite kontrol birimi süreçleri**

LCA çalışması için toplanan veriler, sürecin tam işlem döngüsünü temsil etmelidir. Bu, veri toplama işleminin, uzun bir çalışma süresine dayanması gerektiği anlamına gelmektedir. Toplanan veriler, birim süreçleri oluşturmaktadır. Toplanan tüm verilerin, birim işlemi için doğru formata sahip olmasını sağlamak önemlidir. Tüm veriler akış biçiminde olmalıdır. Temel akışlar, uygulanacak karakterizasyon faktörleri (çoğu durumda 'kg) ile eşleşen bir birimde olmalı ve tüm akışlar, birim işlemin referans akışının 1 birimine ölçeklenmelidir.

#### **3.4.2.4. LCI modelinin oluşturulması ve LCI sonuçlarının hesaplanması**

Tüm birim süreçleri LCI veri tabanlarından oluşturulduğunda veya toplandığında, LCA uygulayıcısı LCI modelini oluşturabilir. Her bir birim süreç, LCI modelinde bir “yapı bloğu” olarak görülebilir; “boyut”, çalışmanın kapsam tanımındaki fonksiyonel birimden türetilen referans akışı ile belirlenmektedir. Bunun nedeni, referans akışının, her bir ünite fonksiyonuna özgü referans akışının gerektirdiği miktara karar vermesidir. Diğer bir deyişle, her birim süreci LCI modeline uyacak şekilde ölçeklendirilmelidir. Uygulamada, envanter modellemesi, ilgili birim süreçlerinin birleştirildiği ve ürün sistemi modelinin yapısını destekleyen özel bir yazılım kullanılarak gerçekleştirilmektedir. LCI sonuçları, LCI modelinin bir parçası olan tüm süreçler üzerinde temel akışların derlenmesidir. Pratikte, akışların ve proseslerin sayısı normalde çok büyüktür, fakat LCA yazılımı, bir ürün sistemi için LCI sonuçlarını hesaplayabildiğinden, LCA uygulayıcısı için manuel bir çalışma gerektirmemektedir.

#### **3.4.2.5. Belirsizlik ve hassasiyet analizi için temel hazırlanması**

LCA sonuçlarının yorumlanması için bu analiz çok önemlidir. LCA uygulayıcısına, çalışmanın sonuçlarının ne kadar güçlü olduğuna dair bilgi vermektedir. Belirsizlik analizi, LCI modelindeki her bir parametrenin belirsizliğinin bir sonucu olarak nihai sonucun belirsizliklerinin nicelleştirilmesine izin vermektedir. Belirsizlik analizini gerçekleştirmek için, uygulayıcı, ön plan sistemdeki nicel parametrelerin istatistiksel dağılımları (normal, log-normal veya eş dağılım) ve ilgili istatistiksel parametre değerleri (örn: normal olarak dağıtılan parametreler için ortalama ve standart sapma) hakkında bilgi toplamak zorundadır.

Hassasiyet analizi, LCIA sonuçlarında en yüksek etkiye sahip olan parametrelerin sistematik olarak tanımlanmasını sağlamaktadır. Parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisi, tek tek değiştirilerek ve sonuçlardaki değişikliklerin gözlemlenmesiyle hesaplanmaktadır. Parametrelerdeki bu değişiklikler, modellenen gerçek ürün sistemi ile ilgili belirsizlikleri yansıtmalıdır. Örneğin, bir çiftçi ortalama olarak 1 ton patates üretmek için 2 kg özel bir pestisit uygulayabilir, ancak hava koşullarına bağlı olarak bu sayı 0,5 ila 1 kg arasında değişebilir. Ön plan sistemindeki farklı parametreler veya varsayımlar için, uygulayıcı bir dizi hassasiyet senaryosu geliştirmelidir. Örneğin, ürün sisteminin bir kısmı, LCI modelinde varsayıldığından farklı bir ülkede bulunabilir ve hassasiyet senaryosu; enerji karışımı, atık arıtma teknolojileri vb. konularda farklılık gösterebilir.

#### **3.4.2.6. Raporlama**

Envanter analizinin raporlanması altı unsuru içermelidir:

1. LCI modelinin sistem düzeyinde dokümantasyonu,
2. Her birim sürecin dokümantasyonu,
3. Meta verilerin dokümantasyonu,
4. LCI sonuçlarının dokümantasyonu,
5. Her yaşam döngüsü aşaması için varsayımlar,
6. Belirsizlik ve hassasiyet analizi için toplanan verilerin belgelenmesi (Hauschild vd., 2018).

#### **3.4.3. Etki değerlendirme**

Değerlendirilmekte olan ürün sistemi ile ilgili tüm temel akışları içeren Yaşam Döngüsü Envanteri (LCI) oluşturulduktan sonra, bir sonraki soru şu şekilde olacaktır: suya karışan 1 gram kurşun ile havaya yayılan 1 gram CO<sub>2</sub> nasıl karşılaştırılır? Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (LCIA), her bir temel akışın çevre üzerine etkisinin büyüklüğünü değerlendirmeyi amaçlayan bir LCA aşamasıdır.

Etki değerlendirmesinin amacı, envanter analizinin sonuçları ile bağlantılı olarak, etki kategorilerini ve kategori indikatörlerini kullanarak ürün sistemini çevresel bir perspektiften incelemektir. Bu süreç, yorum aşamasında yararlı bilgiler sağlamaktadır. ISO 14040/14044 standartları (ISO 2006a, b) LCIA fazında zorunlu ve isteğe bağlı adımları birbirinden ayırmıştır:

- Zorunlu adımlar:
  - Etki kategorilerinin seçimi, kategori indikatörleri ve karakterizasyon modelleri
  - Sınıflandırma
  - Karakterizasyon
- İsteğe bağlı adımlar:
  - Normalizasyon
  - Ağırlıklandırma
  - Gruplandırma (Hauschild vd., 2018).

#### ***3.4.3.1. Etki kategorilerinin seçimi, kategori indikatörleri ve karakterizasyon modelleri***

Envanter analizinde ilgili temel akışlar hakkında bilgi toplanmasına yardımcı olmak için, etki kategorilerinin seçimi çalışmanın amacına uygun olmalı ve envanter verilerinin toplanmasından önce kapsam tanım aşamasında yapılmalıdır (Hauschild vd., 2018). Etki kategorilerinin belirlenmesi, hammadde temini ve enerji akışı ile ilgili envanter analizinde elde edilen bilgilerin, çevresel kategorilere göre (ekolojik kalite, doğal kaynak tüketimi ve insan sağlığı gibi) gruplandırıldığı bir işlem olup, etki değerlendirmesinin ilk aşamasıdır.

Etki kategorilerinin belirlenmesinde, prosesin amacı, envanter girdi ve çıktı verilerinin kategorilere göre ayrılmasıdır. Bu kategorilerin tanımı gerekli olup, bu işlem, hedef ve kapsam aşamasında yapılan kararların bir devamıdır. Etki kategorileri, ele alınan ürün veya ürün sisteminden kaynaklanacak olan etkileri tanımlamak üzere seçilmelidir. Ele alınan etki kategorileri, çalışmada kullanılan karakterizasyon metotlarına göre farklılıklar göstermektedir (Özdemir, 2013).

Yaygın LCA uygulamasında, belirli karakterizasyon modellerine dayanan bir dizi kategori indikatörü, genellikle ReCiPe, CML, TRACI, EDIP, LIME, IMPACT 2002+ gibi isimler altında LCA yazılımında bulunan yaşam döngüsü etki değerlendirme yöntemleriyle birleştirilmektedir (Hauschild vd., 2018). Örneğin: CML 2000 yöntemine göre etki kategorileri abiyotik kaynaklar, biyotik kaynaklar, alan kullanımı, küresel ısınma, insanlar üzerine toksik etki, fotokimyasal oksidasyon, asidifikasyon ve ötrofikasyon vb. olup Çizelge 3.1’de detaylı bir şekilde verilmiştir (Özdemir, 2013).

**Çizelge 3.1.** CML 2000 yöntemine göre etki kategorileri (Özdemir, 2013).

| <b>A (temel kategoriler)</b>        | <b>B (çalışmaya özel kategoriler)</b>    | <b>C (diğer kategoriler)</b>  |
|-------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|
| Abiyotik kaynakların tükenmesi      | Alan kullanımının etkileri               | Biyotik kaynakların tükenmesi |
| Ekotoksosite                        | Biyoçeşitliliğin kaybı                   |                               |
| Yüzey sularına olan toksik etki     | Ekotoksosite                             |                               |
| Deniz ekosistemine olan toksik etki | Yüzey sularının sediment toksisitesi     |                               |
| Kara ekosistemine olan toksik etki  | Deniz ekosisteminin sediment toksik etki |                               |
| İnsan toksisitesi                   | Fotokimyasal sis                         |                               |
| Küresel ısınma                      | Koku                                     | Koku                          |
| Ozon tabakasının tükenmesi          | Radyasyon                                |                               |
| Asidifikasyon                       | Atık ısı                                 |                               |
| Ötrofikasyon                        | Ölümler                                  |                               |
| Fotokimyasal sis                    |                                          |                               |

#### **3.4.3.2. Sınıflandırma**

Bu adımda, LCI'nın temel akışları, katkıda bulundukları etki kategorilerine atanmaktadır. Örneğin, havaya yayılan CO<sub>2</sub> emisyonu iklim değişikliğine ya da su tüketimi su kullanım oranına atanmaktadır. Atmosfere yayılan bazı maddeler iki şekilde birden fazla etkiye sahip olabilir:

- Paralel olarak: Bir maddenin birçok eş zamanlı etkisi vardır. Örneğin, SO<sub>2</sub>, bulunduğu insanlar için toksik olan bir gazdır ve asidifikasyona sebep olmaktadır.

- Seri olarak: Bir maddenin kendisinin başka bir şeyin sebebi haline gelen olumsuz bir etkisi vardır. Örneğin, asidifikasyona neden olan SO<sub>2</sub>, insan ve ekosistem için toksik olan topraktaki ağır metalleri harekete geçirebilir.

Bu adım, çevresel etkiler hakkında önemli bir anlayış ve uzman bilgisi gerektirmektedir ve bu nedenle LCA uygulayıcısı tarafından üstlenilmesi gereken bir görev değildir. LCA yazılımı (uzman tabanlı, önceden programlanmış sınıflandırma tabloları kullanılarak) tarafından otomatik olarak ele alınmaktadır (Hauschild vd., 2018).

#### 3.4.3.3. Karakterizasyon

Bu adımda, LCI'deki tüm temel akışlar, bir etki yaratmaya katkıda bulundukları dereceye göre değerlendirilmektedir. Bu amaçla, belirli bir etki kategorisi içinde sınıflandırılan tüm temel akışlar (E, elementary flows), ilgili karakterizasyon faktörleri (CF, characterisation factor) ile çarpılır ve çevresel etki kategorisi için bir etki puanı (IS, impact score) oluşturulur. Karakterizasyon faktörü (CF), belirli bir çevresel etkinin temel akış miktarına katkısını temsil etmektedir. Bir CF birimi, bir etki kategorisindeki tüm temel akışlar için aynıdır. Bu, karakterizasyon modeli geliştiricileri tarafından tanımlanır ve etkileri doğrudan mutlak terimlerle ifade edebilir (örneğin hastalık vakalarının sayısı/birim toksik emisyon) veya dolaylı olarak referans akışın etkisi ile ilişkilendirilir (örn. kg CO<sub>2</sub> eşdeğerleri/sera gazları birim emisyonu).

Bir karakterizasyon faktörünün modellenmesi, farklı modellerin ve parametrelerin kullanılmasını içermekte ve genellikle belirli bir etki kategorisi veya çevresel mekanizma için uzmanlar tarafından yürütülmektedir. Herhangi bir karakterizasyon modelinin temeli ve başlangıç noktası, her zaman neden-sonuç zincirinin temsil ettiği çevresel mekanizma için bir modelin kurulmasıdır. Başlangıç noktası, her zaman, temel olarak teknofer ve ekosfer arasındaki ilgili temel akışların yönüne dayalıdır. Neden sonuç ilişkisi; teknoferden ekosfere doğru (çevreye emisyon) ve ekosferden teknofere doğru (çevreden kaynak ekstraksiyonu) olan iki tür temel akış vardır.

Çevreye yayılan bir emisyonun, başlıca neden-sonuç zinciri aşağıdaki ana adımlara bölünebilir:

- Emisyon: Havaya, suya veya toprağa (bazı ürün sistemleri için yeraltı suyu, iç ortam havası vb. gibi diğer durumlar da söz konusu olabilir)
- Çevresel akıbet: Çevrede yayılan maddenin taşınmasına, dağılmasına ve dönüştürülmesine neden olan çevresel süreçler. Maddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine ve emisyon alanındaki yerel koşullara bağlı olarak, bir madde farklı çevre bölümleri arasında aktarılabilir, uzun mesafeler boyunca rüzgara veya akan suya karışabilir ve diğer molekül ve kimyasal türlere dönüşebilir.
- Maruz kalma: Maddenin, çevreden tüm ekosistemlere (tatlı su, deniz, karasal veya hava) veya insanlara teması. Maruziyet, havanın solunması,

yiyecek ve suyun yutulması veya deri ve diğer yüzeyler ile deri teması gibi süreçler içerebilir.

- Etkiler: Maddeye maruz kaldıktan sonra görülen yan etkilerdir. (örn. hastalık, davranış, hareketsizlik, üreme, ölüm vb.)
- Hasar: Gözlemlenen etkilerin ciddiyetini, bir ekosistemden potansiyel olarak yok olan türlerin fraksiyonunu ölçerek ayırt etmektir.

Ekstraksiyonla ilgili etkiler ise aşağıdaki ana adımlara bölünebilir:

- Ekstraksiyon: Mineraller, ham petrol, su veya toprak, vb.
- Çevresel akibet: Yerel koşullara bağlı fiziksel değişikliklerdir. (örn: toprak organik karbon içeriği, toprak geçirgenliği, yeraltı su seviyesi, depolanmış karbon salımı vb.)
- Maruz kalma: Bir kaynağın mevcut miktarı, kalitesi veya işlevselliği ve çeşitli kullanıcılar arasındaki potansiyel rekabet değişikliğidir. (örn. habitat kaybı, toprak biyotik verimi, vb.)
- Etkiler: Doğrudan etkilenen kullanıcılar üzerinde, diğer etki yollarına uyum sağlayamayan ve katkı sağlayamayan olumsuz etkiler. (örn: su kalitesinin düşük olması, yetersiz beslenme, serbest toprak karbonunda değişim nedeniyle küresel ısınma vb.)
- Hasar: Biyoçeşitliliğin azalmasını veya etkilenen bir nüfusun insan sağlığını ölçerek gözlenen etkilerin şiddetini ayırt etmek. (örn: su savaşları).
- Arazi Kullanımı (biyotik verimlilik, karbon birikimi ve biyoçeşitlilik vb. gibi durumları etkilemektedir.)
- Su kullanımı (insan sağlığını, sucul ekosistemleri, karasal ekosistemleri etkilemektedir.)
- Yenilenebilir olmayan abiyotik kaynakların gelecekteki mevcudiyetini etkileyen abiyotik kaynak kullanımı (fosil ve mineral).
- Yenilenebilir biyotik kaynakların ve hasat edildiği ekosistemlerin gelecekteki mevcudiyetini etkileyen biyotik kaynak kullanımı (örn. balıkçılık veya ağaç kesme).

### ***Etki indikatörü***

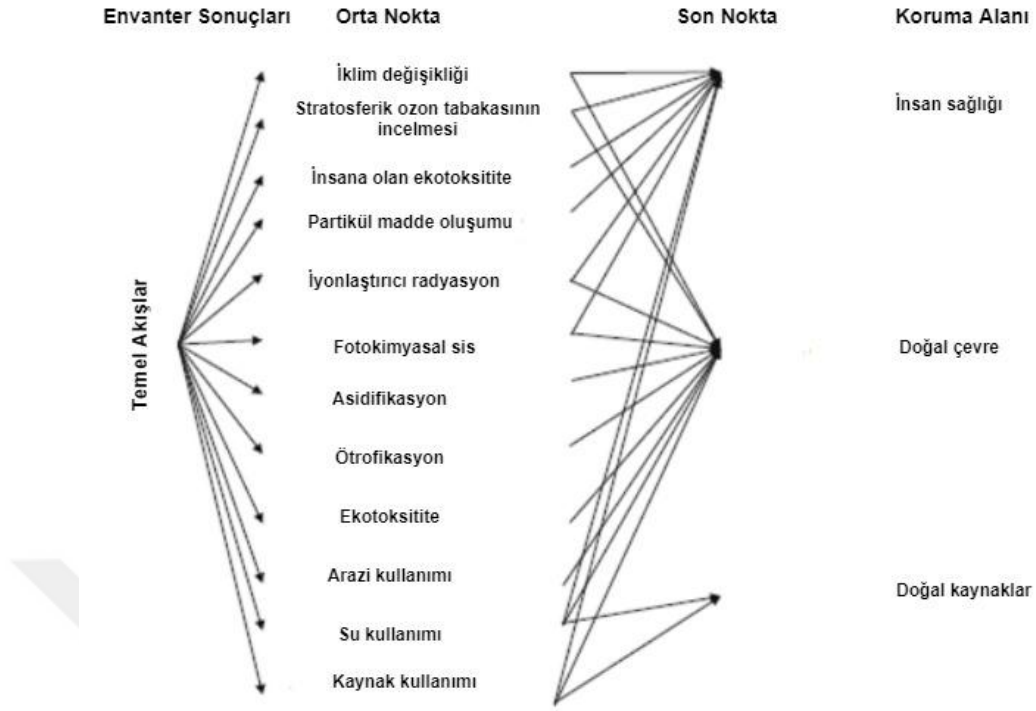
Çevresel mekanizmanın başlangıç noktası, LCI'da bir temel akış şeklinde çevresel müdahale ile belirlenmekte ve LCI akışının katkısı, neden boyunca seçilen etki kategorisi

için bir indikatörü etkileme yeteneği ile ölçülmektedir. Orta ve son nokta olmak üzere iki farklı etki indikatörü vardır (Şekil 3.5.).

Orta nokta etki kategorisinde, envanter sonuçlarında aynı çevresel etkiye katkıda bulunan maddeler grup halinde toplanmaktadır. Sonrasında, ilgili etki kategorisi için geliştirilmiş olan karakterizasyon faktörleri bu etkilerin katkısını hesaplamaktadır. Örneğin, insanlar üzerinde kanserojen etkiye sahip olan maddelerin tüm temel akışları, “toksik kanserojen” olarak adlandırılan orta nokta kategorisinde sınıflandırılacak ve karakterizasyon bu etkinin katkısını hesaplayacaktır.

Genel olarak orta nokta kategorileri: iklim değişikliği, stratosferik ozon tabakasının incilmesi, asidifikasyon (karasal, tatlı su), ötrofikasyon (karasal, tatlı su, deniz), fotokimyasal ozon oluşumu, ekotoksitesite (karasal, tatlı su, deniz), insan toksisitesi (kanser, kanser dışı), partikül madde oluşumu, iyonlaştırıcı radyasyon (insan sağlığı, sucul ve karasal ekosistemler), arazi kullanımı (biyotik verimlilik, karbon birikimi, erozyon, biyoçeşitlilik), su kullanımı (insan sağlığı, sucul ekosistemler, karasal ekosistemler), abiyotik kaynak kullanımı (fosil ve mineral), biyotik kaynak kullanımı (ör. Balık tutma veya ağaç kesme), gürültü ve patojenler olarak sınıflandırılmaktadır.

Son nokta etki kategorileri ise ek modelleme elemanlarıdır ve orta nokta indikatörlerini bir veya daha fazla uç nokta indikatörüne genişletmek veya bağlamak için kullanılmaktadır. Son nokta etki kategorileri, insan sağlığına, ekosistemlere ya da ekosistem hizmetlerine ilişkin olarak toplum çıkarlarını savunan konuların veya “koruma alanlarının” temsilidir. Genel olarak son nokta kategorileri: insan sağlığı, ekosistem kalitesi veya doğal çevre ve doğal kaynaklar ve ekosistem hizmetleri olmak üzere üç kategoride sınıflandırılmaktadır (Hauschild vd., 2018).



Şekil 3.5. Temel akışları birbirine bağlayan ILCD karakterizasyonu çerçevesi (Hauschild vd., 2018).

### İklim değişikliği

19. yüzyılın başlarında keşfedilen sera gazı etkisi, gezegenimizin yaşamı için hayati önem taşımaktadır. Dünya üzerindeki yaşamın başlangıcından bu yana hep var olmuştur. Sera etkisi olmasaydı, yeryüzü atmosferinin küresel ortalama sıcaklığı şu an 15 °C yerine -18°C olurdu. Antropojenik faaliyetler, bu etkinin yoğunluğunu arttırmakta ve küresel ısınmanın da artmasına katkıda bulunmaktadır. Bunun sonucunda, uzun zaman periyotlarında ortalama olarak gezegendeki yüzey sıcaklığı yükselmektedir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (2014a) (IPCC, The Intergovernmental Panel on Climate Change), iklim değişikliğini, “iklim durumunda bir değişim” ya da “değişim özelliklerinin genellikle onlarca yıl veya daha uzun bir süre boyunca devam etmesi” olarak tanımlamaktadır. IPCC, son beş-altı yılda gezegen yüzey sıcaklığındaki yükselişin hızlandığını gözlemlemiştir. Okyanus sıcaklıkları da en az 3000 m'lik bir derinliğe kadar yükselmekte ve atmosferde tutulan ısının çoğunu absorbe etmektedir. Her ne kadar tartışılabilirse de, çoğu bilim insanı bu etkinin varlığını antropojenik faaliyetlerin ana nedeni olarak kabul etmektedir. İklim değişikliğinin neden olduğu bazı olumsuz etkiler şöyledir:

1983'den 2012'ye kadar geçen son 30 yıldaki atmosferik sıcaklığın yükselmesi; Kuzey Yarımküre'de son 800 yılın en sıcak 30 yıllık dönemi; 1971'den 2010'a kadar her on yılda 0,11°C'lik bir küresel ortalama ile, 75 m'nin üstündeki okyanus sıcaklığının yükselmesi; buzulların erimesi; küresel ortalama deniz seviyelerinde 1901–2010 yılları arasında 0,19 m yükselme; hava koşullarına bağlı doğal afetlerin sayısındaki artış; kuraklık, yangın; ısı dalgaları; su kaynaklarının miktarını ve kalitesini etkileyen hidrolojik sistemlerin değişmesi; bulaşıcı hastalıklar; sera gazı emisyonları; atmosferdeki GHG'nin taşınması, dönüşümü ve dağıtımı; radyasyon dengesinin bozulması; ekosistem ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkiler ve atmosferin su buharı içeriğinin artması.

Küresel Isınma Potansiyeli (GWP, Global Warming Potentials), bir kirleticinin iklim değişikliğine olan katkısıdır ve LCIA'da karakterizasyon faktörü olarak doğrudan kullanılmaktadır. GWP100-yıl, bir GHG'nin 100 yılı aşkın süredir olan kümülatif radyasyon kuvvetinin oranıdır ve CO<sub>2</sub> cinsinden CO<sub>2</sub>-eq/kg GHG eşdeğeri ile gösterilmektedir. Bu nedenle, CO<sub>2</sub> için GWP her zaman 1'dir.

### ***Stratosferik ozon tükenmesi***

Ozon (O<sub>3</sub>), üç oksijen atomundan oluşan yüksek derecede reaktif ve kararsız bir moleküldür. Belirgin şekilde keskin bir koku bırakarak, normal ortam sıcaklığında mavimsi bir gaz oluşturmaktadır. Bu molekül düşük atmosferik tabakalarda (fotokimyasal ozon oluşumunun bir sonucu olarak troposferik ozon) ve daha yüksek konsantrasyonlarda (yaklaşık 8 ppmv) yeryüzünden 15 ila 40 km yükseklikte (stratosferik ozon) bulunmaktadır. Troposferik ozon; insanlar, hayvanlar ve bitkiler üzerindeki birçok zararlı etkisinden dolayı kirletici olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, stratosferik atmosferik katmanların bir bileşeni olarak, UV radyasyonunu emme kapasitesi nedeniyle dünya için hayati önem taşımaktadır.

Stratosferik ozon azalmasının etkileri, genellikle stratosferdeki güneş ışımasının azalan absorpsiyonu ile bağlantılıdır. Gezegen yüzeyinde artan UV radyasyon yoğunlukları yol açarak üç yaygın (dalga boyu) sınıfa ayrılmaktadır: UV-C, UV-B ve UV-A. UV radyasyonunun canlı organizmalar üzerindeki etkisi, dalga boyuna bağlıdır, daha kısa olan en tehlikelidir. UV-C, en tehlikeli dalga boyu aralığıdır, ancak neredeyse ozon tabakası tarafından tümü filtrelenir. UV-A (280–315 nm dalga boyları) ozon tabakasının tükenmesi nedeniyle en fazla endişe kaynağıdır, UV-A ise ozon tarafından emilmemektedir. UV-B'ye maruziyetin, süreye ve yoğunluğa bağlı olarak, cilt kanseri,

katarakt, güneş yanığı, artmış cilt hücresi yaşlanması, bağışıklık sistemi hastalıkları, baş ağrıları, yanıklar ve solunum yollarında tahrişler gibi insan sağlığı üzerinde birçok etkisi vardır. Ekosistem etkileri, hayvanlar üzerindeki epidermal hasar ve bitkilerin fotosentezine neden olan fotosentetik organlara verilen radyasyon hasarına bağlıdır. Radyasyon hasarı, tarımsal faaliyetlerde daha düşük verimli ürünlere ve özellikle kutuplu denizlerde bulunan ana besin zinciri olan fitoplanktonun kaybına yol açmaktadır. Bunlara ek olarak UV-B, fotokimyasal sis oluşumunu hızlandırarak, zararlı bir kirletici olan troposferik ozonun üretimini uyarmaktadır.

Karakterizasyon faktörlerini hesaplamak için tüm LCIA yöntemlerinde istisnasız kullanılan orta nokta indikatörlerinden birisi Ozon Tabakasının Tükenmesi Potansiyeli (ODP,Ozone Depletion Potential) 'dir. Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) ile benzer bir şekilde, bir kimyasalın ozon tabakasını tahrip etme potansiyelini değerlendirir. ODP, ozon tabakasını inceltmesi nedeniyle stratosferik O<sub>3</sub> konsantrasyonunun CO<sub>2</sub>'teki küresel azalmasını (1 kg CFC-11 (CFCI<sub>3</sub>)) ifade etmektedir. CFC-11 eşdeğerlerinde ifade edilmektedir.

### ***Asidifikasyon***

1980'lerde ve 90'larda, asidifikasyon etkileri, özellikle Avrupa ve ABD'deki pek çok ormandaki kozalaklılar arasında belirgin bir şekilde görülmüştür. Balıksız asidik göller, 20. yüzyılın başına kadar uzanmaktadır ve insan faaliyetlerinin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Örneğin, 1990'larda 10,000'den fazla İskandinav gölünde ciddi asitlenme olmuştur. Doğal toprakların ve suların kireçlenmesiyle pH değeri yeniden ayarlanabildiği için, bu bölgelerde asidifikasyon artık önemli bir sorun değildir.

Asidifikasyonda ana kaynak, atmosferde hidrojen salıyan ve hava ile taşınan gaz emisyonlarıdır. Gazların su içinde çözüldüğü çökeltme olaylarında birikim artmakta ve pH değerleri 3-4 arasında olan oldukça asidik yağmurla (asit yağmuru) birlikte yeryüzüne düşmektedir. Asit yağmurları, etkili hava kirliliği durumlarından birisidir. Kükürt oksitler, azot oksitler ve amonyak, asidifikasyonun en önemli insan kaynaklı bileşikleridir. Günümüzde, SO<sub>x</sub> ve NO<sub>x</sub>'un esas kaynakları, termik santrallerde, yanmalı motorlarda, atık yakma fırınlarında ve merkezi olmayan fırınlarda yakma süreçleridir. Kükürt oksitler için emisyon seviyeleri yakıtların kükürt içeriğine bağlıdır. Karakterizasyon faktörü genellikle SO<sub>2</sub> eşdeğerinde ifade edilmektedir.

### ***Ötrofikasyon***

Besin maddeleri, yaşamın varlığı için temel bir önkoşul olan çevrede oluşmaktadır. Farklı ekosistemlerin bileşimi ve üretkenliği, besin maddelerinin varlığını yansıtmaktadır. Azot ve fosforun varlığındaki doğal farklılıklar, türlerin ve çok çeşitli ekosistem çeşitliliğinin var olmasının nedenlerinden biridir. Ekosistemler dinamiktir ve değişen besin öğeleri tarafından etkilendikleri takdirde, çevreleriyle yeni bir dengeye uyum sağlarlar. Nehir veya göl gibi su ortamlarının ötrofikasyonu, besin açısından zengin olan ötrofik karakterini tanımlamaktadır. Göllerde, nehirlerde ve kıyılardaki ötrofikasyonun belki de en belirgin etkisi, düşük su kalitesi ve düşük su kalitesi ile suların yüzey katmanlarında büyük miktarlarda algler içermesidir. Ötrofikasyon, su ortamının besin tuzları ile zenginleştirilmesini, planktonik alglerin, jelatinimsi zooplanktonun ve daha yüksek sucul bitkilerin biyokütlesinin artmasına sebep olur ve bu da su kalitesinin (örn. görünüm, renk, koku, tat) bozulmasına yol amaktadır. Ayrıca toksik fitoplankton, dinofiz, siyanobakteriler veya mavi-yeşil alglerin gelişmesine de yol açabilir. Sonuç olarak, sudaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu azalır (hipoksi) ve biyoçeşitliliğin (flora ve fauna) kaybıyla sonuçlanmaktadır. Karasal sistemler için en önemli çevresel sorun, fundalık ve kumul bitki örtüsündeki sınırlı azotun ekosistem işlevinde ve tür çeşitliliğinde oluşturduğu değişimleridir.

Besin zenginleştirici madde için karakterizasyon faktörlerinin hesaplanması, yayılan maddenin bir molünden çevreye salınabilen azot veya fosfor mol sayısının değerlendirmesini içermektedir. Bu, kg N-eşdeğerleri ve kg P-eşdeğerleri olmak üzere iki besleyici zenginleştirme eşdeğeri şeklinde ifade edilebilmektedir (Hauschild vd., 2018). Örneğin CML 2000 karakterizasyon faktörü, ötrofikasyon için kg PO<sub>4</sub>-P eşdeğeri/kg kirleticidir.

### ***Fotokimyasal oksidasyon***

Bu kategori, azot oksitlerin varlığında, birincil kirletici maddelerin uçucu organik bileşiklerinin (VOC) veya karbon monoksidin oksidasyonu ile troposferde ikincil kirleticiler olarak oluşan ozon ve diğer reaktif oksijen bileşiklerinin etkilerini ele almaktadır. Fotokimyasal olarak üretilen kirleticilerin olumsuz etkileri, maruz kalan yüzeylerdeki organik moleküllerin oksitlemelerini sağlayan reaktif doğasından kaynaklanmaktadır. İnsandaki etkileri, oluşan ozon ve diğer reaktif oksijen bileşiklerinin bulunduğu ortaya çıkan solunum hastalıklarıdır. Reaktif bileşikler bitki yüzeylerine

saldırıldığında veya bitki yapraklarına girdiğinde ise fotosentetik organlarında oksidatif hasara neden olmakta ve bitki örtüsü üzerinde olumsuz etkiler ortaya çıkmaktadır. Fotokimyasal oksidasyondan kaynaklı çevresel sorunlara neden olan bileşenler VOC'ler değil, atmosferden daha düşük katmanda olan troposferdeki VOC dönüşümlerinin ürünleridir. Fotokimyasal oksidasyon, şehirlerde veya daha yerel ölçekte sis ataklarına neden olabilir. Sis atakları sırasında, ozon ve diğer foto oksidantların konsantrasyonları insan sağlığına anında zarar veren yüksek seviyelere ulaşabilir.

En önemli insan kaynaklı emisyonlar, karayolu trafiğinden ve organik çözücülerin kullanılmasından kaynaklanmakta olup, bu da Avrupa'da 2000-2010 döneminde insan kaynaklı toplam VOC emisyonlarının yaklaşık %40'ına denk gelmektedir. %7'lik bir kısmı endüstriyel süreçlerden gelmekte ve %10'u kaçak emisyonlardan kaynaklanmaktadır. VOC'ler ayrıca, özellikle ormanlardan ve bitki örtüsünden büyük miktarlarda salınmaktadır. İnsan kaynaklı bir müdahale olmadıkça ve doğal sistemin VOC emisyonlarını etkilemedikçe bunlar bir LCI'da rapor edilmez ve dolayısıyla etki değerlendirmesinde ele alınmaz. Karbonmonoksit ise yetersiz oksijen kaynağı ile yanma süreçlerinden yayılmaktadır. Taşıma, enerji ve atık yakma sistemlerinde yanma süreçlerinden azot oksitler de yayılmaktadır (Hauschild vd., 2018). Fotokimyasal oksidasyonda ozon üretimi, nispeten standart bir kirleticiye göre sınıflandırılır ve birimi etilen ( $C_2H_4$ ) eşdeğeri olarak verilir. Bu etki, ozon tabakasında tahribata neden olan madde emisyonları (CFC-115, metan, bromo-, Halon 1211, Halon 1301) sonucu artan UV radyasyonunun yarattığı etkidir (Özdemir, 2013).

### ***Ekotoksitite***

Karakterizasyon metotlarının çeşitliliğinden dolayı karmaşık bir etki kategorisidir. Bunun nedeni, toksisite kategorilerinin birçok kirleticiyi içermesidir. Örneğin organik çözücüler, ağır metaller ve pestisitler toksik etkinin farklı çeşitlerini oluşturmaktadır. Bazı kirleticiler nörolojik hasar verirken, diğerleri mutajenik, karsinojenik gibi etkilere neden olmaktadır. Toksik kirleticiler hızlı bir şekilde yayılır, örneğin tarım alanlarında kullanılan pestisit bir süre sonra topraktan sızarak içme ve kullanma sularında olumsuz durumlar yaratabilir. Bundan dolayı, toksik etki kategorisi (toksisite) genellikle insan toksisitesi ve eko-toksisite olarak ayrılmaktadır. Eko-toksisite, sırasıyla sucul eko-toksisite ve karasal ekotoksisiteye, sucul eko-toksisite yüzey sularına olan toksisite ve deniz ekosistemine olan toksisiteye ayrılır. Deniz ve yüzey sularına olan toksisite, akut

ve kronik toksisiteye kadar uzanmaktadır. Toksisite etkisi 1,4 Diklorobenzen (DB) eşdeğeri cinsinden hesaplanmaktadır (Özdemir, 2013).

### ***İnsanlara olan toksik etki***

LCA'da insanlara olan toksik etki, esas olarak ekotoksisite ile aynı faktörlere dayanmaktadır. İnsanların kimyasal maruziyeti, tüm popülasyonu etkileyecek olan çevreye yayılan emisyonlardan kaynaklanabilir, aynı zamanda üretim, kullanım veya kullanım ömrü sona erdiğinde ortaya çıkan ve dolayısıyla tüketicileri etkileyen ürünlerdeki birçok kimyasal içerikten de kaynaklanabilir. Kimyasal emisyonlar, kanser risklerinin yanı sıra kanserojen olmayan çeşitli kimyasallar için çok çeşitli kanser dışı hastalıklardan dolayı olabilir (Hauschild vd., 2018). İnsanlara olan toksik etki, 1,4 Diklorobenzen (DB) eşdeğeri cinsinden hesaplanmaktadır.

### ***Abiyotik kaynakların tükenmesi***

Doğal kaynaklar, toplumların ve ekonominin maddi temelini oluşturmaktadır. Doğal kaynakların tanımı, insan merkezli bir başlangıç noktasına sahiptir. İnsanların geçimlerini ve faaliyetlerini sürdürebilmeleri için doğadan ihtiyaç duydukları her şey bir kaynaktır. Abiyotik kaynakların tükenmesi etki kategorisi çoğunlukla fosil yakıtları, mineralleri ve metalleri kapsamaktadır. Kaynakların çıkarılması ve ürün sistemlerinde kullanılan malzemelere dönüştürülmesi, enerji kullanımını gerektirdiği için çevresel etkilere önemli katkıda bulunan doğrudan emisyonlara neden olmaktadır (Hauschild vd., 2018). CML 2000 karakterizasyon faktörü, abiyotik kaynakların tükenmesini Sb (Antimon) eşdeğeri cinsinden hesaplanmaktadır.

#### ***3.4.3.4. Normalizasyon***

Farklı orta nokta göstergeleri için gösterge puanları, etki kategorileri arasında değişen birimlerle ifade edilmekte ve bu, onları birbirleriyle ilişkilendirmek ve hangisinin büyük ve hangisinin küçük olduğuna karar vermeyi imkansız kılmaktadır. Bu tür karşılaştırmaları desteklemek için, onları perspektif haline getirmek gerekir ve bu, ürün sisteminin potansiyel etkilerinin bir ülke, dünya ya da bir sanayi sektörü gibi bir referans sistemininkiyle karşılaştırıldığı normalleştirme adımının amacıdır. Normalizasyon, farklı etki potansiyellerini ortak bir skala ile ilişkilendirerek, ortak birimlerde ifade edilebilir ve bu da çevresel etki potansiyellerinin hangisinin büyük olduğu ve referans sistemine göre küçük olan bir izlenim yaratır. Normalizasyon; çevresel etki potansiyellerinin göreceli

büyüklikleri hakkında bir izlenim sağlamak, sonuçları ağırlıklandırmaya uygun bir biçimde sunmak, güvenilirliği kontrol etmek için yarar sağlamaktadır. Farklı ölçek puanlarını ortak bir ölçekte ifade ederek, normalizasyon, ürün sisteminin modellenmesindeki olası hataların kontrol edilmesine yardımcı olabilir (Hauschild vd., 2018).

#### **3.4.3.5. Ağırlıklandırma**

Hangi etkilerin en önemli olduğunu ve ne kadar önemli olduklarını belirlemek için ağırlıklandırma kullanılabilir. Bu adım sadece normalizasyon adımından sonra uygulanabilir ve her kategori göstergesine farklı veya eşit ağırlıklar uygulayarak etki kategorilerinin önceliklendirilmesine izin vermektedir. Bu adımın bilimsel veya nesnel bir temeli olmadığını belirtmek önemlidir. Bu, hangi ağırlıklandırma yönteminin veya şemasının uygulandığı önemli olmaksızın, her zaman bir bireyin veya bir grup bireyin öznel tercihlerine dayanmaktadır. Ağırlıklandırma; etki puanlarını birkaç veya bir tek indikatöre toplamak ve etki kategorileri arasında karşılaştırma yapmak için yardımcı olabilir (Hauschild vd., 2018).

#### **3.4.3.6. Gruplandırma**

Bu adım, etki kategorilerini bir veya birkaç grup veya kümede (hedef ve kapsamda tanımlandığı gibi) yerleştirmekten oluşmaktadır. Gruplandırma yapılırken iki olası yöntem vardır. Birincisi, orta nokta etki kategorilerini nominal bazda (örneğin: küresel, bölgesel veya yerel mekansal ölçekler) sıralamak ve kümelenlendirmektir. İkincisi ise etki kategorilerini belirlenmiş bir hiyerarşiye (örneğin: yüksek, orta veya düşük öncelikli) göre sıralamaktır (Hauschild vd., 2018).

#### **3.4.4. Yorum**

Yaşam döngüsü değerlendirmesi yorumu, diğer aşamaların sonuçlarının birlikte ele alındığı son LCA fazıdır. Yorumun sonucunda; hedef tanımının niyeti, bunun kapsam tanımıyla çalışmayı kabul ettiği kısıtlamalar, fonksiyonel birimin ve sistem sınırlarının uygunluğunu hesaba katan kısıtlamalar ve öneriler olmalıdır. Yorum, LCA'nın sonuçlarını anlaşılabilir bir şekilde sunmalı ve çalışmanın kullanıcılarına belirlenen çalışma sınırlamaları ışığında olumlu yönlerini ve potansiyel zayıflıklarını değerlendirmelerine yardımcı olmalıdır. Yorumlama aşaması üç adımdan oluşmaktadır:

1. LCA'nın diğer aşamalarından gelen önemli konular belirlenir.
  2. Bu konular, LCA'nın genel sonuçları üzerindeki etkileri ve çalışmanın ele alındıkları bütünlük ve tutarlılık açısından değerlendirilir.
  3. Değerlendirmenin sonuçları, çalışmadan elde edilen sonuçların ve tavsiyelerin formülasyonunda kullanılır.
- Çalışmanın iki veya daha fazla sistemin karşılaştırılmasını içerdiği durumlarda, yoruma dahil edilecek ek hususlar vardır.

#### **3.4.4.1. Önemli sorunların tanımlanması**

Yaşam döngüsü yorumunun ilk unsurunun amacı, çevre açısından önemli konuları belirlemek için LCA'nın önceki aşamalarından gelen sonuçlarını analiz etmektir. Önemli konular metodolojik seçimler ve varsayımlar, önemli yaşam döngüsü süreçleri için envanter verileri ve/veya etki değerlendirmesinde kullanılan karakterizasyon, normalleştirme veya ağırlıklandırma faktörleri olabilir.

#### **3.4.4.2. Değerlendirme**

Değerlendirme unsuru, yorumlamanın nihai unsurunda formüle edilebilecek sonuçlar ve öneriler için temel oluşturmaktadır. Tanımlama unsurundan elde edilen sonuçların güvenilirliğini ve kararlılığını belirlemek için anahtar konuların tanımlanması ile tekrarlı bir etkileşim içinde gerçekleştirilmektedir.

Değerlendirme, çalışmanın amacı ve kapsamı doğrultusunda LCA'nın önceki aşamalarından, envanter analizinden ve etki değerlendirmesinden elde edilen sonuçları kapsamaktadır. Değerlendirmenin sonucu, çalışmadan elde edilen sonuçların ve tavsiyelerin gücünün belirlenmesi için çok önemlidir ve bu nedenle, çalışmanın yürütücüsü ve kullanıcılarına sonucun net bir şekilde anlaşılmasını sağlayacak şekilde sunulmalıdır. Değerlendirme aşaması; bütünsellik kontrolünü, belirsizlik analizi ile birlikte hassasiyet analizini ve tutarlılık denetimini içermelidir.

Bütünsellik kontrolünde, envanter ve etki değerlendirmesi için, mevcut verilerin, önemli konular olarak tanımlanan süreçlerin ve etkiler için tamamlanma derecesini belirlemek amacıyla, kontroller gerçekleştirilir. Bazı önemli süreçlerin ya da en önemli temel akışların veya etki kategorilerinin eksik veya eksik olması durumunda, bu bilgilerin LCA'nın amacını ve kapsamını karşılama gereksinimi araştırılmalıdır. Gerekli görüldüğü takdirde, belirlenen boşlukları doldurmak için envanter ve etki değerlendirme aşamaları yeniden gözden geçirilmelidir. Alternatif olarak, amaç ve kapsam tanımı, bütünsellik

eksikliğine uyum sağlamak için ayarlanmalıdır. Önemli bir veri eksikliğinin giderilememesi durumunda, bu çalışmadan elde edilen sonuçlarda sınırlamalar formüle edilirken bu dikkate alınmalıdır. Eksik bilgilerin önemli olduğu tespit edilirse, bu durum eksiksizlik kontrolünün raporlanmasında belgelenmelidir.

Hassasiyet kontrolü, temel süreçleri ve en önemli temel akışları, ürün sistemindeki genel etkilere en çok katkıda bulunan unsurlar olarak tanımlama amacına sahiptir. Hassasiyet analizi, bir katkı analizi veya bir baskınlık analizi olarak yapılabilir ve sunulabilir.

Tutarlılık kontrolü, çalışmada uygulanan varsayımların, yöntemlerin ve verilerin hedef ve kapsam ile tutarlı olup olmadığını araştırmak için yapılmaktadır. Bir ürün yaşam döngüsündeki envanter verilerinin kalitesindeki ve farklı ürün sistemleri arasında, verilerin temsil ettiği ve çalışmanın amacı ve kapsamı olan süreçlerin önemi ile tutarlı farklılıkların olup olmadığını anlamak için uygulanmaktadır. Farklı ürün sistemleri arasında karşılaştırma yapılması durumunda, tutarlılık kontrolü ayrıca, karşılaştırılan tüm ürün sistemlerine paylaştırma kurallarının ve sistem sınırı ayarının ve etki değerlendirmesinin tutarlı bir şekilde uygulanıp uygulanmadığını araştırmaktadır.

#### ***3.4.4.3. Sonuçlar, kısıtlamalar ve öneriler***

Yorumun diğer öğelerinin sonucu üzerine inşa edilmesi ve LCA'nın daha önceki aşamalarındaki ana bulgulardan yararlanılması, yorumlamanın nihai sonuç çıkarması, çalışmanın sınırlarını belirlemesi ve hedef kitleye amaç tanımına ve sonuçların amaçlanan uygulamalarına uygun olarak öneriler geliştirmesi gerekmektedir. Sonuçlar yinelenen bir şekilde çizilmelidir. Önemli konuların tanımlanması ve bunların bütünsellik, hassasiyet ve tutarlılık açısından değerlendirilmesi üzerine ön sonuçlar çıkarılabilir. Daha sonra, bu ön sonuçların çalışmanın kapsam tanımının gerekliliklerine uygun olup olmadığı kontrol edilir. Sonuçlar gerekliliklerle uyumluysa, bunlar nihai sonuç olarak raporlanabilir, aksi halde yeniden formüle edilmeli ve tekrar kontrol edilmelidir. Çalışmanın nihai sonuçlarına dayanan öneriler, sonuçların mantıklı ve makul sonuçları olmalıdır. Sadece anlamlı bulgulara dayanmalı ve hedef tanımında tanımlanan çalışmanın amaçlanan uygulaması ile ilgili olmalıdır.

#### ***3.4.4.4. Karşılaştırmalı çalışmalar için yorum***

Ürün sistemlerinin karşılaştırmasını içeren çalışmalarda, yorumlama, çalışmadan adil ve ilgili sonuçları sağlamak için bir dizi ek noktayı dikkate almak zorundadır:

- Sistemlerin her biri için önemli konular belirlenmeli ve sistemler arasında farklılık gösteren ve karşılaştırmanın dengesini değiştirme potansiyeline sahip olan konulara özel dikkat gösterilmelidir.
- Bütünsellik kontrolü, ürün sistemleri arasındaki bazı önemli sorunların işlenmesinin tamamlanmasındaki farklılıklara odaklanmalıdır. Karşılaştırma sonuçlarını etkileyebilecek farklılıklar varsa, bunlar mümkünse elimine edilmelidir ve aksi takdirde sonuçların formülasyonunda dikkate alınmalıdır.
- İki sistem arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını araştırmak için bir belirsizlik analizi yapılırsa, bu iki sistemin süreçleri arasındaki potansiyel eş varyasyonu dikkate alarak sıfırdan istatistiksel olarak anlamlı bir fark için kontrol edilmelidir.
- LCA'nın kamuya açıklanması öngörülen karşılaştırmalı değerlendirmelerde kullanılması amaçlandığında, ISO 14044 standardı değerlendirme ögesinin ayrıntılı hassasiyet analizlerine dayanan yorumlayıcı ifadeler içermesini gerektirmektedir. Standartta, incelenen farklı alternatifler arasında anlamlı farkları bulmak için istatistiksel bir analizin bulunmamasının otomatik olarak bu farklılıkların bulunmadığı sonucuna yol açmayacağı vurgulanmıştır (Hauschild vd., 2018).

### 3.5. Parasallaştırma

Enerji kaynakları, topluma çeşitli maliyetler getirmektedir. Doğrudan tesis inşaatı, işletmesi ve yakıt tüketimi maliyetleri veya kullanılan ekipmanın maliyeti gibi bu maliyetlerin bir kısmı doğrudan enerji üreticileri ve tüketicileri tarafından karşılanmaktadır. Bununla birlikte, bu maliyetler yalnızca enerji üreticileri ve tüketicileri tarafından değil, toplum ve çevre tarafından da karşılanmaktadır (Bernow vd., 1991).

Parasal değerlendirme veya parasallaştırma, sosyal ve biyofiziksel etkilerin ölçülerinin parasal birimlere dönüştürmesidir. Bu sayede, bu kavramlar birbirleriyle ve maliyet açısından karşılaştırılabilmektedirler. Parasallaştırmanın cevaplamaya çalıştığı temel soru, piyasa dışı malların nasıl değerlendirileceğidir. Parasallaştırma yeni bir fikir değildir. Kavramsal temeli Sidgwich'e (1883) dayanır ve Pigou (1920) tarafından resmileştirilmiştir. 1936'dan bu yana, parasallaştırma ekonomik, çevresel ve sosyal etkileri olan kamu ve özel projelerin Fayda Maliyet Analizinde yaygın ve önemli bir uygulama olmuştur. Parasallaştırma, toplam parasallaştırılmış ve indirgenmiş çevresel,

ekonomik ve sosyal etkiler tek bir puanda (Net Bugünkü Değer, NBD) toplandığında bir projenin genel değerlendirmesine izin vermektedir.  $NBD > 0$  ise, proje gerçekleştirilmeye değerdir. Bu nedenle, alternatif projeler karşılaştırılabilir ve en yüksek NBD'ye sahip olan diğerlerine göre daha üstün kabul edilmektedir (Weidema vd., 2013).

LCA'daki ağırlıklandırma yöntemlerinden bazıları, çevresel etkilerin parasallaştırılmasına dayanmaktadır ve parasallaştırma yöntemleri olarak adlandırılabilirler. Bu durumda ağırlıklandırma, boyutsuz bir puan yerine parasal olarak bir puanlamaya yol açmaktadır. Kategori uç noktalarına veya korunma konularına (örneğin, ekosistemler, insanlar, kaynaklar) verilen zararların parasallaştırılması için birkaç farklı yöntem uygulanmaktadır (Nyugen vd., 2016).

Çevresel dışsallıkları hesaba katmak için çeşitli teknikler vardır. Bunlar, nitel, öznel tekniklerden, çevresel etkilerin parasal değerlerinin kullanımına kadar uzanmaktadır. Niteliksel muamele, ağırlıklandırma ve sıralama, yüzde sayıcılar, kontrol maliyeti, hasar fonksiyonu, emisyonla para kazanma ve çok özellikli yatırım analizi olmak üzere yedi ana yaklaşım vardır. Bu yaklaşımlar; çevresel etkilerin “parasal değerlerinin” kullanımını ve ekonomik maliyetlerin yanı sıra değerlendirme için çevresel dışsallıkların mümkün olduğunca parasallaştırılması gerektiğini savunmaktadır. Bu sav iki temel sebepten kaynaklanmaktadır. Birincisi, parasallaştırılmış değerlerin kullanılması, doğrudan ekonomik maliyetler ve çevresel maliyetler arasında açık ve anlaşılır karşılaştırmalar yapılmasını sağlamakta ve çevresel etkilerin miktarları parasal olduğunda doğrudan maliyetlere kolayca eklenebilmektedir. İkincisi, parasallaştırma çevresel sorunların tutarlı bir şekilde ele alınmasına ve değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Nyugen vd., 2016). Dış maliyet hesaplama, ekonomik kararlar ile çevresel ve sosyal değerlendirme arasında bir köprü oluştururken, ortak bir birimde her iki tür sonucu da sağlayabilir ve teknik çözüm, ürün portföyü ve şirket stratejisini içeren üç karar seviyesini desteklemektedir. Ayrıca, önceliklendirme değerlendirmesi ve paydaş beklentileri ile uyumlaştırmaya izin veren üst düzey yönetimle bağlantı kurma desteği de vermektedir (Morel vd., 2018).

Parasallaştırmanın uygulanabilmesi için tedarik zincirinden ve tüketicilerden ham bilgi toplanması gerekmektedir. Bu da, doğrudan tedarikçiden birincisine kadar olan yaşam döngüsü envanteri ile başlar. Daha sonra, her bir etki için para kazanma faktörünün tanımlanması gerekmektedir ve bu aşamada, ödeme zorluğunu tanımlamak amacıyla bir müşteri anketi yapılabilir (Morel vd., 2018).

### 3.5.1. Çevresel dışsallıkları ölçmek için parasallaştırma yöntemleri

#### 3.5.1.1. Ürün Tasarımında Çevresel Öncelikler Stratejileri (EPS)

EPS sistemi, ürün geliştirmedeki çevresel etkilerin karşılaştırmalarında kullanılan en eski parasallaştırma modellerinden birisidir. EPS sistemi, insan sağlığı, abiyotik kaynaklar ve biyolojik çeşitlilik gibi SimaPro yazılımıyla benzer etki kategorileri içermektedir (Nyugen vd., 2016).

EPS sistemi 1990'lı yıllarda tasarımcılara ve ürün geliştiricilere tasarım seçeneklerinin çevresel performansını değerlendirmede yardımcı olmak için geliştirilmiştir. Çevresel etkilerin en düşük olduğu yerleri hızlı bir şekilde gösterebilen bir pusula gibi çalışması amaçlanmıştır. EPS sistemi 1999'dan beri değişmemiştir (Steen, 2015). Hiyerarşik bir sırada uygulanan beş sistem prensibi ile karakterize edilir:

- Yukarıdan aşağıya prensibi: Herhangi bir model, veri veya prosedür seçeneği, normal ürün geliştirme ortamlarında ürünün çevresel performansının iyileştirilmesine katkıda bulunma kabiliyeti ile yönlendirilir. Bu, bir değerlendirme için zaman ve maliyetin, ürünün iyileştirilmiş çevresel performansının değerine karşı tartılması gerektiği anlamına gelir.
- Endeks prensibi: EPS sisteminin kullanıcısı, hazır ağırlıklı değerlendirmelerin indeks olarak mevcut olacağı malzemeler ve işlemler bakımından bir ürün yaşam döngüsünü tanımlayabilecektir. Endeksler, üretim, işleme ve atık yönetimi açısından farklı türdeki malzemelerin ayrı ağırlıklı ve toplu çevresel etkilerini temsil eder.
- Varsayılan ilke: Varsayılan indeksler, incelenen herhangi bir ürün tasarım özelliğinin hızlı analizi için mevcut olacaktır. Daha sonra daha spesifik veriler kullanılabilir.
- Belirsizlik ilkesi: Belirsizlik gerçeğin bir parçasıdır; dolayısıyla, analizin de bir parçası olacaktır. Veriler, en iyi tahmin ve belirsizlik ölçüsü ile temsil edilmelidir. Bir önceliğin değişmezliğini belirtmek için duyarlılık analizleri yapılmalıdır.
- Varsayılan endekslerin seçimi: Kullanıcının mevcut bilgisi ve ihtiyaçları göz önünde bulundurularak, varsayılan endekslerin gerçek seçimi yapılır. Hem stok verileri hem de etki değerlendirme verileri için seçimler yapılır. Envanter verilerinin tahsisat kurallarına göre tutarlı bir şekilde düzenlenmesi gerekir; böylece malzemelerin veya bileşenlerin üretimi, işlenmesi ve atık yönetimi için

modüler bir şekilde kullanılabilirler. Etki değerlendirme verileri, çevresel etkilerin parasal değerlerini emisyonlardan, kullanımlardan veya kaynaklardan elde etmek için düzenlenmiştir. Varsayılan endeksler böylece malzemelerin ve bileşenlerin üretimi, işlenmesi ve atık yönetiminden kaynaklanan çevresel etkilerin parasal değerlerini ifade eder (Steen, 2015).

### **3.5.1.2. Dış enerji maliyetleri (ExternE)**

ExternE enerji taşıyıcılarından kaynaklanan zararların parasallaştırılması için kullanılan yöntemdir (Nyugen vd., 2016). Teknolojileri karşılaştırmak ya da politikaları değerlendirmek için, bir etki ve maliyet bileşiminin diğer bir bileşime göre daha iyi ya da daha kötü olup olmadığı tespit edilmelidir. Etki kategorileri farklı birimlere sahip olduklarından, bu kolay değildir; bu sebeple doğrudan eklenemezler ve onları ortak bir birime dönüştürmek gerekir (http-2).

ExternE metodolojisi bunu yapmak için bir çerçeve sağlar. Metodolojinin temel prensipleri aşağıda belirtilmiştir:

- ExternE metodolojisinin ilk prensibi, değerlendirmenin veya etkilerin ağırlıklandırılmasının, mümkün olduğunca nicel rakamlar ve prosedürler kullanılarak gerçekleştirilmesidir.
- İkincisi, etkilerin dönüştürüldüğü ortak birim parasal bir birimdir. Dış etkilerin vergilerle içselleştirilmesi için, bu etkilerin parasal birimlerde açıkça ifade edilmesi gerekmektedir.
- Etkilerin değerlendirilmesi, etkilenen iyi bilgilendirilmiş nüfusun (ölçülen) tercihlerine dayanmaktadır.
- Anlamlı sonuçlar alabilmek için görüşülen kişilerin, değerlendirilecek etki nedeniyle ortaya çıkan fayda değişimini anlamaları gerekir. Bu, bir baskıya veya etkiye değil, bir hasara değer vermenin önemli olduğu anlamına gelir.
- Metodoloji sahaya ve zamana bağlı dış maliyetleri hesaplayabilmelidir. Bu nedenle, çoğu çevresel etki için “Etki yolu yaklaşımı” kullanılmaktadır.
- Metodoloji sahaya ve zamana bağlı dış maliyetleri hesaplayabilmelidir (http-2).

### **3.5.1.3. Ecotax**

Ecotax, bir başka Avrupa parasal değerlendirme yöntemidir ve İsveç'teki emisyonlar ve kaynak kullanımıyla ilgili vergilerden (ücretlerden) kaynaklanan ağırlıklı faktörlere

dayanmaktadır. Bu değerleme yöntemini, 1999 yılında, Johansson geliştirmiş; Finnveden, 2006 yılında güncellenmiştir. Teoride, vergi seviyesinin optimal olarak devlet hedeflerine dayanması gerekmektedir. Ecotax, evresel müdahale birimi başına toplumsal değeri yansıtmalıdır. Ecotax yöntemi, çoğu durumda bir orta ve son nokta yaklaşımı kullanır. Ecotax yönteminin geliştirilmesi üç ana adımdan oluşmaktadır:

- Etki kategorilerinin seçimi: Vergiler, birbirleriyle farklı etki kategorilerini tartmak için ağırlıklandırma faktörleri olarak kullanılır. Hollanda Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) rehberi, SimaPro yazılımını uygulamak için bir temel olarak kullanılır (Ecotax, SimaPro yazılımında uygulanmaz). Kaynak analizinin yanı sıra, bir termodinamik yaklaşım da kullanılmaktadır.
- Uygun vergi ve harçların tespiti: Çevresel vergi ve harçların bir listesi İsveç evre koruma ajansının yayınlarında bulunabilir. Vergi ve harçlar, vergi yapısı, gelirler, baz vb. açısından karşılaştırmalı çalışmalarla belirlenir.
- Vergilerin ve etki kategorilerinin birleştirilmesi: Bu adım, vergilerin doğru etkilere bağlanmasını gerektirmektedir. Bazı durumlarda, doğrudan bir bağlantı vardır. Bazı vergiler çoklu etki kategorilerinin bir parçasıdır ve doğru vergiyi doğru etkiye tahsis etmek için teknik bir yeniden hesaplama gereklidir (Haar, 2017).

#### **3.5.1.4. Stepwise 2006**

Stepwise yöntemi, daha önce maliyet-fayda analizinin uygulanabilirliğinin bazı sorunlarından kaçınan ve çevresel etkilerin para kazanma ile ilgili olarak daha önce karşılaşılan eksiklik ve yüksek belirsizlikleri azaltmayı amaçlayan para kazanma için yeni bir yaklaşım kullanmaktadır. Stepwise 2006, nceki iki yaşam döngüsü etkisi değerlendirme yönteminden, EIDP 2003 ve IMPACT 2002'den en iyi performans gösteren karakterizasyon modellerini bir araya getirmektedir. Bu iki sütün yöntemi, kategori etkileri için orta nokta düzeyinde ve tek bir puanla ifade edilen bir parasal birim için karakterize edilen sonuçları hesaplamak için kullanılmaktadır (Haar, 2017).

#### 4. LİTERATÜR

Yapılan detaylı literatür taramasına göre, CVD yöntemi ile sentezlenen CNT üretiminin yaşam döngüsü analizinin kullanılması ile ilgili çalışmalar literatürde az sayıda da olsa bulunmakla birlikte, parasallaştırma ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca ulusal ölçekte, CVD yöntemi ile sentezlenen CNT'lerin çevresel etkilerinin ve ekonomik değerlendirmesinin birlikte araştırıldığı ve incelendiği herhangi bir çalışmaya rastlanmadığı gibi, yaşam döngüsü analizi ve parasallaştırmanın bütünsel bir şekilde uygulandığı bir çalışma da tespit edilememiştir.

**Griffiths vd. (2012)** yürüttükleri çalışmada, kimyasal buhar biriktime (CVD) yöntemi ile sentezlenen karbon nanotüpün (CNT) çevresel performansının kaynaklara ve paylarına bağlı olarak nasıl değiştiğini belirlemişlerdir. Kimyasal buhar çöktürme yöntemiyle çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT) üretimi ile oluşan çevresel etkileri belirlemek için literatür çalışmalarından elde edilen bilgiler ile proses enerji girdileri, kullanılan kimyasal girdileri, ekipman altyapısı ve oluşabilecek emisyonlar doğrudan ölçme prosesi kullanılarak beşikten kapıya bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Karbon nanotüplerin laboratuvar ölçeğinde CVD yöntemiyle sentezlenmesi bu çalışmanın sistem sınırlarını oluşturmaktadır. Yaşam döngüsü analizinin fonksiyonel birimi bir saatlik CVD prosesinde sentezlenen 0,3 g karbon nanotüptür. Çevresel etkiler; karbon hammaddesi ve katalizörün etkisi, fırın ısınması esnasındaki etki, reaksiyon esnasındaki etki, fırın soğutulması esnasındaki etki, saflaştırma etkisi ve ekipman ve altyapı etkisi olmak üzere altı aşamada incelenmiştir. Çevresel etkileri hesaplamak amacıyla SimaPro yazılımı ve Ecoinvent (v.2.2) veritabanından yararlanılmıştır. ReCiPe orta nokta çevresel etki metodu kullanılmıştır. Genel en büyük etki; enerji kullanımı olurken, bu sırayı ekipman altyapısı, kimyasalların ayak izi, saflaştırma, çıkış gazlarının atmosfere salınması takip etmiştir. Ancak daha geniş bir sistem sınırlaması düşünüldüğünde proses altyapısını kapsayan ekipman kullanımının çok daha etkili olduğu vurgulanmıştır.

**Trompeta vd. (2015)** çalışmalarında, çok-duvarlı karbon nanotüplerin (MWNTs) termal kimyasal buhar çöktürme (T-CVD) yoluyla büyümesi üzerine LCA uygulamıştır. Laboratuvar koşulunda CVD süreci ile büyütülen MWCNT'lerin "bir yığını" çalışmanın fonksiyonel birimidir. MWCNT'lerin laboratuvar ölçeğinde CVD yöntemiyle sentezlenmesi bu çalışmanın sistem sınırlarını oluşturmaktadır. Bu çalışmaya ilişkin

veriler yerinde ölçümler, doğrudan enerji okumaları, malzeme kullanımı, yazılım tabanlı envanter veri setleri ile toplanmıştır (Ecoinvent Database v3.1). ReCiPe orta nokta çevresel etki metodu kullanılmıştır. ReCiPe orta nokta metodolojisinde on sekiz etki kategorisi vardır, ancak bu çalışmada sadece altı tanesi önemlerinden dolayı analiz edilmiştir. Sonuçlar; iklim değişikliği, ozon tüketimi, insan toksisitesi, partikül madde oluşumu, metal tükenmesi ve fosil tükenmesi kategorileri dikkate alınarak irdelenmiştir. CNT üretiminde kullanılan malzemelerin ve enerjinin etki değerlendirmesi, iki sıcaklık koşulunda 700 °C ve 800 °C gerçekleşmiştir. Çevresel etkinin bütününe bakıldığında, kritik rol oynayan başlıca faktörler elektrik ve karbon kaynağı olarak kullanılan asetilen tüketimidir. Elektrik tüketimi, genel CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır. İki sıcaklık karşılaştırıldığında ise 800 °C 'deki üretimin daha az enerji yoğunluğuna sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuç, yüksek sıcaklıklarda elde edilen CNT'lerin daha yüksek verime sahip olması ile ilişkilendirilmiştir. 700 °C üretilen CNT'nin kg başına CO<sub>2</sub> eşdeğeri 484 kg olurken 700 °C'de üretilen CNT için ise yaklaşık 534 kg olarak bulunmuştur. Hem enerji tüketiminin hem de karbon kaynağı beslemesinin, özellikle iklim değişikliği açısından nihai çevresel ayak izinde önemli bir rol oynadığı görülmüştür.

**Healy vd. (2008)** tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ark fırını, kimyasal buhar çöktürme CVD ve yüksek basınçlı karbon monoksitten (HIPCO) üretilen 1 g karbon nanotüpün beşikten mezara LCA çalışması yapılmıştır. Her yöntem, katalizör hazırlama, sentez, saflaştırma, denetim ve paketlenme içeren işlem aşamalarından oluşmaktadır. Üretim süreçlerinin çevresel özelliklerini değerlendirmek için SimaPro yazılımı ile kullanılmıştır. Bu çalışmada göz önüne alınan etkiler; iklim değişikliği, asidifikasyon, ötrofikasyon, arazi kullanımı, mineral tükenmesi, ekotoksikite, ozon tabakası tükenmesi ve karsinogenlerin yanı sıra organik ve inorganik oksitler ve insan solunum yolu hastalıklarına neden olan partiküllerdir. CVD süreci aynı üretim hacmine ulaşmak için daha fazla proses gerektirdiğinden, bu süreç elektrik yüküne ve dolayısıyla en büyük çevresel etkiye neden olmuştur. Her üretim sürecinde neredeyse tüm emisyonların üretim sırasında elektrik tüketiminden kaynaklandığını görülmüştür.

**Banar (2015)**'ın yaptığı çalışmada, atık lastiklerin pirolizinin LCA'sı yapılmıştır. Piroliz çalışmaları 400°C'de gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonel birim, piroliz tesisine giren 1 ton atık lastik olarak tanımlanmıştır. LCA hesaplaması lisanslı SimaPro 8 yazılımı

kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Etki değerlendirme aşamasında, CML-IA (v3.00) yöntemi seçilen etki kategorileri (abiyotik kaynakların tükenmesi, küresel ısınma, insanlara olan toksik etki, sucul ekotoksitite, asidifikasyon ve ötrofikasyon) için uygulanmıştır. Karakterizasyon sonuçları, asidifikasyon hariç tüm etki kategorilerinin negatif değerlere sahip olduğunu göstermektedir. Geri kazanılan ürünlerden kaynaklı negatif değerler, değerli piroliz ürünlerinden kaynaklanmaktadır. Asidifikasyon, esas olarak yanma sonucu baca gazlarındaki SO<sub>2</sub> emisyonlarından kaynaklanmıştır. Piroliz ürünlerinin yeterli miktarlarda kullanılması ve baca gazı arıtma sistemlerinin uygulanması durumunda, piroliz işlemi atık lastikler için çevresel açıdan etkili bir çözüm olarak bulunmuştur.

**Alston vd. (2011)**'nin yaptıkları çalışmada, elektrikli ve elektronik cihaz atıklarının (WEEE) içinde %25 civarında bulunan plastiklerin pirolizini ve piroliz prosesini diğer alternatif yöntemlerle karşılaştırmak için LCA analizi yapmışlardır. Piroliz çalışmaları 800 °C'de gerçekleştirilmiştir. Piroliz için kullanılan hammadde, yoğun polimerler içermektedir. Piroliz sonrası, ortalama %39 gaz ürün, %36 piroliz yağı ve %25 kalıntı oluşmuştur. Gaz ürünün yaklaşık %35'i metan ve %42'si karbon monoksittir. Diğer kısımlar ise hidrokarbonlar, oksijen ve karbon dioksitten oluşmaktadır. Piroliz yağların neredeyse tamamı aromatiklerdir ve akaryakıtla benzer bir karışım oluşturmuştur. Piroliz verimlerine bakıldığında, atık plastik ağırlığının yaklaşık %70'i potansiyel yakıt olarak bulunmuştur. LCA çalışmasında, pirolizin çevresel etkileri ile karşılaştırılan alternatif geri kazanım/bertaraf yöntemleri sırasıyla mekanik geri dönüşüm, yakma ve depolamadır. Fonksiyonel birim, 1 kg atık plastik içeren WEEE'nin ağırlığı olarak alınmıştır. LCA sonuçlarına göre, depolama, bölgedeki iklim değişikliği üzerinde en az etkiye sahip olsa da diğer birkaç kategoride zararlı görülmüştür. Yakma, karbon kalıntılarını azaltmada en etkili yöntemdir fakat, iklim değişikliği etkisi üzerinde en baskın etkiye sahiptir. Tüm alternatifler karşılaştırıldığında en iyi geri kazanım/bertaraf yönteminin piroliz olduğuna karar verilmiştir.

## 5. MATERYAL VE YÖNTEM

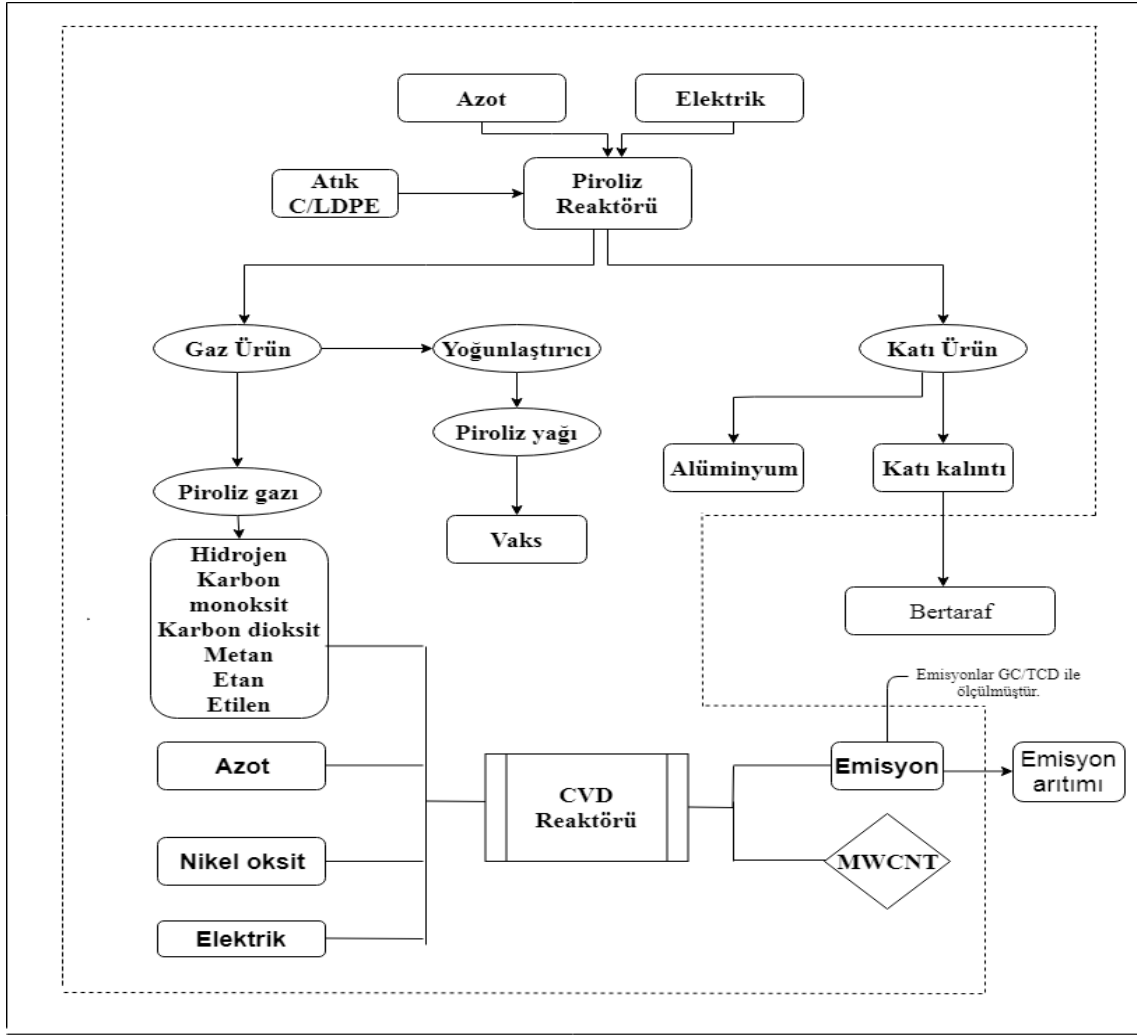
Bu bölümde, atık C/LDPE'lerin (Kompozit düşük yoğunluklu polietilen) pirolizi ile elde edilen gaz üründen kimyasal buhar çöktürme yöntemi ile sentezlenen karbon nanotüplerin çevresel etkilerini belirlemek amacıyla LCA ve parasallaştırma analizleri yapılmıştır. Yapılan LCA çalışması ISO 14040/ISO 14044'e uygun olarak dört adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda, hedef ve kapsam tanımı ile çalışmanın amaçları ve hedeflenen çıktılara ulaşmak için gerekli ana bileşenler ortaya konularak kimyasal buhar çöktürme yöntemi ile sentezlenen karbon nanotüp üretiminin sistem sınırları ve fonksiyonel birimi belirlenmiştir. İkinci adımda, yaşam döngüsü envanter analizi için (LCI) malzeme ve enerji akışının sayısal verilerinin toplanması ve değerlendirilmesi, sistem sınırları kapalı bir kutu olarak ele alınarak, sistem sınırına giren tüm kimyasallar, enerji bileşenleri ve çıkan kirlenici bileşenleri fonksiyonel birim bazında hesaplanmıştır. Üçüncü adımda, yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (LCIA) ile karbon nanotüp sentezinin tüm bileşenlerinin çevresel etkileri etki kategorileri bazında lisanslı SimaPro 8.5.0.0 yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Dördüncü aşamada ise etki değerlendirmesi sonuçları yorumlanmıştır.

Tezin diğer bir aşaması olan parasallaştırma (monetization) çalışması ise dört adımda gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, sentezlenen karbon nanotüp için hedef ve kapsam tanımı yapılmıştır. İkinci adımda, maliyet prosesleri detaylı bir şekilde incelenerek maliyet faktörleri belirlenmiş ve kategorilere ayrılmıştır. Üçüncü adımda, maliyet verileri toplanarak envanter oluşturulmuştur. Dördüncü adımda, parasallaştırma modeli, LCA sonuçlarına göre yorumlanmıştır.

### 5.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA)

#### 5.1.1. Hedef ve kapsam tanımı

Bu çalışmanın amacı, atık C/LDPE malzemesinin pirolizi sonucunda oluşan gaz ürün eldesinden kimyasal buhar çöktürme yöntemi ile sentezlenen karbon nanotüplerin çevresel etkilerin LCA yöntemi ile belirlenmesidir. Bu amaç doğrultusunda fonksiyonel birim, laboratuvar tipi CVD reaktöründe sentezlenen bir deney setindeki 0,553 g CNT olarak belirlenmiştir. Sistem sınırları hammadde temini ve üretim sürecini kapsayan, “beşikten kapıya” şeklinde oluşturulmuştur. Atık C/LDPE'nin pirolizi gazının CVD reaktörüne beslenmesiyle büyütülen karbon nanotüpe ait LCA analizi sistem sınırları Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Laboratuvar ölçeğinde üretilen karbon nanotüpün sistem sınırı.

### 5.1.2. Yaşam döngüsü envanter analizi

LCA çalışmasında deneysel aşamada kullanılan malzeme ve enerji miktarları “ön plan verisi”, bu malzemelerin ve kullanılan elektrik enerjisinin üretilmesine dair veriler ise “arka plan verisi” olarak tanımlanmıştır. Ön plan verilerine ait veriler sistem tanımında detaylı bir şekilde verilmiş olup, arka plan verileri lisanslı SimaPro 8.5.0.0 PhD yazılımında bulunan Ecoinvent3 veritabanından elde edilmiştir. Türkiye’nin elektrik profil verileri veri tabanında olmadığı için Günkaya ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmadan elde edilmiş olup, Türkiye’nin 2018 yılı Temmuz sonu elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı %30,5 doğal gaz, %22,7 hidroelektrik, %36 kömür (başlıca taş kömürü, ithal kömür ve linyit), %6,2 rüzgar, %2,3 jeotermal şeklindedir (http-1).

Veri tabanında nikel oksit bulunamadığı için yerine nikel üretiminin verileri kullanılmıştır.

#### 5.1.2.1. Sistem tanımı

Bu projede, geri dönüşümleri oldukça zor olan ve plastik-alüminyum sınıfında yer alan C/LDPE atıklarının pirolizi sonucu elde edilen katı, sıvı ve gaz ürünlerin geri kazanılması hedeflendiğinden, gaz üründen karbon nanotüp (CNT), katı üründen alüminyum ve sıvı piroliz ürününden de vaks geri kazanımının gerçekleştirilmesi esas alınmıştır. Projenin ana hedefinin CNT üretimi olması sebebiyle, LCA çalışması, en yüksek gaz veriminin elde edildiği piroliz koşullarına (600°C, 20°C/dk) göre gerçekleştirilmiştir. Bu koşullarda gaz ürün verimi %47,6±0,1 katı ve sıvı ürün verimleri ise sırasıyla %5,8±0,1 ve %46,5±0,1 olarak bulunmuştur.

Piroliz için, 10 g atık, atmosferik basınçta, azot gazıyla süpürülmüş reaktöre (380 S) paslanmaz çelikten yapılmış 240 cm<sup>3</sup> hacimli sabit yataklı (Heinze tipi) yerleştirilmiştir. Piroliz reaktörü Görsel 5.1’de gösterilmiştir. Piroliz işlemi için atık C/LDPE ambalajından 10mmx10mm boyutlarında analitik örnekler hazırlanmış ve nem, kül, uçucu madde, sabit karbon analizleri yapılarak başlangıç özellikleri belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, nem %<0,0001, kül %18,37, uçucu madde %80,71 ve sabit karbon %0,92 bulunmuştur. Reaktör haznesinde kalan katı kalıntı ve toplanan sıvı ürünler tartılarak organik madde temelinde verimleri belirlenmiş, gaz ürün ise farktan hesaplanmıştır. Organik madde miktarı Eşitlik 5.1 ile hesaplanmıştır.

$$\text{OMM (Organik Madde Miktarı)} = 10\text{g} - [10\text{g} \times (\% \text{kül} + \% \text{nem})] \quad (5.1)$$

$$\text{OMM} = 10\text{ g} - [10\text{ g} \times (0,1837+0,0001)] = \mathbf{8,16\text{ g}}$$

Atık C/LDPE’nin 20°C/dk ısıtma hızı ve 600°C’de gerçekleştirilen piroliz çalışmasından elde edilen ürünlerin kütleli miktarları 5.2 nolu eşitlikten hesaplanmıştır:

$$\text{Miktar, g} = [\text{A}] \times [\text{B}] \quad (5.2)$$

Burada; A piroliz için kullanılan atıktaki organik madde miktarı (g) ve B ürün verimidir (%).

$$\text{Katı Ürün: } [8,16\text{ g}] \times [\%5,8] = \mathbf{0,47\text{ g}}$$

$$\text{Sıvı Ürün: } [8,16\text{ g}] \times [\%46,5] = \mathbf{3,80\text{ g}}$$

$$\text{Gaz Ürün: } [8,16\text{ g}] \times [\%47,6] = \mathbf{3,89\text{ g}}$$



**Görsel 5.1. Piroliz reaktörü**

### ***Bir piroliz deneyi için harcanan elektrik***

Seçilen deney koşullarının gerçekleşmesi için, reaktör 20°C/dk ısıtma hızı ile 600 °C'ye 30 dakikada gelmektedir. Hedef sıcaklığa ulaşıldıktan sonra ise 30 dk. beklenerek gaz çıkışının sona ermesi sağlanmaktadır. Bir piroliz deneyi için, reaksiyon ve izleme süresi boyunca reaktör toplamda 1 saat çalışmaktadır. Piroliz reaktörünün gücü 3600 Watt'tır. Bir piroliz deneyi için harcanan elektrik 5.3 nolu eşitlikten hesaplanmıştır:

$$\text{Harcanan elektrik, kWh} = [A] \times [B] \quad (5.3)$$

Burada; A piroliz süresi (dakika) ve B cihazın gücüdür (Watt).

$$\text{Bir piroliz deneyi için harcanan elektrik} = [60 \text{ dk}] \times [3600 \text{ Watt}] = \mathbf{3,6 \text{ kWh}}$$

### ***Süpürücü gaz miktarının belirlenmesi***

Piroliz boyunca reaktör 1 saat boyunca 300 mL/dk akış hızında azot gazı ile süpürülmektedir. Tüketilen azot miktarı 5.4 nolu eşitlikten hesaplanmıştır:

$$\text{Süpürücü gaz miktarı, g} = [A] \times [B] \times [C] \quad (5.4)$$

Burada; A piroliz süresi (dakika), B akış hızı (mL/dk) ve C gazın yoğunluğudur ( $\text{kg/m}^3$  (15 °C, 1atm)).

$$\text{Tüketilen azot miktarı} = [60 \text{ dk}] \times [300 \text{ mL/dk}] \times [1,185 \text{ kg/m}^3] = \mathbf{21,33 \text{ g}}$$

### ***Katı kalıntı Al geri kazanımının ön plan verileri***

C/LDPE'nin pirolizi sonucu elde edilen katı ürün 900°C' de 30 dk kül fırınında yakılmıştır. Katı kalıntı Al içeriği gravimetrik olarak %88,70 olarak belirlenmiştir. Gravimetrik analiz sonuçlarına göre geri kazanılan alüminyum ([Katı katıntı, g] x [%88,7]) **0,514 g**'dır. Kalan katı ürün ([0,58 g]-[0,514 g]) ise 0,066 g olup bertarafı sistem sınırlarına dahil değildir. Al geri kazanımı için kül fırınının harcadığı elektrik miktarı Eşitlik 5.3 ile hesaplanmıştır. Kül fırınının gücü 4000 Watt'tır. Bu durumda;

$$\text{Kül fırınının harcadığı elektrik} = [30 \text{ dk}] \times [4000 \text{ Watt}] = \mathbf{2 \text{ kWh}}$$

Al geri kazanımı yoluyla önlenen çevresel etkiler, geri kazanılmış Al'nin Ecoinvent veri tabanından seçilen ikincil üretim Al ile yer değiştirmesiyle belirlenmiştir.

### ***Sıvı üründen vaks geri kazanımının ön plan verileri***

Piroliz sırasında, kompozit ambalajdaki LDPE bozunarak gaz faza geçmekte, gaz tekrar yoğunlaşarak vaks haline gelmektedir. Piroliz sonrası oluşan **3,80 g** vaksı elde etmek için, sıvı toplama kapları içinde biriken sıvı ürün, ortalama 50 mL diklorometan (DCM) çözücüsü ile yıkanarak alınmakta ve sonrasında evaporatörde DCM uzaklaştırılmaktadır. Harcanan DCM miktarı ([50 mL]x[1,33 g/cm<sup>3</sup>]x[1 cm<sup>3</sup>/1 mL]) **66,5 g**'dır. Çözücüyü uzaklaştırmak için evaporatör 40°C'de ortalama 30 dk. çalışmaktadır. Gücü 100 Watt olan evaporatörün harcadığı elektrik miktarı Eşitlik 5.3 ile hesaplanmıştır.

$$\text{Evaporatörün harcadığı elektrik} = [30 \text{ dk}] \times [100 \text{ Watt}] = \mathbf{0,05 \text{ kWh}}$$

Vaks geri kazanımı yoluyla önlenen çevresel etkiler, geri kazanılmış vaksın Ecoinvent veri tabanından seçilen vaks ile yer değiştirmesiyle belirlenmiştir.

### ***Gaz ürün ön plan verileri***

Pirolizden elde edilen gaz ürün, CNT üretimi için CVD reaktörüne beslenmektedir. Piroliz sırasında gaz torbalarında toplanan gazların analizleri Petkim Petrokimya Holding A.Ş. Aliğa'da bulunan laboratuvarlarda GC-FID ve GC-TCD sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gaz ürünün hacimce % bileşimi Çizelge 5.1'de verilmiştir.

**Çizelge 5.1.** Gaz ürün bileşenleri

| Bileşen                                 | Hacimce % |
|-----------------------------------------|-----------|
| Hidrojen (H <sub>2</sub> )              | 2,03      |
| Karbondiyoksit (CO <sub>2</sub> )       | 31,03     |
| Karbonmonoksit (CO)                     | 25,39     |
| Metan (CH <sub>4</sub> )                | 12,33     |
| Etan (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )   | 9,82      |
| Etilen (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) | 19,41     |

Gaz ürünlerin kütle miktarlarını belirlemek için hacim fraksiyonlarının mol fraksiyonlarına eşit olduğu kabul edilmiştir. Bu karışım 100 mol olarak düşünülürse, her bir bileşenin kütlesi;

$$m_{H_2} = (n_{H_2}).(M_{H_2}) = (2,03 \text{ mol}).(2 \text{ g/mol}) = 4,06 \text{ g}$$

$$m_{CO_2} = (n_{CO_2}).(M_{CO_2}) = (31,03 \text{ mol}).(44 \text{ g/mol}) = 1365,32 \text{ g}$$

$$m_{CO} = (n_{CO}).(M_{CO}) = (25,39 \text{ mol}).(28 \text{ g/mol}) = 710,92 \text{ g}$$

$$m_{CH_4} = (n_{CH_4}).(M_{CH_4}) = (12,33 \text{ mol}).(16 \text{ g/mol}) = 197,28 \text{ g}$$

$$m_{C_2H_6} = (n_{C_2H_6}).(M_{C_2H_6}) = (9,82 \text{ mol}).(30 \text{ g/mol}) = 294,6 \text{ g}$$

$$m_{C_2H_4} = (n_{C_2H_4}).(M_{C_2H_4}) = (19,41 \text{ mol}).(28 \text{ g/mol}) = 543,48 \text{ g}$$

Toplam ağırlık:

$$m_m = m_{H_2} + m_{CO_2} + m_{CO} + m_{CH_4} + m_{C_2H_6} + m_{C_2H_4}$$

$$m_m = 4,06 + 1365,32 + 710,92 + 197,28 + 294,6 + 543,48$$

$$m_m = 3115,66 \text{ g}$$

Bu karışımın moleküler ağırlığı:

$$M_m = m_m / T_m$$

$$M_m = 3115,66 \text{ g} / 100 \text{ mol}$$

$$M_m = 31,1566 \text{ g/mol}$$

Gaz ürünün molar ağırlığı:

$$n_g = m_g / M_m$$

$$n_g = 3,89 \text{ g} / 31,1566 \text{ g/mol}$$

$$n_g = 0,125 \text{ mol}$$

Her bileşenin molar ağırlığı:

$$n_{H_2} = (0,125 \text{ mol}) \cdot (2,03 \text{ mol}/100\text{mol}) = 0,003 \text{ mol}$$

$$n_{CO_2} = (0,125 \text{ mol}) \cdot (31,03 \text{ mol}/100\text{mol}) = 0,039 \text{ mol}$$

$$n_{CO} = (0,125 \text{ mol}) \cdot (25,39 \text{ mol}/100\text{mol}) = 0,032 \text{ mol}$$

$$n_{CH_4} = (0,125 \text{ mol}) \cdot (12,33 \text{ mol}/100\text{mol}) = 0,015 \text{ mol}$$

$$n_{C_2H_6} = (0,125 \text{ mol}) \cdot (9,82 \text{ mol}/100\text{mol}) = 0,012 \text{ mol}$$

$$n_{C_2H_4} = (0,125 \text{ mol}) \cdot (19,41 \text{ mol}/100\text{mol}) = 0,024 \text{ mol}$$

$$\text{Toplam} = \mathbf{0,125 \text{ g}}$$

Her bileşenin karışım içindeki kütleli ağırlığı:

$$m_{H_2} = (n_{H_2}) \cdot (M_{H_2}) = (0,003 \text{ mol}) \cdot (2 \text{ g/mol}) = 0,006 \text{ g}$$

$$m_{CO_2} = (n_{CO_2}) \cdot (M_{CO_2}) = (0,039 \text{ mol}) \cdot (44 \text{ g/mol}) = 1,716 \text{ g}$$

$$m_{CO} = (n_{CO}) \cdot (M_{CO}) = (0,032 \text{ mol}) \cdot (28 \text{ g/mol}) = 0,896 \text{ g}$$

$$m_{CH_4} = (n_{CH_4}) \cdot (M_{CH_4}) = (0,015 \text{ mol}) \cdot (16 \text{ g/mol}) = 0,240 \text{ g}$$

$$m_{C_2H_6} = (n_{C_2H_6}) \cdot (M_{C_2H_6}) = (0,012 \text{ mol}) \cdot (30 \text{ g/mol}) = 0,360 \text{ g}$$

$$m_{C_2H_4} = (n_{C_2H_4}) \cdot (M_{C_2H_4}) = (0,024 \text{ mol}) \cdot (28 \text{ g/mol}) = 0,672 \text{ g}$$

$$\text{Toplam} = \mathbf{3,89 \text{ g}}$$

Projenin ana hedefi olan, C/LDPE'nin pirolizi sonucu edilen gaz üründen, karbon nanotüp üretimi doğrultusunda, CNT üretmek için alınan Protherm marka Kanthal HAS Modüler ısıtıcı elemanlı yatay tasarım fırın; 70 mm çapında 250 mm ısıtma bölgesi

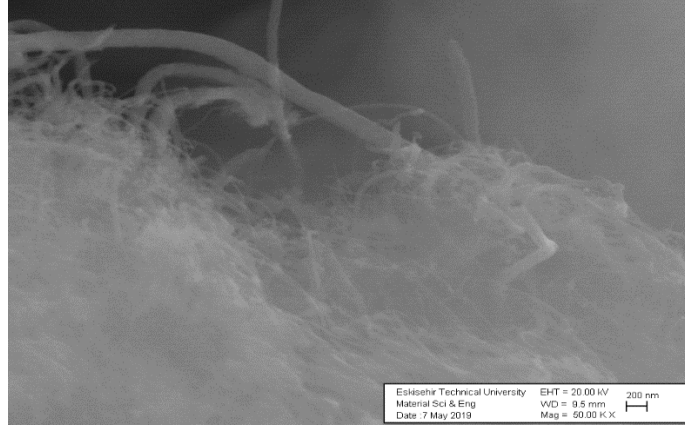
uzunluğuna sahip, maksimum çalışma sıcaklığı 1100°C olan kuvars tüp, fırın çıkış gazının kontrolünün sağlandığı nargile sistemi, örnekleme yapmaya imkan veren ikinci bir çıkış noktası ve gaz akış ölçerlerden oluşmaktadır (Görsel 5.2). CVD yöntemiyle CNT üretiminin prensibi, karbon kaynağının kuvars tüpten sürekli akışla geçirilmesiyle, seramik ya da kuvars yatak üzerine yerleştirilen destekleyici geçiş metaller üzerinde CNT olarak büyümesidir.

CNT retimi ile ilgili alışmalar 600°C sıcaklıkta ve katalizör olarak nikel oksit (NiO) varlığında gerçekleştirilmiştir. 10 g C/LDPE atığı piroliz edilerek gaz çıkış hattı doğrudan CVD reaktörüne bağlanmıştır. 0,1 g katalizör, CNT retimi için kuvars tp reaktöre yerleştirilmiş ve N<sub>2</sub> süpürücü gazı ile 600°C sıcaklığa ısıtılmıştır. İstenilen sıcaklığa gelindiğinde karbon kaynağı olarak piroliz gazı ile 40 dk besleme yapılmıştır. Daha sonra fırın kaydırılarak ani soğutma sağlanmıştır.



**Görsel 5.2.** CNT sentezinde kullanılan kimyasal buhar çöktürme fırını

Sentezlenen CNT'nin morfolojik zellikleri, Eskişehir Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Zeiss SUPRA 50VP marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile belirlenmiştir. Bir miktar CNT, etil alkolde ultrasonik prosesr vasıtasıyla disperse edildikten sonra karbon bant üzerine damlatılıp etüvde kurutulmuştur. Numunenin analizi, kaplama yapmadan 20 kV voltaj ile 50000X büyütmede yapılmış ve görüntüsü Görsel 5.3'te verilmiştir. Bu şekle göre CNT'ler birkaç m uzunluk ve 10-200 nm aralığında çap dağılımına sahiptirler.



**Görsel 5.3.** CNT örneğine ait SEM görüntüsü

### ***CNT üretimi ön plan verileri***

CNT üretimi için kimyasal buhar çöktürme fırın 600°C sıcaklığa 15 dakikada ulaşmaktadır. Reaksiyon ise 40 dakikada gerçekleşmektedir. Fırının harcadığı elektrik miktarı Eşitlik 5.3 ile hesaplanmıştır. CVD fırınının gücü 3300 Watt'tır. Bu durumda;

$$\text{CVD fırınının harcadığı elektrik} = [65 \text{ dk}] \times [3300 \text{ Watt}] = \mathbf{3,575 \text{ kWh}}$$

Reaksiyon gerçekleştikten sonra soğuma için fırın 1 saat boyunca 300 mL/dk akış hızında azot gazı ile süpürülmektedir. Tüketilen azot miktarı 5.4 nolu eşitlikten hesaplanmıştır:

$$\text{Tüketilen azot miktarı} = [60 \text{ dk}] \times [300 \text{ mL/dk}] \times [1,185 \text{ kg/m}^3] = \mathbf{21,33 \text{ g}}$$

Laboratuvar ölçekli gerçekleştirilen çalışmalarda 600°C'de etilen gazının parçalanması sonucu CNT üretimi gerçekleşmiştir. Bir deney setinde 0,553 g CNT oluşmuştur. Çıkış gazının analizi Eskişehir Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Katı Atık Laboratuvarında bulunan Shimadzu marka GC-TCD cihazı ile ölçülmüştür. Cihazda, 1 µm kalınlıkta Carboxen, 6mmx3mm dolgu kolon, taşıyıcı gaz olarak ise dakikada 30 mL akış hızında helyum kullanılmıştır. Reaksiyon sırasında gaz torbalarında toplanan gazlar 1000 µL'lik hacimlerde cihaza verilerek çıkış gazı analizleri gerçekleştirilmiştir. Çıkış gazı analizi için, başlangıç fırın sıcaklığı 43°C seçilmiş ve bu sıcaklıkta 2 dk bekletilmiştir. Daha sonra dakikada 10°C sıcaklık artışı ile 200°C'ye ulaşılmış ve bu sıcaklıkta 20 dakika bekletilmiştir. Elde edilen pikler daha önce oluşturulan kalibrasyon grafikleri ile birlikte değerlendirilmiş ve gaz ürünün hacimce % bileşimi belirlenmiştir. Kaçak olmadığı kabul edilerek kütle dengliği yapılmıştır.

10 g C/LDPE ambalaj atığının piroliz edilerek, gaz çıkış hattının doğrudan CVD reaktörüne bağlanması ile 0,553 g karbon nanotüp sentezlenmiştir. LCA çalışmasında CNT üretiminin yanı sıra, ön aşama olan piroliz prosesinin tamamının getireceği yan ürünler nedeniyle çalışmada paylaştırma (allocation) işlemi yapılmıştır. Gaz ürün verimine bağlı olarak proses girdileri bazında kütleli paylaştırma yapılmış olup hedef ürünle ilgili miktarlar dikkate alınmıştır. Tüm bu veriler doğrultusunda oluşturulan ön plan verileri Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.2.** Deneyisel çalışmayla ilgili envanter verileri (fonksiyonel birim bazında)

| Veriler                                 | Miktar/Değer | Yorumlar/Varsayımlar                                                                                                        |
|-----------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Girdiler</b>                         |              |                                                                                                                             |
| Azot (N <sub>2</sub> )                  | 20,31 g      | Reaksiyon: 60 dk x 300 mL/dk<br>Soğutma: 60 dk x 300 mL/dk                                                                  |
| Nikel oksit (NiO)                       | 0,1 g        | Katalizör                                                                                                                   |
| Diklorometan                            | 31,65 g      | Yıkama                                                                                                                      |
| <b>Enerji tüketimi</b>                  |              |                                                                                                                             |
| Elektrik                                | 4,39 kWh     | Piroliz reaksiyonu: 60 dk x 600°C<br>Evaporatör: 30 dk x 40°C<br>Kül fırını: 30 dk x 900°C<br>CVD reaksiyonu: 65 dk x 600°C |
| <b>Çıktılar</b>                         |              |                                                                                                                             |
| Azot (N <sub>2</sub> )                  | 20,31 g      | Kütle dengeliği                                                                                                             |
| Hidrojen (H <sub>2</sub> )              | 0,098 g      |                                                                                                                             |
| Karbon dioksit (CO <sub>2</sub> )       | 1,716 g      |                                                                                                                             |
| Karbon monoksit (CO)                    | 0,896 g      |                                                                                                                             |
| Metan (CH <sub>4</sub> )                | 0,240 g      |                                                                                                                             |
| Etan (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )   | 0,360 g      |                                                                                                                             |
| Etilen (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) | 0,027 g      |                                                                                                                             |
| Alüminyum                               | 0,514 g      |                                                                                                                             |
| Vaks                                    | 3,80 g       |                                                                                                                             |
| Katı kalıntı                            | 0,066 g      |                                                                                                                             |

### 5.1.3. Etki Analizi

Atık C/LDPE’nin pirolizi sonrası elde edilen gaz ürün eldesinden kimyasal buhar çöktürme yöntemi ile sentezlenen karbon nanotüpün, hammadde temini ve üretimiyle ilgili çevresel etkileri lisanslı Simapro 8.5.0.0 PhD yazılımına entegre CML-IA (v.3.03/EU25+3,2000) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Etki kategorileri ise elementel bazda abiyotik kaynakların tükenmesi (ADP<sub>e</sub>, kg Sb ed.), fosil yakıt bazlı abiyotik kaynakların tükenmesi (ADP<sub>ff</sub>, MJ), küresel ısınma potansiyeli (GWP, kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri ed.), asidifikasyon potansiyeli (AP, kg SO<sub>2</sub> ed.), ötrofikasyon potansiyeli (EP, kg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>

ed.), insanlara olan toksik etki (HTP), fotokimyasal oksidasyon potansiyeli (POP, kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ed.) ve ozon tabakasının tükenmesi potansiyeli (ODP, kg CFC-11 ed.) olarak ele alınmıştır. Etki analizi sonucu bulunan değerlendirme sonuçları Bulgular'da (Bölüm 6) verilmiştir.

#### 5.1.4. Yorum

Çalışmanın yorum aşaması, etki analizi sonuçlarına ait bulguların değerlendirmesi olduğu için, Bulgular'da (Bölüm 6) verilmiştir.

#### 5.2. Parasallaştırma

Parasallaştırma; parasal değerlendirme, sosyal ve biyofiziksel etki önlemlerinin para birimlerine dönüştürülmesi uygulamasıdır. Parasal değerlendirme, refah ekonomisinde dışsallıklar kavramı ile ilgilidir. Dışsallıklar, bir ürünün/prosesin ekonomik faaliyetlerinden kaynaklanan hesaplanamayan maliyetler ve faydalardır.

Karakterizasyon sonuçlarının ağırlıklandırılmasında Ecovalue08 yöntemi, kullanılmış olup, CML hesaplama yöntemi tarafından elde edilen etki kategorileri değerlendirmiştir (Ahlroth ve Finnveden, 2011). Ecovalue08, özellikle İsveç koşullarına odaklanan, ödeme istekliliğine (WTP, Willingness To Pay) dayanan küresel ölçekte bir ağırlıklandırma yöntemidir. Ecovalue08 önerilen para kazanılan son nokta etkisine yönelik orta noktaları bir araya getiren ağırlıklandırma faktörlerinin tümü, kaynakların tükenmesi ve çevresel kalite için belirlenen ödeme istekliliği (WTP) tahminlerine dayanmaktadır. Referans ve ağırlıklandırma faktörü (WF, Weighting Factor) birçok Avrupa değerlendirme çalışmasından elde edilmiştir (Huysegoms vd., 2018). Avrupa Birliği (AB) için verilen parasal WF'lerin Türkiye'ye aktarılması için, Ecovalue08'de toplanan ekonomik bilgiler kullanılarak çevresel malların ekonomik değerlerinin başka bir yerde ve zamanda tahmin edilmesine dayanan fayda transfer metodolojisi kullanılmıştır (Silalertruksa vd., 2012; Woon ve Loo, 2016). Bu tür hipotez ayarlamalarının yapılmasında, WTP'nin veya zararları önlemek için ödeme yapabilme becerisinin kişi başına düşen gelirle orantılı olmasına önem verilmektedir.

Türkiye için parasallaştırılan ağırlık faktörleri (WF), AB için hazırlanan WF'lerin, Türkiye ile AB için kişi başına düşen gayri safi yurtiçi hasıla (GDP, Gross Domestic Product) ve kişi başına düşen satın alma gücü paritesindeki (PPP, Purchasing Power Parity) gayri safi yurtiçi hasıla GDP(PPP)<sub>yüzde</sub> değerlerinin oranlanmasıyla hesaplanmıştır (Woon ve Loo, 2016). Hesaplama denklemi aşağıda verilmiştir (Eşitlik 5.5).

$$WF_{Türkiye} = \frac{WF_{EU} \times GDP(PPP)_{yüzde TR}}{GDP(PPP)_{yüzde AB}} \quad (5.5)$$

Burada, WF ; ağırlık faktörüdür,  $GDP(PPP)_{yüzde TR}$  ; Türkiye’de kişi başına düşen satın alma gücü paritesindeki gayri safi yurtiçi hasıla,  $GDP(PPP)_{yüzde AB}$  ; AB’de kişi başına düşen satın alma gücü paritesindeki gayri safi yurtiçi hasıladır.

Etki kategorilerinin ağırlıklandırma faktörleri Çizelge 5.3’te verilmiştir.

**Çizelge 5.3.** Etki kategorilerinin ağırlıklandırma faktörleri

| Etki Kategorileri (birim) <sup>1</sup> | Ağırlık Faktörü     |                      | Ağırlık faktörü      |
|----------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
|                                        | Euro2008            | Euro2018             |                      |
|                                        | Avrupa <sup>2</sup> | Türkiye <sup>3</sup> | Türkiye <sup>4</sup> |
| ADP <sub>ff</sub> (MJ)                 | 0,0004              | 0,000256             | 0,00576              |
| GWP (kg CO <sub>2</sub> ed.)           | 0,01-0,2            | 0,00064 – 0,0128     | 0,29                 |
| HTP (kg 1,4-DB ed.)                    | 0,0004-1,2          | 0,000026 – 0,0768    | 1,73                 |
| AP (kg SO <sub>2</sub> ed.)            | 3                   | 0,192                | 4,32                 |

<sup>1</sup> ADPe için uygun ağırlıklandırma faktörü yoktur.  
<sup>2</sup> Bazı faktörlerin min ve maksimum değerleri vardır (Ahlroth ve Finnveden, (2011); Huysegoms vd., (2018)).  
<sup>3</sup> Türkiye için WF’ler, Avrupa Birliği’ne ilişkin dış çevre değerleri, kişi başına satın alma gücü paritesindeki (PPP) gayri safi yurtiçi hasıla (GDP) kullanılarak düzeltilerek hesaplanmaktadır.  
<sup>4</sup> 2008 ve 2018 arasındaki tüketici fiyat endeksi değerleri arasındaki oranı kullanarak hesaplanmıştır (TÜİK, 2018)

Bu tez çalışmasında, CNT üretiminin LCA sonuçları parasallaştırma (monetization) yöntemi kullanılarak yorumlanmıştır. Ayrıca, referans çalışmalardan yararlanılarak Ecovalue08 yöntemi incelenmiş ve bazı etki kategorileri (abiyotik kaynakların (fosil yakıt bazlı) tükenme potansiyeli (ADP<sub>ff</sub>), küresel ısınma potansiyeli (GWP), insanların üzerine olan toksik etki potansiyeli (HTP) ve asidifikasyon potansiyeli (AP) hesaplanmıştır. Sonuçlar, Bölüm 6’da verilmiştir.

### 5.2.1. Hedef ve kapsam tanımı

Bu bölümde, CNT üretiminin yaşam döngüsü yaklaşımıyla ekonomik açıdan değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Proseste yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve kirletici maliyetler incelenmiş olup maliyet bileşenleri her bir bileşen için detaylı olarak belirlenmiştir.

### 5.2.2. Maliyet bileşenlerinin belirlenmesi

CNT üretiminin maliyet bileşenleri, içsel maliyetler ve dışsal maliyetler olmak üzere iki bölümde incelenmiştir.

İçsel maliyetler yatırım maliyeti (kullanılacak ekipman maliyeti) ve işletme maliyeti (kimyasal madde maliyeti, enerji kullanım maliyeti, işçilik maliyeti ve bakım-onarım maliyeti) maliyetleridir. Dışsal maliyetler, yaşam döngüsü analizi sonucu incelenen etki kategori abiyotik kaynakların tükenmesi (fosil yakıt bazlı), asidifikasyon, küresel ısınma ve insanların üzerine olan ekotoksikite potansiyeli olarak belirlenmiştir. Yaşam döngüsü maliyet bileşenlerinin sınıflandırılması Çizelge 5.4’te verilmiştir.

**Çizelge 5.4.** Yaşam döngüsü maliyet bileşenlerinin sınıflandırılması

| Maliyet Başlıkları | Maliyet Bileşenleri  | Alt Bileşen Maliyetleri                                                                                                              |
|--------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| İçsel Maliyetler   | Yatırım Maliyetleri  | Kullanılan Ekipman Maliyeti                                                                                                          |
|                    | İşletme Maliyetleri  | Kimyasal Madde Maliyeti, Enerji Kullanım Maliyeti, Bakım Onarım Maliyeti                                                             |
| Dışsal Maliyetler  | Kirletici Maliyetler | Abiyotik Kaynakların Tükenmesi (fosil yakıt bazlı), Asidifikasyon, Küresel Isınma ve İnsanların üzerine olan toksik etki potansiyeli |

### 5.2.3. Maliyet verilerine ait envanterin oluşturulması

Bu bölümde, “CNT sentezinin” bileşenlerinin oluşturulmasında, kullanılan malzeme, enerji, ekipman vb. gibi içsel maliyetlere ait alt bileşen maliyetleri ile ilgili yaşam döngüsü maliyet envanteri mevcut laboratuvar faturalarından edinilen bilgilerle oluşturulmuştur.

## 6. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, CNT üretimi etki değerlendirmesi sonuçlarına göre elementel bazda elementel bazda abiyotik kaynakların tükenmesi ( $ADP_e$ , kg Sb ed.), fosil yakıt bazlı abiyotik kaynakların tükenmesi ( $ADP_{ff}$ , MJ), küresel ısınma potansiyeli (GWP, kg  $CO_2$  eşdeğeri ed.), asidifikasyon potansiyeli (AP, kg  $SO_2$  ed.), ötrofikasyon potansiyeli (EP, kg  $PO_4^{-3}$  ed.), insanlara olan toksik etki (HTP), fotokimyasal oksidasyon potansiyeli (POP, kg  $C_2H_4$  ed.) ve ozon tabakasının tükenmesi potansiyeli (ODP, kg CFC-11 ed.) etki kategorileri açısından aşağıda detaylıca incelenmiş ve yorumlanmıştır. Ek olarak parasallaştırma analiz sonuçları hesaplanmış ve detaylı bir şekilde yorumlanmıştır.

### 6.1. CNT Sentezinin LCA Sonuçları ve Değerlendirilmesi

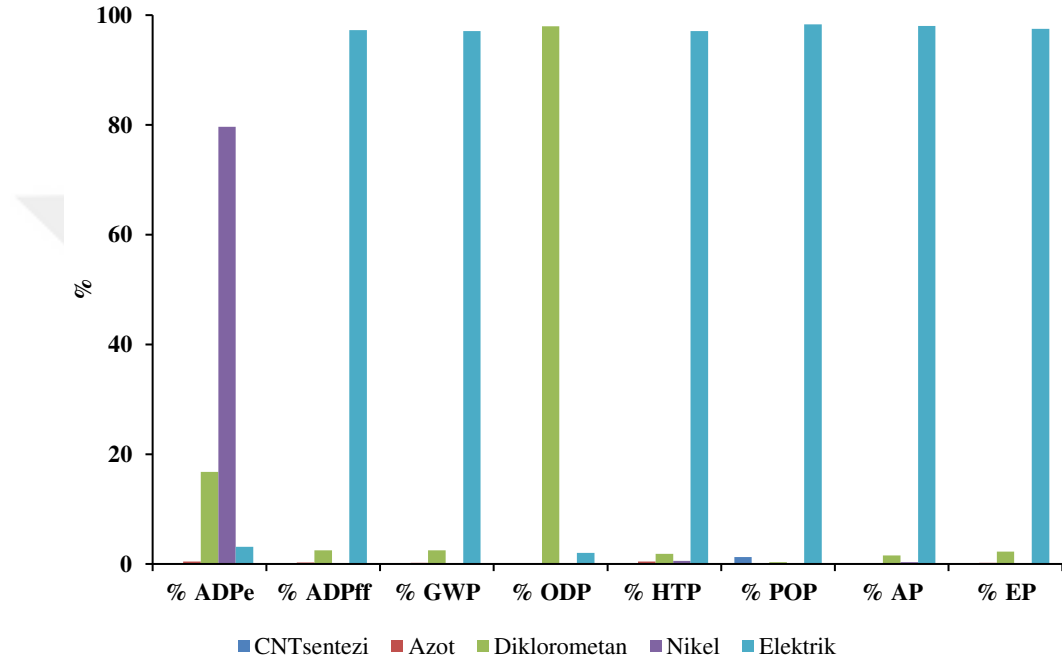
CNT üretimi ile ilgili oluşturulan yaşam döngüsü envanteri (Çizelge 5.2), CML-IA (v.3.03/EU25+3,2000) etki değerlendirme yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Atık C/LDPE'nin pirolizi sonrası elde edilen gaz ürün eldesinden kimyasal buhar çöktürme yöntemi ile sentezlenen karbon nanotüpün yaşam döngüsü etki değerlendirmesinin karakterizasyon ve normalizasyon sonuçları Çizelge 6.1'de verilmiştir.

**Çizelge 6.1.** 0,553 g CNT üretiminin karakterizasyon ve normalizasyon sonuçları

| Etki Kategorisi              | Birimi             | Karakterizasyon | Normalizasyon | Etki %'si |
|------------------------------|--------------------|-----------------|---------------|-----------|
| <b><math>ADP_e</math></b>    | kg Sb ed*.         | 3,86E-08        | 6,41E-15      | 0,07      |
| <b><math>ADP_{ff}</math></b> | MJ                 | 3,91E+01        | 1,12E-12      | 11,35     |
| <b>GWP</b>                   | kg $CO_2$ ed.      | 4,27E+00        | 8,20E-13      | 8,34      |
| <b>ODP</b>                   | kg CFC-11 ed       | 2,16E-06        | 2,12E-13      | 2,16      |
| <b>HTP</b>                   | kg 1,4-DB ed.      | 1,84E-01        | 3,67E-13      | 3,74      |
| <b>POP</b>                   | kg $C_2H_4$ ed.    | 7,58E-03        | 4,38E-12      | 44,57     |
| <b>AP</b>                    | kg $SO_2$ ed.      | 4,70E-02        | 2,79E-12      | 28,39     |
| <b>EP</b>                    | kg $PO_4^{-3}$ ed. | 2,55E-03        | 1,38E-13      | 1,40      |
| <i>*ed:eş değeri</i>         |                    |                 |               |           |

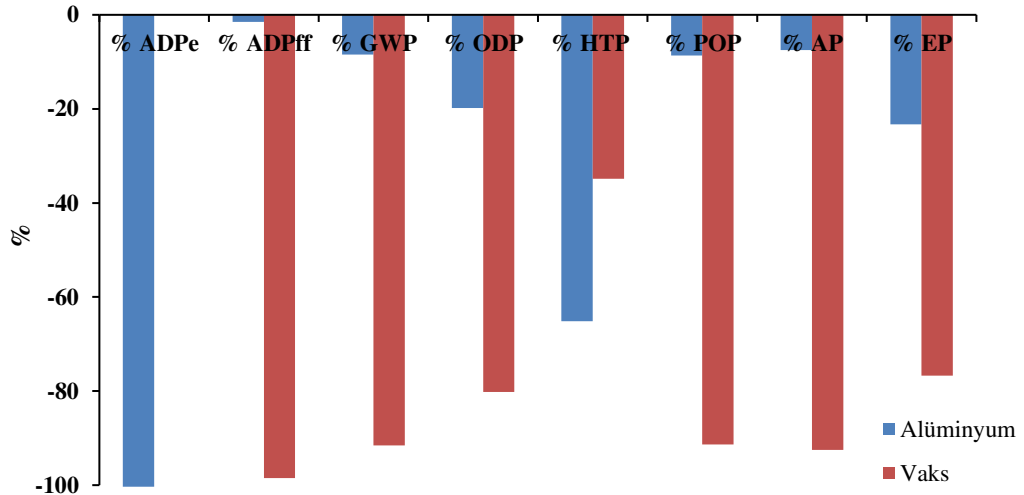
Normalizasyon sonuçlarına göre atık C/LDPE'den CNT üretiminden tesisinden kaynaklı çevresel etkilerin önemli bir kısmının  $ADP_{ff}$ , GWP, POP ve AP'den kaynaklandığı görülmektedir. Karakterizasyon sonuçlarının etki kategorileri bazında

dağılımları ise Şekil 6.1’de sunulmuştur. Bu şekil incelendiğinde, çevresel etkinin diğer proses bileşenlerine (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi) göre neredeyse tüm etki kategorilerinde elektrik tüketiminden kaynaklandığı görülmektedir. ADP<sub>e</sub> etkisine, nikel üretimi %79,63, DCM üretimi %16,77 ve %3,14 payında elektrik üretimi katkı sağlamaktadır. DCM üretiminin ise diğer proses bileşenlerine kıyasla ODP etki kategorisine %97,96 oranında çok büyük katkı sağlamaktadır.



**Şekil 6.1.** 0,553 g CNT sentezinin karakterizasyon sonuçları (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik)

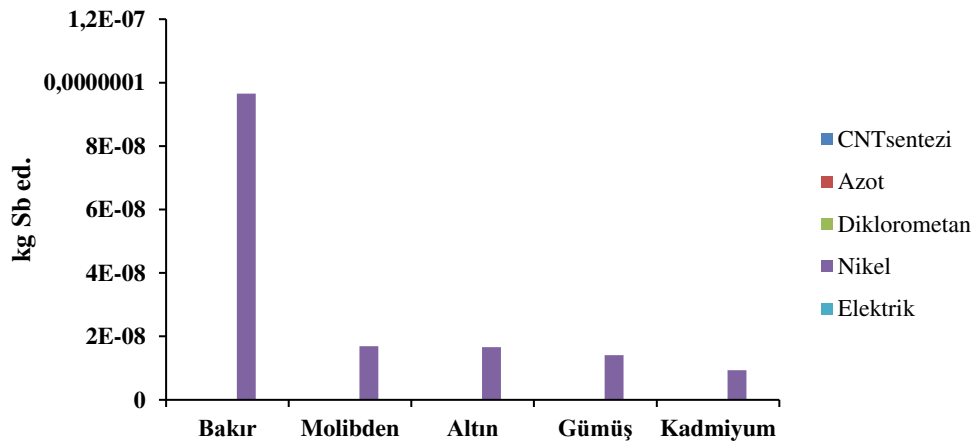
CNT üretiminin ön aşaması olan piroliz işlemi sonucunda Al ve vaksın geri kazanılmasıyla önlenen çevresel etkiler Şekil 6.2’de verilmiştir. Bu şekle göre vaks geri kazanımının Al geri kazanımına göre neredeyse tüm etki kategorilerinde daha fazla çevresel fayda sağladığı görülmektedir. Vaks geri kazanımının özellikle ADP<sub>e</sub> etkisinin azaltılmasında etkili olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.2. 0,553 g CNT sentezinin karakterizasyon sonuçları (Vaks ve alüminyum kazanımı)

Çevresel etkilere neden olan kaynak tüketimi/kirletici parametreler etki kategorileri bazında detaylı olarak incelenmiştir.

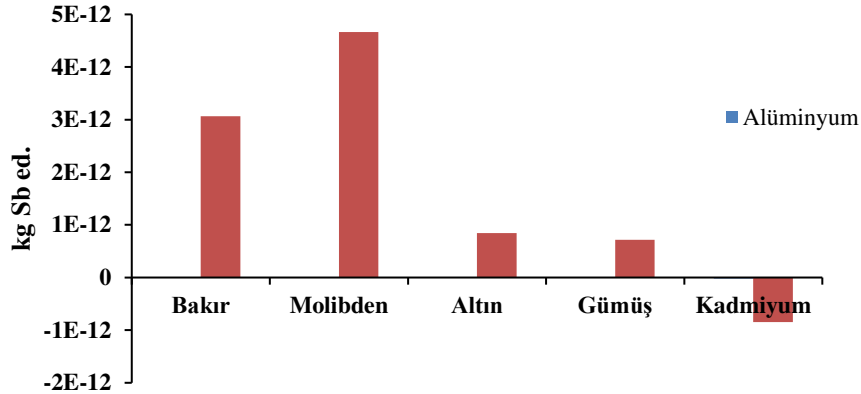
**ADPe:** Atık C/LDPE pirolizinin ADPe etkisine neden olan parametreler Şekil 6.3’de verilmiştir. Şekle göre ADPe etki kategorisine en çok bakır, molibden, altın, gümüş ve kadmiyum elementleri neden olmaktadır. Arka plana bakıldığında bu elementlerin, nikel üretimi aşamasında kullanılan amonyum nitrat üretimi esnasında ortaya çıktığı görülmüştür.



Şekil 6.3. 0,553 g CNT sentezinin ADPe etkisi (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik)

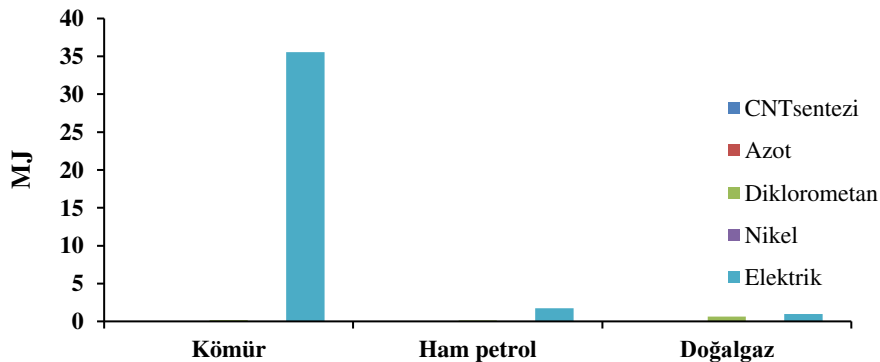
Atık C/LDPE ambalajının piroliz gazından üretilecek karbon nanotüp sentezi sonucunda, piroliz işleminin katı ve sıvı ürünlerinden Al ve vaks geri kazanımı olacaktır.

Al ve vaksın geri kazanılmasıyla önlenen  $ADP_e$  etkisi, bu etkiye neden olan bileşenler bazında Şekil 6.4’de verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi Al geri kazanımı sayesinde kadmiyum elementinin kullanılmaması  $ADP_e$  etkisinin önlenmesinde yardımcı olacaktır.

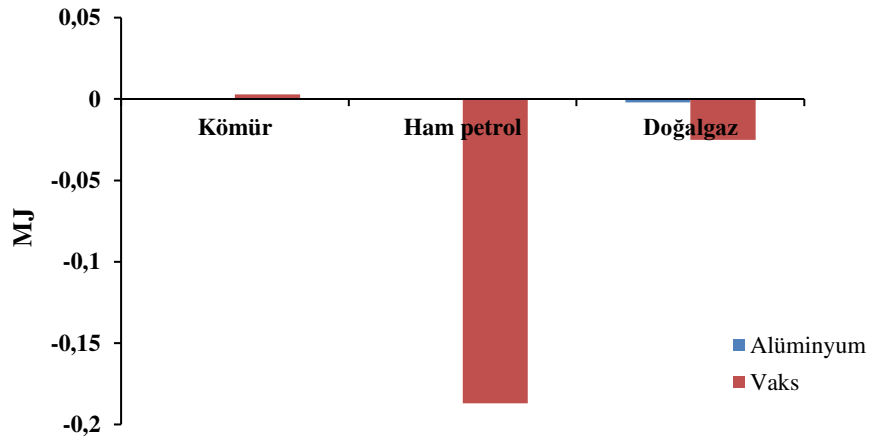


Şekil 6.4. 0,553 g CNT sentezinin  $ADP_e$  etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı)

**ADP<sub>ff</sub>:**  $ADP_{ff}$  etki kategorisi incelendiğinde fosil yakıtlar içinde kömür tüketimi etkisinin daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 6.5). Diğer proses bileşenlerinin aksine kömür tüketimine elektrik üretiminin etkisi %97,8’dir. Bu etki, elektrik üretimi esnasında kömür yakılmasından kaynaklanmaktadır. Al ve vaksın geri kazanılmasıyla önlenen  $ADP_{ff}$  etkisi, büyük oranda vaks geri kazanımıyla sağlanabilecektir (Şekil 6.6). Bu kapsamda özellikle ham petrol kullanımında diğer fosil yakıtla kıyasla ciddi bir azalma görülecektir.

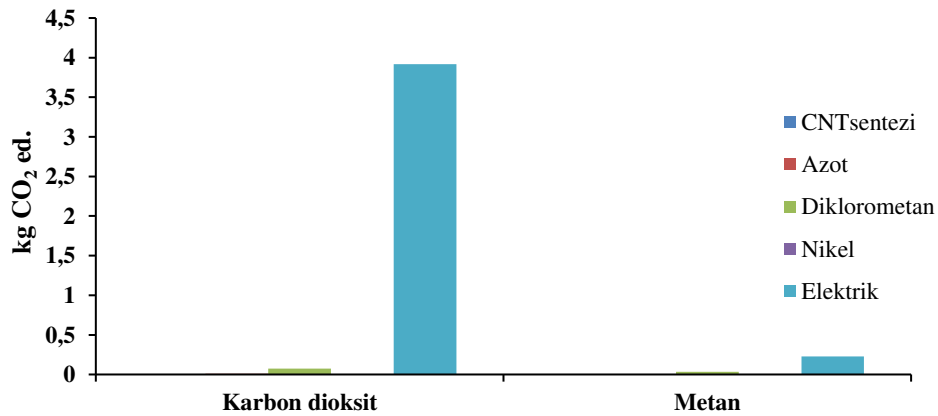


Şekil 6.5. 0,553 g CNT sentezinin  $ADP_{ff}$  etkisi (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik)



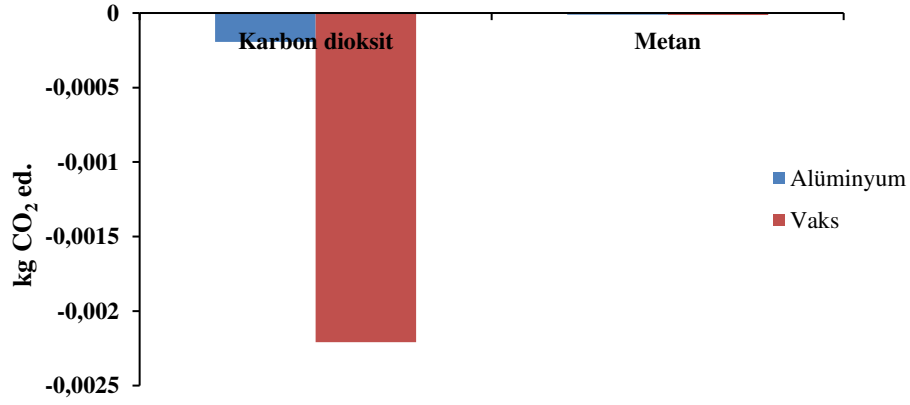
Şekil 6.6. 0,553 g CNT sentezinin ADP<sub>ff</sub> etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı)

**GWP:** CNT sentezinde GWP etkisine neden olan başlıca kirletici bileşenler CO<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> olup etkileri sırasıyla %93,5 ve %5,8 oranındadır (Şekil 6.7). Prosesler bazında bakıldığında GWP etkisine en çok %97,1 oranında elektrik üretimi katkı sağlarken, DCM üretiminden de gelen %2,51'lik bir pay vardır. CO<sub>2</sub> emisyonlarının GWP üzerindeki bu önemli etkisi, elektrik üretiminde kömür yakılmasından kaynaklanmaktadır.



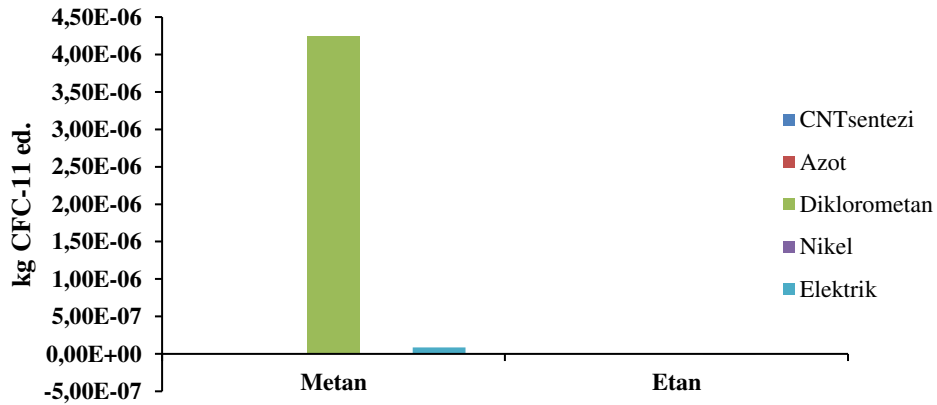
Şekil 6.7. 0,553 g CNT sentezinin GWP etkisi (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik)

GWP etkisinin önlenmesinde vaks geri kazanımının Al geri kazanımına göre daha büyük bir katkısı olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.8). Bu katkı özellikle de CO<sub>2</sub> emisyonlarının açığa çıkmasının engellenmesiyle sağlanabilecektir.



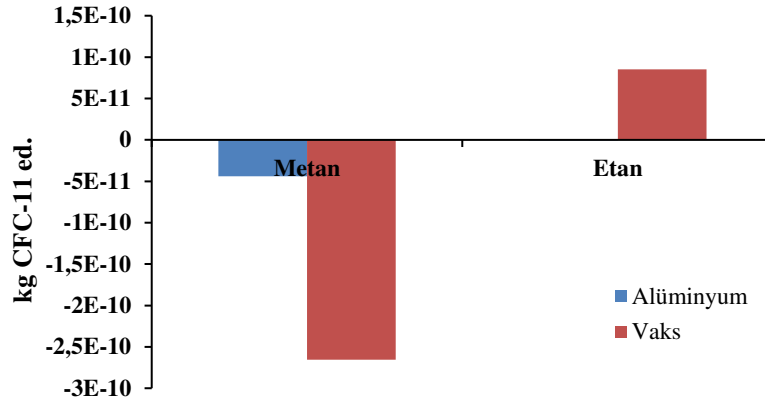
Şekil 6.8. 0,553 g CNT sentezinin GWP etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı)

**ODP:** CNT sentezinde ODP etkisine neden olan başlıca kirletici bileşenler metan ve etan olup etkileri sırasıyla %99,98 ve %0,02 oranındadır (Şekil 6.9). Prosesler bazında bakıldığında ozon tabasının incelmeye potansiyeli etkisine en çok %98 oranında diklorometan üretimi katkı sağlamaktadır. Metan emisyonlarının ODP üzerindeki bu önemli etkisi, DCM üretimi kaynaklı metan-bromoklorodiflorodur.



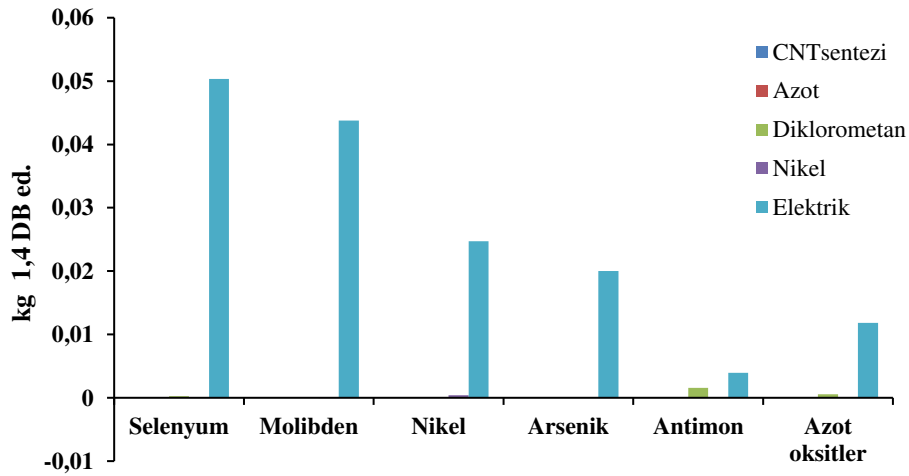
Şekil 6.9. 0,553 g CNT sentezinin ODP etkisi (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik)

ODP etkisinin önlenmesinde vaks geri kazanımı etan emisyonları üzerinde negatif bir etkiye sahip olsa da metan emisyonları üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir (Şekil 6.10). Metan emisyonlarının açığa çıkmasının engellenmesinde Al geri kazanımının da etkin olacağı görülmüştür.



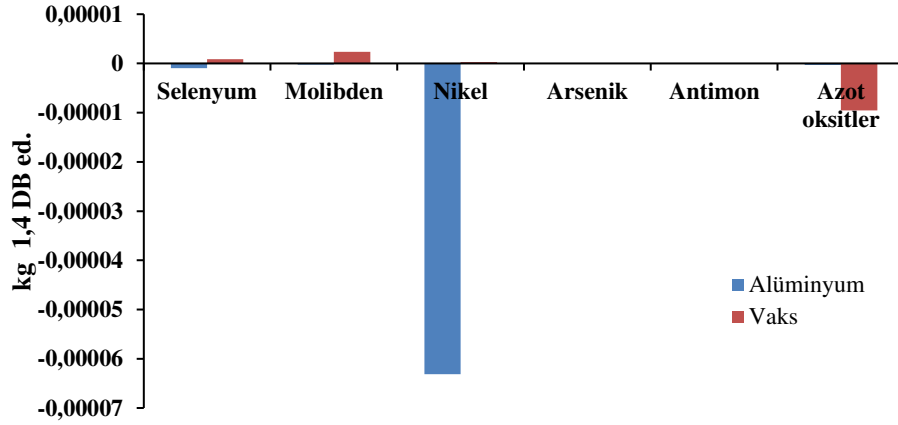
Şekil 6.10. 0,553 g CNT sentezinin ODP etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı)

**HTP:** İnsanlara olan toksik etkiye başlıca sebep olan kirletici bileşenler başlıca elektrik üretimi sırasında açığa çıkan Se, Mo, Ni, As, Sb ve NO<sub>x</sub> emisyonlarıdır (Şekil 6.11). Elektrik üretimi %97,2 pay ile diğerleri arasında insanlar üzerindeki toksik etkiye sebep olan prosestir. Bu emisyonlar, elektrik üretiminde kullanılan kömür madenlerinden ve kömürlü santrallerde oluşan külün bertarafından kaynaklanmaktadır.



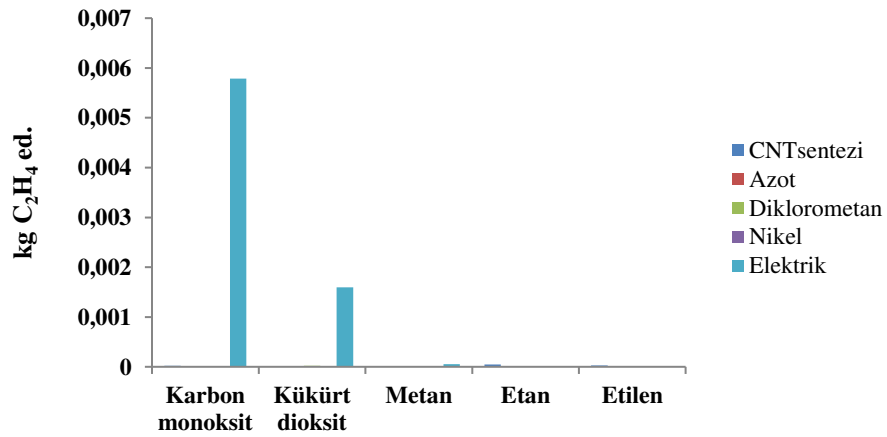
Şekil 6.11. 0,553 g CNT sentezinin HTP etkisi (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik)

HTP etkisinin önlenmesinde Al geri kazanımının özellikle nikel geri kazanımına fayda sağlayacağı görülmüştür (Şekil 6.12). Vaks geri kazanımının ise diğerlerine göre azot oksit emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olacağı gözlenmiştir.



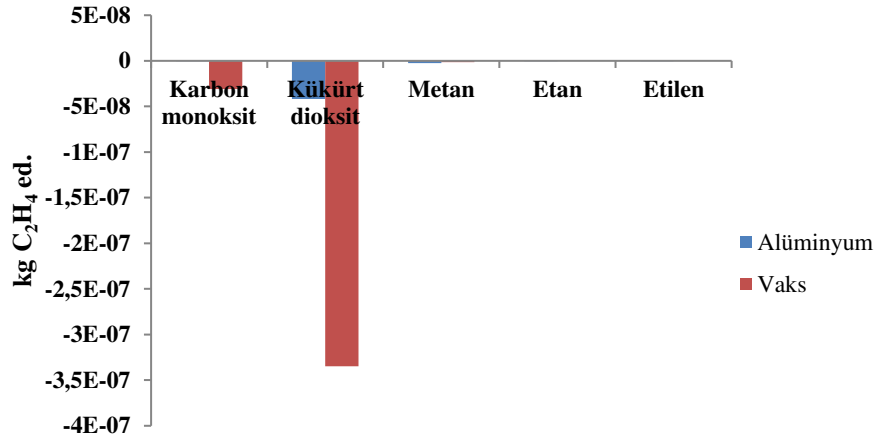
Şekil 6.12. 0,553 g CNT sentezinin HTP etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı)

**POP:** CNT sentezinde POP etkisine neden olan başlıca kirletici bileşenler karbon monoksit ve sülfür dioksittir olup etkileri sırasıyla %76,3 ve %21,1 oranındadır (Şekil 6.13). Proses bazında bakıldığında ise yine en çok etki %98,3 ile elektrik üretimi kaynaklı olurken CNT üretim aşaması da %1,28 katkıya sahiptir. ODP eki kategorisine, karbon monoksit elektrik üretiminden ve kükürt dioksit azot üretiminden kaynaklı etki etmektedir.



Şekil 6.13. 0,553 g CNT sentezinin POP etkisi (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik)

POP etkisinin önlenmesinde vaks geri kazanımını Al geri kazanımına göre daha büyük bir katkısı olduğu görülmüştür (Şekil 6.14). Bu katkı özellikle kükürt dioksit emisyonlarının açığa çıkmasının engellenmesiyle sağlanacağı düşünülmektedir.



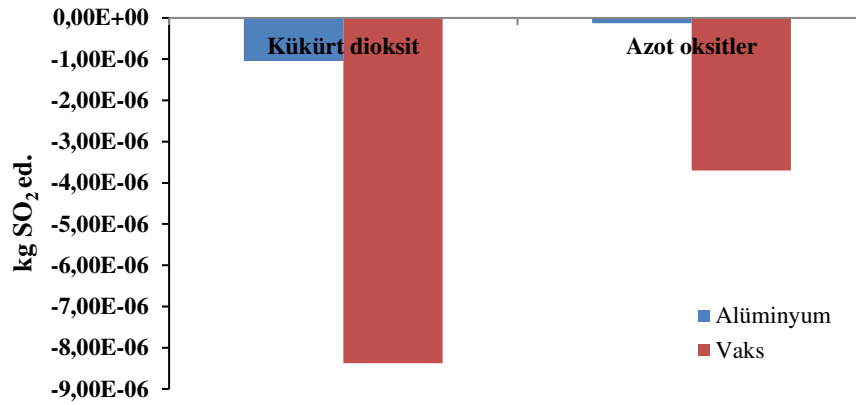
Şekil 6.14. 0,553 g CNT sentezinin POP etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı)

**AP:** Kullanılan elektriğin üretimi sırasında açığa çıkan SO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonları, CNT sentezinin asidifikasyon potansiyeline neden olan başlıca kirletici bileşenleridir (sırasıyla %86,48 ve %13,41) (Şekil 6.15). Bu emisyonlar elektrik üretiminde kullanılan kömür ve doğal gazın yakılmasından kaynaklanmaktadır.



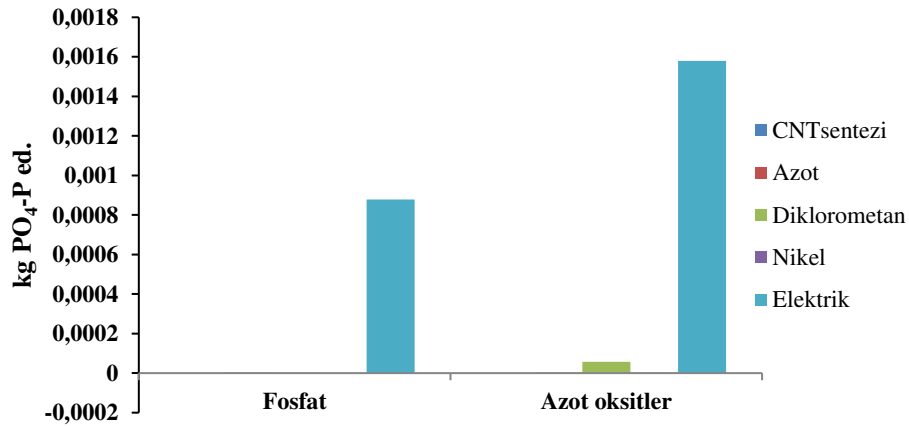
Şekil 6.15. 0,553 g CNT sentezinin AP etkisi (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik)

Şekil 6.16'ya göre Al ve vaksın geri kazanılmasıyla önlenen asidifikasyon etkisinde vaks geri kazanımının önemli bir etkisi olacaktır. Vaks geri kazanımıyla, elektrik üretimi sırasında açığa çıkarak AP'ye neden olan SO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının salınımı engellenmiş olacaktır.



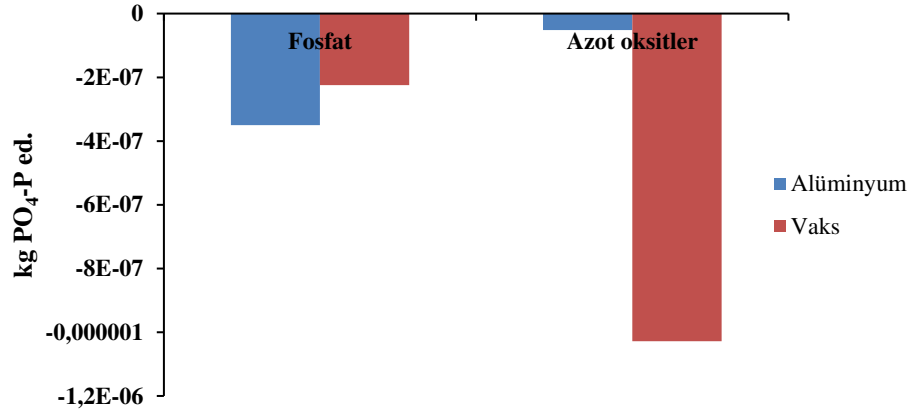
Şekil 6.16. 0,553 g CNT sentezinin AP etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı)

**EP:** CNT üretiminin ötrofikasyon etkisine başlıca nedeni, elektrik üretimi için fosil yakıtların yanması sonucu havaya karışan NO<sub>x</sub> ve patlatmayla linyit çıkarılması sırasında açığa çıkan azot ve fosfat emisyonlarıdır (Şekil 6.17). Elektrik üretiminden (%97,6) sonra diklorometan üretimi (%2,28) ötrofikasyona sebep olmaktadır.



Şekil 6.17. 0,553 g CNT sentezinin EP etkisi (CNT sentezi, azot üretimi, diklorometan üretimi, nikel üretimi, elektrik)

Şekil 6.18'e göre Al ve vaksın geri kazanılmasıyla önlenen ötrofikasyon etkisinde azot oksitler üzerinde vaks geri kazanımının ve fosfat üzerinde Al geri kazanımının önemli bir etkisi olacaktır.



Şekil 6.18. 0,553 g CNT sentezinin EP etkisi (Vaks ve alüminyum kazanımı)

## 6.2. CNT Sentezinin Parasallaştırma Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Atıksu geri kazanımı için yapılan maliyet envanter analizinde içsel maliyetler; yatırım maliyeti (kullanılacak ekipman maliyeti) ve işletme maliyetleri (kimyasal madde maliyeti, enerji kullanım maliyeti, işçilik maliyeti ve bakım-onarım maliyetleri), dışsal maliyetler; çevresel (abiyotik kaynakların tükenmesi (fosil yakıt bazında), asidifikasyon, küresel ısınma ve insanlar üzerine olan toksik etki potansiyeli) etki kategorilerinin maliyetleri olarak hesaplanmıştır. LCA sonuçları, Çizelge 5.3'te hesaplanan Türkiye için parasallaştırılan ağırlık faktörleri kullanılarak yorumlanmış ve Çizelge 6.2'de verilmiştir. CNT üretimi için hesaplanmış içsel ve dışsal maliyetlerin yüzdesel (%) dağılımları Çizelge 6.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. LCA sonuçlarına göre belirlenen parasallaştırma değerleri

| Etki Kategorisi   | Birimi                 | LCA sonuçları | Ağırlık Faktörü (Euro 2018) | Parasallaştırılan LCA sonuçları (Euro) |
|-------------------|------------------------|---------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| ADP <sub>ff</sub> | MJ                     | 3,91E+01      | 0,00576                     | 0,225                                  |
| GWP               | kg CO <sub>2</sub> ed. | 4,27E+00      | 0,29                        | 1,238                                  |
| HTP               | kg 1,4-DB ed.          | 1,84E-01      | 1,73                        | 0,318                                  |
| AP                | kg SO <sub>2</sub> ed. | 4,70E-02      | 4,32                        | 0,203                                  |

**Çizelge 6.3. İçsel ve dışsal maliyet sonuçlarının dağılımı (%)**

| <b>Maliyet Türü</b> | <b>Maliyet Başlıkları</b> | <b>Maliyet Bileşenleri</b>  | <b>Toplam maliyet (0,553 g CNT üretimi)</b> | <b>İçsel ve dışsal maliyet sonuçlarının dağılımı (%)</b> |
|---------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| İçsel               | Yatırım maliyetleri       | Kullanılan Ekipman Maliyeti | 0,764 euro/deney seti                       | 8,67                                                     |
| İçsel               | İşletme maliyetleri       | Kimyasal Madde Maliyeti,    | 0,637 euro/deney seti                       | 7,23                                                     |
|                     |                           | Enerji Kullanım Maliyeti,   | 0,307 euro/deney seti                       | 3,49                                                     |
|                     |                           | Bakım Onarım Maliyeti       | 0,076 euro/deney seti                       | 0,86                                                     |
|                     |                           | İşçilik Maliyeti            | 5,04 euro/deney seti                        | 57,22                                                    |
| Dışsal              | Çevresel maliyetler       | Kirletici Maliyetler        | 1,984 euro/deney seti                       | 22,53                                                    |

Dışsal maliyet için parasallaştırılan LCA etki kategorilerinin 0,553 g CNT sentezi için 1,984 eurodur. Bu da toplam maliyetin %22,53'ünü oluşturmaktadır. Çevresel etkilerin parasallaştırılması tartışmalı bir konudur. Bunun nedeni, çevresel etkilerin parasallaştırma yöntemlerinin değerlendirilmesinin zorluğu ve dahil edilmesi gereken verilerin doğru belirlenememesidir. Fakat, birçok parasallaştırma yöntemi bulunmakta olup, bu yöntemler kendi içerisinde karşılaştırılabilmektedir.

Bu çalışmada, bireysel ödeme istekliliğine dayanan parasal tahminleri kullanarak bir ağırlık seti hazırlanmış ve LCA karakterizasyon sonuçlarına göre yorumlanmıştır. Parasallaştırılan LCA sonuçlarına göre, etki kategorileri içinde en fazla etkiye %62,40 oranında küresel ısınma sahiptir. Bu etkiye sonrasında insanlar üzerine olan toksik etki, fosil bazlı abiyotik kaynak tükenmesi ve asidifikasyonun neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar göstermektedir ki, parasallaştırma LCA ile birlikte düşünülmeli ve değerlendirilmelidir.

## 7. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Kompozit ambalaj atıkları, bileşimleri nedeniyle yeniden ekonomiye kazandırılması ve depolama sahalarına gönderilmemesi gereken atıklardır. Kompozit ambalaj grubunda bulunan C/LDPE atıklarının geri dönüşümleri bileşimleri nedeniyle oldukça güç olduğundan ülkemizde miktarı günden güne artan bu değerli atıkların ileri dönüşümü çevresel açıdan büyük bir önem taşımaktadır. Bu çalışmanın ön aşaması, C/LDPE atıklarının geri dönüşümüyle ilgili hiç uygulanmamış bir yöntem olan piroliz prosesinden çıkan gazın kimyasal buhar çöktürme yönteminin uygulanacağı reaktöre beslenmesiyle büyütülen çok duvarlı karbon nanotüp eldesine dayanmaktadır. Bu değerli atık türünün değerlendirilmesi ve de karbon nanotüp gibi nanoteknolojik bir ürünün elde edilecek olmasının yanı sıra bu çalışmada çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik ilkelerinin sağlanması açısından olası çevresel etkiler ve maliyetler belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, ülkemizde bugüne değin hiç yapılmamış bir çalışma olarak, atık C/LDPE ambalajlarının pirolizi sonrası elde edilen gaz ürün eldesinden CVD yöntemi ile sentezlenen CNT'ler bütünsel bir bakış açısıyla incelenmiş ve yine aynı bakış açısıyla ekonomik bir değerlendirme yapılmıştır. Bunun için son yıllarda çevre mühendisliği disiplininde metodolojik ve kavramsal olarak yenilikçi ve farklı bir bakış açısı getiren LCA yöntemi ile parasallaştırma yöntemi uygulanmıştır.

CNT sentezinde ön basamak olan piroliz işlemi ve karbon nanotüplerin sentezlendiği kimyasal buhar çöktürme yöntemi enerjisi yoğun bir işlemdir. LCA sonuçlarında, elektrik kullanımının tüm çevresel etki kategorileri arasında daha fazla etkiye sahip olduğu görülmektedir. Yapılan LCA çalışması literatür çalışması ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 7.1). Trompeta ve ark. (2016) yapmış oldukları çalışmada laboratuvar ölçeğinde kimyasal buhar çöktürme yöntemi ile ürettikleri karbon nanotüplerin çevresel etkilerini incelemiştir. Karbon kaynağı olarak asetilen kullanılan çalışmada taşıyıcı gaz olarak azot ve katalizör olarak demir klorür kullanılmıştır. 3,2 kWh enerji tüketilen çalışmada bir deney setinde 7,5 g CNT elde edilmiştir. Türkiye'nin elektrik profili kullanılarak iki çalışma lisanslı SimaPro 8.5.0.0 PhD yazılımına entegre CML-IA (v.3.03/EU25+3,2000) yöntemi ile karşılaştırılmıştır. İki çalışmada için de ADP<sub>ff</sub> ve GWP etki kategorileri diğer etki kategorileri arasında en yüksek değere sahiptir. Bu etki kategorilerinin başlıca sebebi elektrik tüketimidir. Yapılan çalışmada, CNT üretimi için ön işlem olan piroliz prosesi, piroliz prosesinde Al geri kazanımı için kül fırınının kullanılması ve vaks geri kazanımı için kullanılan evaporatör nihai olarak CVD

fırınının kullandığı elektrik miktarına ek yük getirmektedir. Diğer çalışma ile karşılaştırıldığında, elektrik tüketiminin daha fazla olması yapılan bu çalışmanın çevresel sonuçlarını negatif yönde etkilemiştir.

**Çizelge 7.1. Konuyla ilgili literatür karşılaştırılması**

| <b>CNT üretimi</b>       |                                      |                                  |                             |
|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| <b>Etki Kategorileri</b> | <b>Birim</b>                         | <b>Cebeci Topbas vd., (2019)</b> | <b>Trompeta vd., (2016)</b> |
| <b>ADP<sub>e</sub></b>   | kg Sb ed.                            | 7,0E-05                          | 1,1E-05                     |
| <b>ADP<sub>fr</sub></b>  | MJ                                   | 7,1E+04                          | 4,0E+03                     |
| <b>GWP</b>               | kg CO <sub>2</sub> ed.               | 7,7E+03                          | 4,3E+02                     |
| <b>ODP</b>               | kg CFC-11 ed                         | 3,9E-03                          | 6,2E-06                     |
| <b>HTP</b>               | kg 1,4-DB ed.                        | 3,3E+02                          | 2,0E+01                     |
| <b>POP</b>               | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ed. | 1,4E+01                          | 7,3E-01                     |
| <b>AP</b>                | kg SO <sub>2</sub> ed.               | 8,5E+01                          | 4,6E+00                     |
| <b>EP</b>                | kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> ed. | 4,6E+00                          | 2,6E-01                     |

Çalışmanın, C/LDPE atıklarının ileri dönüşümü ile ülkedeki atık sorununa yenilikçi bir çözüm getirileceği ve karbon nanotüp gibi nanoteknolojik bir ürün oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca, vaks ve Al geri kazanımı ile doğal kaynak kullanımının da önüne geçilmektedir. LCA sonuçları tüm prosesler bazında incelendiğinde en yüksek etkinin elektrik tüketimi sonucu olduğu gözlenmiştir. Bu çevresel etkileri en aza indirmek için ülkemizde fosil yakıtların yerine yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin hızlanması gerekmektedir. Elektrik etkisinden sonra en fazla etki, kimyasal maddelerin tüketiminden gelmektedir. Kullanılan kimyasallar yerine daha çevre dostu kimyasalların tercih edilmesinin kaynaklanan çevresel yükü azaltacağı düşünülmektedir.

LCA sonuçları bazı etki kategorileri bazında literatür çalışmalarından yararlanılarak parasallaştırılmıştır. LCA sonuçlarının parasallaştırması konusunda sınırlı sayıda çalışma olduğundan bu çalışmanın gelecekte karar vericilere maliyet açısından yol göstereceği düşünülmektedir. CNT sentezi esnasındaki tüm prosesler için içsel ve dışsal maliyetler göz önünde bulundurulmuştur. Dışsal maliyet kapsamında bulunan çevresel maliyetlerin, toplam maliyetin %22,53'ünü oluşturduğu görülmüştür. Parasallaştırılan LCA sonuçlarına göre, etki kategorileri içinde en fazla etkiye %62,40 oranında küresel ısınma sahiptir. Bunun nedeni yine Türkiye'nin elektrik profilinden kaynaklanmaktadır.

Hem çevresel hem de maliyet açısından bu çalışma ele alındığında en fazla yükün elektrik tüketiminden kaynaklı olduğu görülmüştür. Türkiye'nin elektrik üretiminde fosil

yakıtların yerine çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarının (fotovoltaik, rüzgar enerjisi vb.) kullanılması ile bu çevresel etkileri azaltacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışması TÜBİTAK 117Y041 projesi kapsamında gerçekleştirilmiş olup, C/LDPE ambalaj atıklarından CNT üretimi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, C/LDPE atıkları ile elde edilen CNT üretimindeki çevresel etkiler ve dışsal maliyetler mutlaka göz önüne alınmalı ve sürdürülebilir üretim stratejisi için tezde belirlenen çevresel etkiler ile maliyetleri en aza indirecek önlemler alınmalıdır.



## KAYNAKÇA

- Ahlroth, S. ve Finnveden, G. (2011). *Ecovalue08–A new valuation set for environmental systems analysis tools*. Journal of Cleaner Production, 19(17-18), 1994-2003.
- Alston, S.M., Clark, A.D., Arnold, J.C., Stein, B.K., (2011). *Environmental Impact of Pyrolysis of Mixed WEEE Plastics Part 2: Life Cycle Assessment*. Environmental Science&Technology. 45: 9386–9392.
- Andrady, A.L. (2015). *Plastics and environmental sustainability*. Hoboken, New Jersey, The United States of America (USA): John Wiley & Sons, Incorporated.
- Banar, M., (2015). *Life Cycle Assessment of Waste Tire Pyrolysis*. Fresenius Environmental Bulletin, 24 (4): 1215-1226.
- Bernow, S., Biewald, B. ve Marron, D. (1991). *Environmental Externalities Measurement: Quantification, Valuation and Monetization*. External Environmental Costs of Electric Power. Almanya: Springer.
- Bhushan, B. (2017). *Springer handbook of nanotechnology*. Almanya: Springer.
- Curran, M.A. (2017). *Goal and scope definition in life cycle assessment*. Dordrecht, Hollanda: Springer.
- Çapa, S., (2019). *Bir Organize Sanayi Bölgesi Atıksu Geri Kazanım Tesisinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Yöntemiyle Çevresel Etkilerinin İncelenmesi*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çokaygil, Z. (2005). *Atık yönetimi planlamasında yaşam döngüsü analizi*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ferreira, F.V., Cividanes, L.D.S., Brito, F.S., Menezes, B.R.C., Franceschi, W., Simonetti, E.A.N. and Thim, G.P. (2016). *Functionalizing graphene and carbon nanotubes*. İsviçre: Springer.
- Griffiths, O.G., Byrne, J.P., Murciano, L.T., Jones, M. D., Mattia, D. And McManus, M.C. (2013). *Identifying the largest environmental life cycle impacts during carbon nanotube synthesis via chemical vapour deposition*. Journal of Cleaner Production, 42, 180-189.
- Günkaya, Z., Özdemir, A., Özkan, A. ve Banar, M. (2016). *Environmental performance of electricity generation based on resources: a life cycle assessment case study in Turkey*. Sustainability, 8(11): 1097.
- Haar D. (2017). *A literature review on recent developments in economic internalization techniques*. University of Amsterdam Faculty of Economics and Business Bachelor's Thesis and Thesis Seminar Economics.

- Hauschild, M.Z., Rosenbaum, R.K. and Olsen, S.I. (2018). *Life Cycle assessment theory and practice*. İsviçre: Springer.
- Healy, M.L., Dahlben, L.J. ve Isaacs J.A. (2008). *Environmental assessment of single-walled carbon nanotube processes*. Journal of Industrial Ecology. 12(3),376–393.
- Heijungs, R., Guinée, J.B., Huppes, G., Lankreijer, R.M., Udo de Haes, H.A. and Wegener Sleswijk (1992). *Environmental life cycle assessment of products. guide and backgrounds*. Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden.
- Huysegoms, L., Rousseau, S. ve Cappuyns, V. (2018). *Friends or foes? Monetized life cycle assessment and cost-benefit analysis of the site remediation of a former gas plant*. Science of the Total Environment, 619, 258-271.
- http1,[http://www.emo.org.tr/ekler/34427e6be0fae4a\\_ek.pdf?tipi=41&turu=X&sube=0](http://www.emo.org.tr/ekler/34427e6be0fae4a_ek.pdf?tipi=41&turu=X&sube=0) Erişim Tarihi: 11.05.2019
- http2, [http://www.externe.info/externe\\_d7](http://www.externe.info/externe_d7) Erişim Tarihi: 01.08.2019
- Jorio, A., Dresselhaus., G and Dresselhaus, M. S. (2008). *Carbon nanotubes: advanced topics in the synthesis, structure, properties and applications*. Berlin, Almanya: Springer.
- Küçükyıldırım, B.O. ve Eker, A.A. (2012). *Karbon nanotüpler, sentezleme yöntemleri ve kullanım alanları*. TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi. 53(630), 34-44.
- Leontief, W. (1970). *Environmental repercussions and economic structure. An input-output approach*. Rev. Econ. Stat. 52, 262–271.
- Li, W.Z., Xie, S.S., Qian, L.X., Chang, B.H., Zou B.S., Zhou, W.Y, Zhao. R.A. ve Wang, G. (1996). *Large scale synthesis of aligned carbon nanotubes*. Science. 274 (5293),1701–1703.
- Liu, J., Jiang, Z., Yu, H. ve Tang, T. (2011). *Catalytic pyrolysis of polypropylene to synthesize carbon nanotubes and hydrogen through a two-stage process*. Polymer Degradation and Stability. 96(10), 1711-1719.
- Loiseau, A., Launois, P., Petit, P., Roche. S. ve Salvétat, J.P. (2006). *Understanding Carbon Nanotubes*. Berlin, Almanya: Springer.
- Maynard, A. D., Baron, P. A., Foley, M., Shvedova, A. A., Kisin, E. R. ve Castranova, V. (2004). *Exposure to Carbon Nanotube Material: Aerosol Release During the Handling of Unrefined Single-Walled Carbon Nanotube Material*. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A: Current Issues, 67, 87:107.
- Morel, S., Traverso, M. ve Preiss, P. (2018). *Discussion Panel—Assessment of Externalities: Monetisation and Social LCA*. Designing Sustainable Technologies, Products and Policies. Springer. 391-395

- Nguyen, T. L. T., Laratte, B., Guillaume, B., ve Hua, A. (2016). *Quantifying environmental externalities with a view to internalizing them in the price of products, using different monetization models*. Resources, Conservation and Recycling, 109, 13-23.
- Özdemir, A. (2013). *Türkiye’de demiryolu ulaşımının yaşam döngüsü analizi ve yaşam döngüsü maliyeti yöntemleri ile değerlendirilmesi*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özkan, A., Yapıcı, E., Günkaya, Z. ve Banar, M. (2018). *Plastik atıklardan karbon nanotüp (CNT) üretimi üzerine bir değerlendirme*. Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B - Teorik Bilimler. 6 (1),98-107.
- Peng, H., Li, Q. ve Chen, T. (2017). *Industrial applications of carbon nanotubes*. Elsevier.
- Pizzol, M., Weidema, B., Brandao, M. ve Osset, P. (2015). Monetary valuation in life cycle assessment: a review. *Journal of Cleaner Production*, 86, 170-179.
- Plastics Europe, 2018. *Plastics-The Facts 2017. An analysis of European plastics production, demand and waste data*. Plastics Europe – Association of Plastics Manufacturers. Brüksel, Belçika.
- Purohit, R., Purohit, K., Rana, S., Rana, R.S. and Patel V. (2014). *Carbon nanotubes and their growth methods*. Procedia Materials Science. 6,716-728.
- Ren, Z., Lan, Y. and Wang, Y. (2013). *Aligned carbon nanotubes: physics, concepts, fabrication and devices*. Berlin, Almanya: Springer.
- Sardon, H. and Dove, A.P., (2018). *Plastics recycling with a difference; A novel plastic with useful properties can easily be recycled again and again*. Science, 360 (6387), 380-381.
- Silalertruksa, T., Bonnet, S. ve Gheewala, S.H. (2012). *Life cycle costing and externalities of palm oil biodiesel in Thailand*. Journal of Cleaner Production, 28, 225-232.
- Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY), (2004).
- Steen B. (2015). *The EPS 2015d impact assessment method – an overview*. Department of Energy and Environment Division of Environmental Systems Analysis Chalmers University of Technology. Swedish Life Cycle Center, Report number 2015:5
- Szabó, A., Perri, C., Csató, A., Giordano, G., Vuono, D. and Nagy J.B. (2010). *Synthesis methods of carbon nanotubes and related materials*. Materials, 3, 3092-3140.
- Tok, G., (2016). *Refrakter Tuğla Üretiminin Yaşam Döngüsü Analizi ve Yaşam Döngüsü Maliyeti Yöntemleriyle Değerlendirilmesi*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Trompeta, A.F., Vlachou, N., Perivoliotis, D.K., Koklioti, M.A., Markakis, V., Tsiliki, G., Sarimveis, H. and Charitidis, C.A. (2015). *Environmental assessment*

*of carbon nanotubes synthesis via chemical vapor deposition.* 10th Panhellenical Conference of Ministry of Mathematics, Patras, Yunanistan.

Trompeta, A.F., Koklioti, M.A., Markakis, Perivoliotis, D.K., Lynch, I., ve Charitidis, C.A. (2016). *Towards a holistic environmental impact assessment of carbon nanotube growth through chemical vapour deposition.* Journal of Cleaner Production 129, 384:394.

Weidema, B., Brandao, M. ve Pizzol, M., (2013). *The Use of Monetary Valuation of Environmental Impacts in Life Cycle Assessment: State of the art, strengths and weaknesses.* Score LCA, 2012-03–Summary.2.0-LCA Consultants/Aalborg Üniversitesi.

Woon, K. S. ve Lo, I. M. (2016). *An integrated life cycle costing and human health impact analysis of municipal solid waste management options in Hong Kong using modified eco-efficiency indicator.* Resources, Conservation and Recycling, 107, 104-114.

Zare, Y. (2012). *Recent progress on preparation and properties of nanocomposites from recycled polymers: A review.* Waste Management. 33, 598–604.

Zhuo, C. ve Levendis, Y.A. (2014). *Upcycling waste plastics into carbon nanomaterials: a review.* Journal of Applied Polymer Science. 131 (39931).

## EKLER

### Tez Hazırlama Kontrol Listesi

Evet Hayır

|                                                                                                                                                                                                      |                          |                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Tez, “Tez Yazım Kılavuzu”na uygun olarak yazıldı.                                                                                                                                                    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Dış kapak ve iç kapak sayfası eklerde belirtilen şekilde düzenlendi.                                                                                                                                 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ön sayfalar i, ii, iii şeklinde Romen rakamları ile numaralandırıldı.                                                                                                                                | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Dizinler, “Tez Yazım Kılavuzu”na göre sıralandı ve metin içindeki yerleşime göre sayfa numaraları verildi.                                                                                           | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Özet ve Abstract hazırlandı.                                                                                                                                                                         | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Onay sayfası “Tez Yazım Kılavuzu”na uygun olarak hazırlandı ve imzalandı.                                                                                                                            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Etik İlke ve Kurallara Uygunluk Beyannamesi sayfası imzalandı.                                                                                                                                       | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Simgeler, kısaltmalar, tablolar ve şekillerin tamamı kontrol edilerek ilgili dizinde gösterildi.                                                                                                     | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ana metinde harf karakteri, harf büyüklüğü ve satır aralıkları “Tez Yazım Kılavuzu”na uygun olacak şekilde düzenlendi.                                                                               | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Görsel öğeler, tablolar (çizelgeler), şekiller ve denklemler metin içine “Tez Yazım Kılavuzu”na uygun şekilde yerleştirildi.                                                                         | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Kaynakça “Tez Yazım Kılavuzu”na göre düzenlendi.                                                                                                                                                     | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Kaynakların tamamına tez içerisinde atıfta bulunularak kaynakça bölümünde yer verildi.                                                                                                               | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Etik Kurul onayı gerekli ise teze eklendi.<br>(Etik Kurul onayı gerekmiyorsa yandaki “HAYIR” kutucuğunun altına “YOK” yazılacak).                                                                    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Anket, görüşme veya veri formları kullanıldıysa ilgili kurumlardan alınan izin yazıları ve formlar teze eklendi.<br>(Bu formlar kullanılmadıysa yandaki “HAYIR” kutucuğunun altına “YOK” yazılacak). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ekler “Tez Yazım Kılavuzu”nda belirtildiği şekilde sunuldu.<br>(Ek kullanılmadıysa yandaki “HAYIR” kutucuğunun altına “YOK” yazılacak).                                                              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Güzel Sanatlar Enstitüsüyle ilgili anasanat dallarında sergi, konser, gösterim vb. sunumları hazırlandı.                                                                                             | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

“Kompozit Ambalaj Atıklarından Karbon Nanotüp Eldesinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi” başlıklı Tez, yukarıdaki listede yer alan konularla ilgili olarak tarafımızca kontrol edilmiş ve gerekleri yerine getirilmiştir.

21/08/2019

Kübra CEBECİ TOPBAŞ

Prof. Dr. Aysun ÖZKAN

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Kübra CEBECİ TOPBAŞ

Yabancı Dil: İngilizce

Doğum Yeri ve Yılı: Şiran / GÜMÜŞHANE

E-posta : [kcebeci@eskisehir.edu.tr](mailto:kcebeci@eskisehir.edu.tr)

### Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- Ön Lisans:2008-2010, Gazi Üniversitesi, Atatürk Meslek Yüksekokulu, Kimya.
- Lisans:2011-2015, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü.
- Yüksek Lisans:2016-2019, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Bilimleri Bilim Dalı (Danışman: Doç. Dr. Aysun Özkan)
- 03.2016-12.2016, Çevre Mühendisi, Temçev Mühendislik Müşavirlik Arıtma Sistemleri San. Tic. Ltd. Şti., Eskişehir.
- 12.2016-12.2017, Çevre Mühendisi, Merpa Palet Geri Dönüşüm, Eskişehir.

### Yayınları ve Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Anadolu Üniversitesi Yayın ve Araştırma Teşvik Projesi, “Farklı Plastik Ambalajlarda Satılan İçme Sularında Ftalat Varlığının Tespiti”, (Araştırmacı), Proje No: 1705F202, Proje Süresi: Haziran 2017-Haziran 2018.
- TÜBİTAK Projesi, “Kompozit Ambalaj Atıklarının Pirolizi ve Gaz Üründen Karbon Nanotüp (CNT) Eldesi”, (Bursiyer), Proje No: 117Y041, Proje Süresi: Kasım 2017-Kasım 2019.
- Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, “Kompozit Ambalaj Atıklarının Pirolizi ve Ürünlerin Karakterizasyonu”, (Araştırmacı), Proje No: 1703F074, Proje Süresi: Mart 2017-Mart 2019.
- Özkan, A., **Cebeci Topbaş, K.**, Günkaya, Z., Banar, M. 2018. Determination of Phthalate Esters in PET Bottled Water using Solid-Phase Extraction coupled to GC-MS, International Symposium on Urban Water and Wastewater Management, 25-27 Ekim 2018, Denizli, Bildiriler Kitabı, 1318-1324.

- Özkan, A., **Cebeci Topbaş, K.**, Günkaya, Z., Yapıcı, E., Akgün, H., Banar, M., “Waste Plastic Type Selection To Produce Carbon Nanotube By Using ELECTRE III Methodology”, Fourth Symposium on Urban Mining and Circular Economy (SUM2018), Bergamo/İtalya, Proceeding Book, 41, 21-23 Mayıs 2018.
- Özkan, A., Yapıcı, E., Günkaya, Z., Akgün, H., **Cebeci Topbaş, K.**, Banar, M., “Pyrolysis of Waste C/LDPE in the Presence Of Waste Clay and Zeolite” Fourth Symposium on Urban Mining and Circular Economy (SUM2018), Bergamo/İtalya, Proceeding Book, 63, 21-23 Mayıs 2018.
- Özkan, A., Akgün, H., Günkaya, Z., Yapıcı, E., **Cebeci Topbaş, K.**, Banar, M., “Effect of Different Additive Materials on Waste LDPE Pyrolysis” Fourth Symposium on Urban Mining and Circular Economy (SUM2018), Bergamo/İtalya, Proceeding Book, 66, 21-23 Mayıs 2018.
- **Cebeci Topbaş, K.**, Özkan, A., Günkaya, Z., Yapıcı, E., Akgün, H., Banar, M., “Selection of the appropriate waste plastic type for the carbon nanotube synthesis: an analytical hierarchy process” 3. International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE), Çeşme/izmir, Abstract Book, 448, 24-27 Nisan 2018.
- Akgün, H., Özkan, A., Günkaya, Z., Yapıcı, E., **Cebeci Topbaş, K.**, Banar, M., ”Characterization of Pyrolysis Products of LDPE depending on Different Heating Rate and Temperature” 3. International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE), Çeşme/izmir, Abstract Book, 597, 24-27 Nisan 2018.
- Yapıcı, E., Özkan, A., Günkaya, Z., Akgün, H., **Cebeci Topbaş, K.**, Banar, M., ”Effect of Heating Rate and Temperature on the Pyrolysis Products of Waste C/LDPE” 3. International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE), Çeşme/izmir, Abstract Book, 612, 24-27 Nisan 2018.
- Özkan, A., **Cebeci Topbaş, K.**, Yapıcı, E., Günkaya, Z., Banar, M. 2019. “Life Cycle Assessment of Waste Composite Packaging Pyrolysis”, Fifth International Conference on Engineering and Natural Science (ICENS), Prag/Çek Cumhuriyeti, Book of Abstracts, 158, 12-16 Haziran 2019.
- Yapıcı, E., **Cebeci Topbaş, K.**, Günkaya, Z., Özkan, A., Banar, M. 2019. “Life Cycle Assessment of Multi Walled Carbon Nanotubes Synthesis via Chemical

Vapor Deposition”, International Biological, Agricultural&Life Science Congress (BIALIC), Lviv/Ukrayna, 07-08 Kasım 2019. **Kabul edildi.**

Ödülleri:

- 2018, Birinci, Best Paper Award, “ICOCEE 2018-The Third Edition of International Conference on Civil and Environmental Engineering, Çeşme / İZMİR.

