T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KALIPLAMA İLE ÜRETİLEN OTOMOTİV YEDEK PARÇASININ YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kübra Zekiye YAZIR

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

TEMMUZ 2025

T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KALIPLAMA İLE ÜRETİLEN OTOMOTİV YEDEK PARÇASININ YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kübra Zekiye YAZIR
(22434980614)
ORCID: 0009-0007-2227-5194

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Çevre Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet AYGÜN
ORCID: 0000-0002-6321-0350

TEMMUZ 2025

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 22434980614 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Kübra Zekiye YAZIR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "KALIPLAMA İLE ÜRETİLEN OTOMOTİV YEDEK PARÇASININ YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Ahmet AYGÜN** Bursa Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Sevgi DEMİREL** Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Mahmut Kemal KORUCU Bursa Teknik Üniversitesi	.....

Savunma Tarihi : 18 Temmuz 2025
Teslim Tarihi :

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Kübra Zekiye YAZIR

İmzası:

Sevgili eşime ve aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışması sürecimde başta gerekli kaynakları sunarak veri desteğini sağlayan şirketime ve verileri toplamamda emeği geçen çalışma arkadaşlarıma;

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve tecrübesinden yararlandığım, deneyimleri sayesinde çalışmalarıma farklı açılardan bakmamı sağlayan, yön gösterici danışman hocam sevgili Doç. Dr. Ahmet AYGÜN'e;

Lisans ve yüksek lisans eğitimimde bölümümü ve mesleğimi sevdiren, her konuda yardımlarını esirgemeyen, her zaman desteğini hissettiğim sevgili Prof. Dr. Mehmet İŞLEYEN'e;

Her zaman güleryüzü ile desteğini hissettiğim, bilgisini ve tecrübesini esirgemeyen sevgili Prof. Dr. Orhan Taner CAN'a;

Her daim yanımda olan, sabırla beni destekleyen ve teşvik eden, yön gösteren motivasyon kaynağım sevgili hayat arkadaşım Oğuzhan YAZIR'a;

Ve son olarak bana daima inanan, hep yanımda olan, desteklerini hep hissetmiş olduğum aileme ve arkadaşlarımla teşekkürlerimi borç bilirim.

Temmuz 2025

Kübra Zekiye YAZIR
(Çevre Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
KISALTMALAR ..... **x**
SEMBOLLER ..... **xii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiv**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 3
1.2 Çalışmanın Kapsamı 5
1.3 Literatür Taraması 6
2. KURAMSAL VE KAVRAMSAL ÇERÇEVE **9**
2.1 Sera Gazları ve Sera Etkisi 9
2.2 Küresel Isınma ve Küresel Isınmada Sera Gazları 10
2.3 Karbon Ayak İzi 10
2.3.1 Kurumsal karbon ayak izi 11
2.3.2 ISO 14064 standardı ve seri standartları 11
2.3.3 Ürün karbon ayak izi 13
2.3.3.1 Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDA) 13
2.3.3.2 Ürün karbon ayak izi standartları 13
2.3.3.3 Ürün karbon ayak izi yazılımları ve veri kaynakları 15
2.4 İklim Değişikliği Politikaları: Düzenlemeleri 18
2.4.1 Avrupa yeşil mutabakatı 20
2.4.2 Net sıfır emisyon hedefi 20
2.4.3 Emisyon ticaret sistemi (ETS) 21
2.4.4 Sınırda karbon düzenleme mekanizması (SKDM) 21
3. MATERYAL VE YÖNTEM **23**
3.1 Amaç ve Kapsamın Belirlenmesi 23
3.1.1 YDA çalışmasının amacı 24
3.1.2 YDA çalışmasının kapsamı 24
3.1.3 Fonksiyonel birim 24
3.1.4 Sistem Sınırları 25
3.1.5 Kesme kuralları 28
3.2 Yaşam Döngüsü Envanteri (LCI) 28
3.2.1 Veri toplama ve tahsisat 28
3.2.2 Veri kalitesi ve hassasiyet analizi 30
3.3 Etki Değerlendirme (LCIA) 32
3.4 Yorumlama 35
4. BULGULAR **37**
4.1 Yaşam Döngüsü Envanteri (LCI) 37

4.1.1 Çelik üretimi, krom çeliği 18/8, sıcak haddelenmiş {GLO} 38
4.1.2 Pik demir pazarı {Row} 39
4.2 Etki Değerlendirme (LCIA) 40
4.3 İyileştirme Önerileri 43
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 46
KAYNAKLAR 51
ÖZGEÇMİŞ 56

KISALTMALAR

AB : Avrupa Birliği
AM : Additive Manufacturing
AYM : Avrupa Yeşil Mutabakatı
BREEAM : Building Research Establishment Environmental Assessment Method
BSI : British Standards Institution
CBAM : Carbon Border Adjustment Mechanism
CFP : Ürün Karbon Ayak İzi
CML : Centrum voor Milieukunde Leiden
CML-IA : Avrupa Birliği
COP : Additive Manufacturing
DB : 1,4-Diklorobenzen
DEFRA : Department for Environment, Food and Rural Affairs
DOE : Department of Energy
DQR : Data Quality Rating
EF : Emisyon Faktörü
ELCD : European Life Cycle Database
EPA : Environmental Protection Agency
EPD : Environmental Product Declaration
ETS : Emisyon Ticaret Sistemi
EU : Avrupa Birliği
GABI : Ganzheitliche Bilanzierung
GHG : Sera Gazı
GWP : European Life Cycle Database
GLO : Global
GWP : Global Warming Potential
HFCs : Hidroflorokarbonlar
HFC-134a : Hidroflorokarbon-134a
HFC-152a : Hidroflorokarbon-152a
ILCD : International Reference Life Cycle Data System
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO : Uluslararası Standardizasyon Örgütü

JRC : Joint Research Centre

KIP : Küresel Isınma Potansiyeli

KOBİ : Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler

KPI : Anahtar Performans Göstergesi

LCA : Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

LCI : Yaşam Döngüsü Envanteri

LCIA : Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi

LEED : Leadership in Energy and Environmental Design

NDCs : Sera Gazı Emisyonlarını Azaltmaya Yönelik Ulusal Katkı Beyanları

PAS : Publicly Available Specification

PFCs : Perflorokarbonlar

RoW : Rest of World

SKA : Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları

SKDM : Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması

TPE : Enjeksiyonla Kalıplanmış Termoplastik Elastomer

TRACI : Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts

UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change

USA : United States of America

ÜKA : Ürün Karbon Ayak İzi

WRI : World Resources Institute

YDA : Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

YDD : Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

SEMBOLLER

°C	**:** Santigrat derece
CH_4	**:** Metan
CO_2	**:** Karbondioksit
CO_{2e}	**:** Karbondioksit eşdeğeri
G	**:** Coğrafi temsiliyet skoru
H_2O	**:** Su Buharı
N_2O	**:** Azot Oksit
Nm^3	**:** Normal metreküp
O_3	**:** Ozon
P2.5	**:** %2,5 yüzdelik değeri
P50	**:** Medyan değer
P97.5	**:** %97,5 yüzdelik değeri
R	**:** Güvenilirlik skoru
SF_6	**:** Kükürt Heksaflorür
T	**:** Zamansal temsiliyet skoru
Te	**:** Teknolojik temsiliyet skoru
t	**:** Ton
tCO_{2e}	**:** Ton cinsinden karbondioksit eşdeğeri
Tj	**:** Terajoule

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Kyoto Protokolü'ne göre baz alınan sera gazları. 9
Çizelge 2.2: Yaygın kullanılan YDA (LCA) yazılımları ve temel özellikleri. 16
Çizelge 2.3: İklim değişikliğine ilişkin etkinliklerin önemi ve sonuçları. 19
Çizelge 3.1: YDA çalışması proses bazlı veri miktarı girdileri. 30
Çizelge 3.2: IPCC 2021 GWP100 yönteminde baz alınan temel GWP değerleri. 33
Çizelge 4.1: OP-20 kodlu kalıbın emisyon miktarları ve yüzdelik dağılımları. 41
Çizelge 4.2: Normalizasyon tablosu. 42
Çizelge 4.3: Karakterizasyon tablosu. 42
Çizelge 4.4: Modelleme karşılaştırma tablosu. 44

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Sürdürülebilir kalkınma amaçları piramidi. 2
Şekil 2.1: ISO 14060 SG standartları ailesi arasındaki ilişki. 12
Şekil 3.1: Beşikten mezera sistem sınırı. 25
Şekil 3.2: Süreç akışı ve sistem sınırı. 27
Şekil 4.1: Karbon emsiyonu belirsizlik analizi (lognormal dağılım). 38
Şekil 4.2: Karbon emsiyonu belirsizlik analizi (lognormal dağılım). 40
Şekil 4.3: OP-20 kodlu kalıbın emisyon miktarlarına ait ürün ağacı. 41

KALIPLAMA İLE ÜRETİLEN OTOMOTİV YEDEK PARÇASININ YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ

ÖZET

İklim değişikliği, küresel düzeyde çevresel, ekonomik ve toplumsal etkileriyle ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) gibi uluslararası düzenlemeler, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik somut adımların atılmasını zorunlu kılmakta, sanayi sektörleri üzerinde sürdürülebilirlik odaklı baskıları artırmaktadır. Bu bağlamda, kurumlar ve işletmeler; yasal mevzuatlara uyum sağlamak, müşteri beklentilerini karşılamak, kurumsal itibarlarını güçlendirmek ve rekabet avantajı elde etmek amacıyla karbon ayak izi hesaplamalarına yönelmektedir. Karbon ayak izi, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca enerji, malzeme ve lojistik gibi faaliyetlerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının karbondioksit eşdeğeri (CO_{2e}) cinsinden nicel olarak belirlenmesini sağlar. Bu çalışma, otomotiv yan sanayisinde kullanılan OP-20 kodlu progresif kalıbın "beşikten mezara" yaklaşımı ile ürün bazlı karbon ayak izini hesaplayarak çevresel etkilerini analiz etmeyi amaçlamaktadır.

Çalışma kapsamında, yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına uygun olarak yürütülmüş; hesaplamalarda SimaPro 9.6.0.1 yazılımı ve Ecoinvent 3.10 veri tabanı kullanılmıştır. IPCC GWP 100 ve CML-IA Baseline metodolojilerine göre yapılan analiz sonucunda OP-20 kalıbının toplam karbon ayak izi 62.184,42 kg CO_{2e} olarak hesaplanmıştır. Ürün reçetesi, üretim girdileri ve proses verileri detaylı şekilde değerlendirilmiş, yüksek çevresel etkiye sahip bileşenler olarak 18/8 sıcak haddelenmiş kromlu çelik ve pik döküm malzemeler ön plana çıkmıştır. Bu bileşenlerin üretiminde kullanılan yüksek enerji miktarı ve kullanılan elektrik türü (yenilenebilir ya da fosil kaynaklı) toplam karbon ayak izini belirleyici faktörler arasında yer almaktadır. Ayrıca atık bertarafı aşamasında sıhhi depolama ve yakma yöntemlerinin farklı çevresel etkileri karşılaştırılmış, bazı kategorilerde yakma senaryosunun daha olumlu sonuçlar verdiği ancak abiyotik kaynak tükenmesi açısından dezavantaj yarattığı gözlemlenmiştir.

Çalışmada, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik öneriler sunulmuş; alternatif düşük karbonlu malzeme kullanımı, yenilenebilir enerji entegrasyonu, proses optimizasyonu ve çevreci lojistik stratejileri gibi iyileştirme alanları belirlenmiştir. Sonuçlar, ürün tasarımı, enerji tüketimi ve hammadde seçimlerinin çevresel etkileri doğrudan etkilediğini göstermektedir. Bu analiz, yalnızca akademik literatüre sektörel bir örnek sunmakla kalmayıp, aynı zamanda sanayi kuruluşlarının sürdürülebilir üretim stratejilerine bilimsel dayanak sağlamaktadır. Ayrıca, Avrupa Birliği düzenlemelerine hazırlık, dijital ürün pasaportu süreçlerine uyum ve çevreye duyarlı tedarik zinciri yönetimi gibi alanlarda karar vericilere yol gösterici bilgiler sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Yaşam döngüsü değerlendirmesi, Ürün karbon ayak izi, Otomotiv yan sanayi, Sera gazı emisyonları, Sürdürülebilir üretim, Çevresel etki.

LIFE CYCLE ANALYSIS OF AUTOMOTIVE SPARE PARTS PRODUCED BY MOLDING

SUMMARY

Climate change constitutes a serious global threat with environmental, economic, and social consequences. International frameworks such as the European Green Deal and the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) mandate concrete actions to reduce greenhouse gas emissions and place increasing sustainability-oriented pressure on industrial sectors. In this context, institutions and enterprises are turning to carbon footprint assessments to comply with legal regulations, meet customer expectations, strengthen corporate reputation, and gain competitive advantage. The carbon footprint refers to the quantitative measurement, expressed in carbon dioxide equivalents (CO_2e), of greenhouse gas emissions arising from energy, material, and logistics-related activities throughout a product's life cycle. This study aims to calculate and analyze the product-based carbon footprint of a progressive die, coded OP-20, used in the automotive supplier industry, through a cradle-to-grave life cycle approach.

The life cycle assessment (LCA) was conducted in accordance with ISO 14040 and ISO 14044 standards, using the SimaPro 9.6.0.1 software and Ecoinvent 3.10 database. Based on the IPCC GWP 100 and CML-IA Baseline methodologies, the total carbon footprint of the OP-20 die was calculated as 62,184.42 kg CO_2e. The product recipe, input materials, and process data were comprehensively evaluated, and 18/8 hot-rolled chromium-containing steel and pig iron were identified as the components with the highest environmental impacts. The high energy demand for producing these materials and the type of electricity used (renewable or fossil-based) were found to be key determinants of the overall carbon footprint. Furthermore, the end-of-life waste disposal stage was analyzed by comparing sanitary landfill and incineration methods. In some categories, the incineration scenario yielded more favorable outcomes; however, it posed disadvantages in terms of abiotic resource depletion.

The study presents emission reduction strategies, such as using alternative low-carbon materials, integrating renewable energy, optimizing processes, and implementing environmentally friendly logistics strategies. The results indicate that product design, energy consumption, and raw material choices have a direct impact on environmental performance. This analysis not only provides a sector-specific contribution to the academic literature but also offers scientific support for sustainable production strategies in industrial enterprises. Additionally, it delivers valuable insights for decision-makers in areas such as preparation for EU regulations, compliance with digital product passport requirements, and environmentally responsible supply chain management.

Keywords: Life cycle assessment, Product carbon footprint, Automotive supplier industry, Greenhouse gas emissions, Sustainable production, Environmental impact.

1. GİRİŞ

Yerküre, yaklaşık 4,5 milyar yıllık geçmişi boyunca iklimde her zaman çeşitli zaman ölçeklerinde doğal değişiklikler yaşamıştır. Ancak 19. yüzyılın ortalarında başlayan Sanayi Devrimi ile birlikte, bu doğal değişimlere ek olarak insan faaliyetlerinin de iklim üzerinde etkili olduğu yeni bir döneme girilmiştir (Türkeş ve diğ, 2000)

Dünya nüfusunun giderek artması ve bu nüfusun ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik sanayi devrimiyle hız kazanan endüstriyel gelişmeler, fosil yakıt kullanımına dayalı enerji üretimi ve doğal kaynakların plansız tüketimi gibi insan faaliyetleri sonucunda oluşan emisyonlar, sera gazı olarak atmosfere salınmıştır. Atmosfere salınan insan kaynaklı sera gazlarından başlıcaları; karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), azotoksit (N_2O), ozon (O_3) ve florlu gazlardır. Bu gazların atmosferdeki artışı ile atmosferin doğal bileşimi olumsuz etkilenmektedir (EPA, 2016).

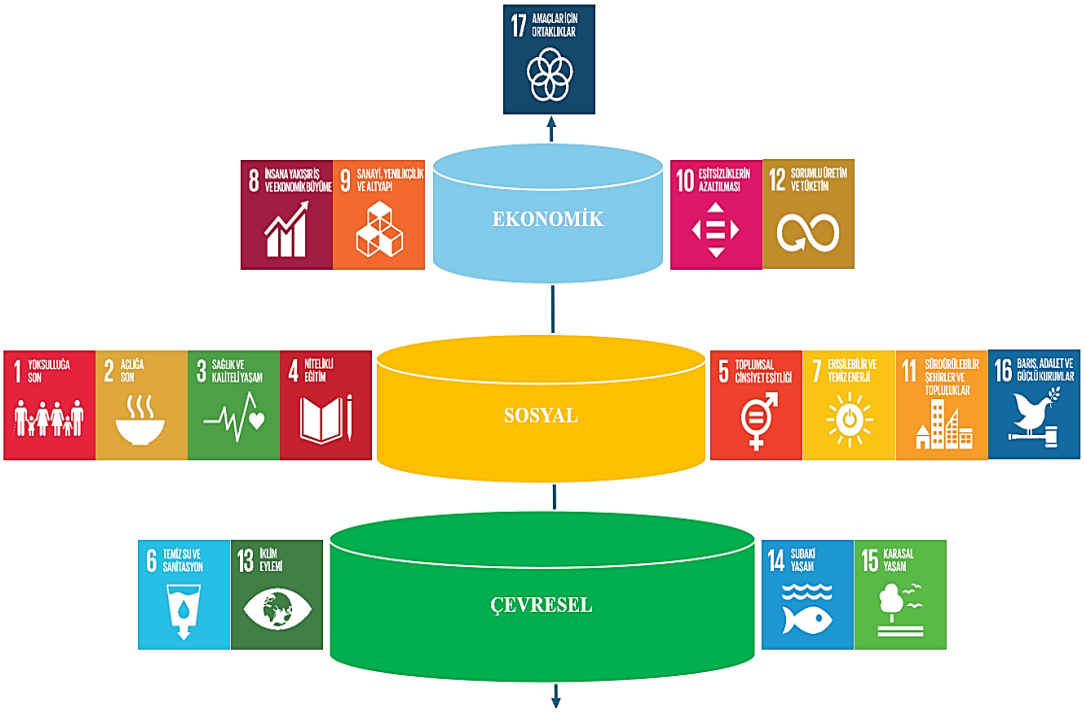
Antropojenik faaliyetler sonucunda atmosfere salınan sera gazlarının yoğunluğunun artması, yeryüzü sıcaklığının yükselmesine neden olmaktadır. Güneşten gelen kısa dalga boylu ışınım (görünür, morötesi ve kızılötesi) yeryüzüne ulaştığında, bir kısmı yüzey tarafından geri yansıtılırken, bir kısmı atmosferdeki sera gazları tarafından soğurulmaktadır. Bu mekanizma, ısının uzaya geri kaçmasını engelleyerek, yeryüzünün ısınmasına neden olan sera etkisini ortaya çıkarmaktadır. Atmosfer sıcaklığındaki bu artış, küresel ısınma olarak tanımlanmakta olup, aynı zamanda iklim değişikliklerine de sebep olmaktadır (Erbil, 2015). Kısaca İklim değişikliği, küresel ortalama sıcaklıklarda meydana gelen sürekli artışı ve bunun Dünya'nın iklim sistemi üzerindeki çeşitli etkilerini tanımlamaktadır. İklim değişikliği sonucunda, şiddetli hava olayları ve doğal afetlerde artış gözlenmekte; bu durum, canlı yaşamı üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır.

1970 ile 1980 yılları arasındaki gözlemler, troposferin ısınmasına ve stratosferin soğumasına neden olan sera gazlarının atmosfere salındığını ortaya koymuştur. Bu gazların etkilerinin kısa vadeyle sınırlı kalmayıp, 5 ila 50 yıl boyunca sürebildiği

belirlenmiş; ayrıca iklim değişikliği üzerindeki etkilerinin hızla artabileceği ve önemli coğrafi dönüşümlere yol açabileceği öngörülmüştür (Wetherald ve diğ, 1999).

Bu nedenle 1970'li yıllardan bu yana iklim değişikliği ve küresel ısınma konuları gündeme gelmiştir ve çözüm arayışları ele alınmıştır. Birleşmiş Milletler tarafından Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) 1988 yılında kurulmuştur ve iklim değişikliği sorununa çeşitli yönlerle yaklaşılmış ve çözüm arayışı sürecin başlatılması adına temeller atılmıştır. Birleşmiş Devletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) dahilinde gerçekleştirilen küresel düzeydeki görüşmeler ile çevresel sorunlara çözüm bulunulması adına ülkeler bir araya getirilmiştir. Kaynaklar zarar görmeden, kaynakların gelecekteki kuşaklara aktarılabilmesi anlayışı, sürdürülebilir kalkınma olarak nitelendirilmektedir ve UNFCCC kapsamında yapılan görüşmelerin en temel amacı olarak ele alınmıştır (Özçağ, 2017).

Tüm dünyada sürdürülebilirliği sağlayabilmek adına, Birleşmiş Milletler'e üye 193 ülke tarafından 2030 yılına kadar gerçekleşmesi amaçlanan hedefleri içeren 17 ana başlıktan oluşan Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) 2016 yılında yürürlüğe girmiştir (Vikipedi, 2025). Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'nın yapısı Şekil 1.1 Sürdürülebilir kalkınma amaçları piramidi'nde verilmiştir (Stockholm Resilience Centre, 2017).



Şekil 1.1: Sürdürülebilir kalkınma amaçları piramidi.

Şekil 1.1 Sürdürülebilir kalkınma amaçları piramidi'ne göre, çevresel hedefler piramidin temelini oluşturmaktadır. Sürdürülebilirlik kapsamında çevresel ve sosyal meseleler, ekonomik kalkınmanın temelini oluşturan iki önemli boyutu temsil etmektedir. Ekonomik kalkınmanın gerçekleşebilmesi için öncelikle sürdürülebilir çevre hedeflerinin sağlanması gerektiği vurgulanmaktadır (Tüzel, 2018).

İklim değişikliği sorunu dikkate alındığında, sorunu çözümlemek adına iklimle mücadele stratejileri oluşturulmuştur. Yasal düzenlemeler ile gönüllülük temelli politikalar doğrultusunda, sera gazı emisyonlarının farkındalığını artırmaya, izlemeye ve azaltım hedefleri oluşturmaya yönelik çalışmalar başlatılmıştır.

1997 yılında kabul edilip 2005'te yürürlüğe giren Kyoto Protokolü ile 2015 yılında imzalanan Paris Anlaşması, iklim değişikliğine yönelik çözüm arayışlarının temel adımlarını oluşturmuştur. Bu anlaşmaların temelinde, küresel ısınmaya neden olan sera gazı emisyonlarının belirlenmesi ve azaltılması yer almaktadır (Özçağ, 2017).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından yayımlanan rapora göre, mevcut politikaların sürdürülmesi durumunda, küresel sıcaklık artışının 2050 yılına kadar 3 °C'ye ulaşacağı öngörülmektedir. Aşırı hava olaylarının önlenebilmesi ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin sınırlandırılması için, küresel sıcaklık artışının 1,5 °C ile sınırlandırılması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu doğrultuda, 2015 Paris Anlaşması ile 2050 yılına kadar iklim nötrlüğüne ulaşılması hedeflenmiştir.

Avrupa Komisyonu ise 11 Aralık 2019 tarihinde, kamuoyuna "European Green Deal" adıyla sunulan ve Türkçeye "Avrupa Yeşil Mutabakatı" olarak çevrilen belgeyi yayımlamıştır. Bu belge, Avrupa Birliği'nin 2050 yılına kadar net sıfır sera gazı emisyonu hedefine ulaşmasını amaçlayan stratejileri ve yasal düzenleme önerilerini içeren kapsamlı bir yol haritası niteliğindedir. Bu kapsamda, 14 Temmuz 2021 tarihinde açıklanan "55'e Uyum Paketi" ile 2030 yılına kadar emisyonların %55 oranında azaltılması ve 2050 yılına kadar iklim nötr bir Avrupa hedefi resmileştirilmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Yasal anlamda Avrupa Birliği'nin yaptırımları ile karşı karşıya kalmamak, ithalat ve ihracatta stratejik öncelikler elde edebilmek ve iklim değişikliği ile mücadele edebilmek adına kurum ve kuruluşlar yol haritalarını belirlemeyi amaçlamıştır.

Kurumlar ve kuruluşlar; mevzuatlara uyum, müşteri taleplerinin karşılanması, sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlanması ve kurumsal itibarın güçlendirilmesi gibi nedenlerle, karbon ayak izi hesaplamaları yaparak küresel ısınmaya olan etkilerini ölçümlemektedir. Karbon ayak izi; bir kurumun veya kuruluşun ürün ya da hizmet sunma sürecinde, enerji ve fosil yakıt kullanımı, ulaşım, tedarik zinciri ve üretim gibi faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının, ton cinsinden karbondioksit eşdeğeri (tCO_{2e}) olarak hesaplanan toplam miktarını ifade etmektedir. İklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlamak amacıyla karbon ayak izini hem toplam hem de ürün bazında hesapladıktan sonra sera gazı emisyonlarını kontrol altına almayı ve azaltmayı hedeflemektedir. Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) Raporu'na göre, iklim değişikliğinin neden olabileceği ani veya geri döndürülemez etkileri önlemek için küresel ölçekte sera gazı emisyonlarının sürekli olarak azaltılması gerekmektedir (Talu, 2019).

Mevcut durumda iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini en aza indirmek ve süreci durdurabilmek adına enerji tüketiminin düşürülmesi ve emisyon salınımının azaltılması gibi çalışmalar yer almaktadır. Bir ürün veya hizmetin üretim sürecinde yalnızca elektrik, doğalgaz ve lojistik gibi temel kaynaklardan kaynaklanan tüketimler değil, aynı zamanda diğer faaliyetlerin sebep olduğu emisyonlar da göz önünde bulundurulmalıdır. Ancak mevcut çalışmaların bu alandaki eksiklikleri dikkat çekmektedir. Emisyon azaltımı için izlenebilecek yöntemlerden biri, üretim süreçlerinde düşük karbon salınımına sahip ürün ve hizmetleri tercih etmektir. Bu yaklaşım, hem üreticiler hem de hizmet sağlayıcılar açısından yatırımcıların yönlendirdiği bir kriter hâline gelmiştir. Karbon ayak izini düşürmek isteyen kurumlar, ürün ve hizmet alımlarında sıfır emisyonlu veya düşük karbon salınımına sahip tedarikçileri tercih etmektedir. Bu doğrultuda, sera gazı emisyonlarını etkin bir şekilde yönetebilmek ve gerekli aksiyon planlarını oluşturabilmek için karbon ayak izi hesaplamalarının ürün veya hizmet bazında gerçekleştirilmesi önem arz etmektedir. Bir ürünün veya hizmetin yaşam döngüsü boyunca hammadde temininden üretim aşamasına, geri dönüşüm sürecinden kullanım ömrünün sonuna kadar ortaya çıkan sera gazı emisyonlarının ölçülmesi, bu hesaplamaların temelini oluşturmaktadır.

Çalışmanın temel amacı, otomotiv yan sanayisinde kullanılacak olan progresif kalıbın ürün bazlı karbon ayak izi hesaplamalarını gerçekleştirerek emisyon azaltım stratejilerini analiz etmektedir. Bu sayede otomotiv yan sanayisine üretilen kalıpların

çevreye ve iklime etkilerinin azaltılması, rekabet avantajı sağlanması ve sürdürülebilir üretim modellerinin yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. Bu kapsamda üretilen kalıpların üretim süreçlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları analiz edilmiş, ürün yaşam döngüsü boyunca karbon ayak izi değerlendirilmiş, sera gazı emisyonlarının azaltılmasının gerekliliği bilimsel argümanlarla desteklenmiştir ve uygulanabilir emisyon azaltım stratejileri sunulmuştur.

1.2 Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışma ile Bursa ilinde faaliyet gösteren otomotiv yan sanayisine hizmet eden kalıp tesisinde üretim progresif kalıbın üretiminden kaynaklı sera gazı emisyonları hesaplanmış ve azaltım stratejilerine değinilmiştir. Üretilen kalıbın, ürün yaşamı boyunca oluşturduğu sera gazı miktarının hesaplanması sağlanılmıştır. Bunun yanı sıra ürünün karbon ayak izi analiz edilerek sera gazı emisyonun neden azaltılması gerektiği ve azaltılması adına ne gibi startejilere ihtiyaç duyulduğuna değinilmiştir. Bu sayede otomotiv yan sanayisinde kullanılacak olan kalıbın; çevreye ve iklime etkisi, ürünün pazarda öncelikli konuma gelerek rekabetçiliğinin arttırılması, yaptırımlar ile karşı karşıya kalmaması, tedarik zincirindeki etkisi ve çevreye duyarlı bir şekilde üretimin gerçekleşmesi ve ekonomik faydalar sağlanılması amaçlanmaktadır. Bu bağlamda; enerji kullanımı, fosil yakıt tüketimi, lojistik hareketleri ve üretim faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Üretilen kalıbın yaşam döngüsü boyunca neden olduğu emisyonlar hesaplanmıştır ve hammadde tedariğinden müşteriye (beşikten kapıya) ve son kullanıcıya (beşikten mezara) kadar uzanan süreçlerde karbon ayak izi etkileri incelenmiştir. Ardından bilimsel ve sektörel veriler ışığında uygulanabilir emisyon azaltım yöntemleri belirlenmiştir.

Çalışma ile çevre dostu üretim süreçlerinin yaygınlaştırılmasına katkı sunmak hedeflemektedir. Bu çalışma ile otomotiv yan sanayisi için üretilen kalıbın karbon ayak izi hesaplama yöntemlerinin uygulanabilirliği örneklenmiştir. Sektörel sera gazı azaltım stratejilerinin geliştirilmesine yönelik önerilerde bulunulmuştur. Ürün karbon ayak izi ve sürdürülebilir üretim ilişkisine dair literatüre yerel bir örnek sunulmuştur. Yaşam döngüsü analizine dayalı sera gaz azaltım yöntemleri için bilimsel bir çerçeve çizilmiştir. Ayrıca kurum ve kuruluşların karbon ayak izini azaltarak enerji ve maliyet tasarrufu sağlamalarına katkı sunulmuştur. Böylece çevre dostu üretim ile kurum ve

kuruluşlar için pazarda rekabet gücünün artırılmasına yönelik bir yol haritası geliştirilmiştir.

1.3 Literatür Taraması

Mevcut durumda kurumsal düzeyde sera gazı emisyonlarının analiz edilebilmesi amacıyla çeşitli girişimler, rehber dokümanlar ve hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu kapsamda kurumsal karbon ayak izi hesaplamalarında; Sera Gazı Protokolü (WRI 2004; WRI 2011), PAS 2060 (BSI 2014), ISO 14064 (ISO 2019) ve Tier Yaklaşımı gibi uluslararası kabul görmüş standartlardan yararlanılmaktadır. Temel olarak sera gazı emisyonları hesaplanırken, faaliyet verisinin belirli bir kaynağın faaliyet birimlerine veya süreç/süreçlere göre ortalama emisyon oranı (EF: emisyon faktörü) ile çarpımı şeklinde hesaplanmaktadır. Sera gazı emisyonlarını, küresel ısınma potansiyeli açısından ne kadar CO_2 emisyonuna karşılık geldiğini (tCO_{2e}) ifade etmek için ise çıkan sonuç küresel ısınma potansiyeli (KIP) değeri ile çarpılmaktadır. Karbon ayak izinin hesaplanması ve analizine yönelik olarak, farklı sektörlerde çeşitli yöntemlere dayanan çalışmalar yürütülmektedir.

Literatürde WRI hesaplama metoduna göre yapılan çalışmalar incelendiğinde, Çinli Jiangling Motors Co., Ltd. çevre araştırma ekibinin gerçekleştirdiği çalışmada, doğrudan ve dolaylı emisyonlar tanımlanmış ve yapılan hesaplamalar sonucunda, 2014 yılına ait toplam CO_2 emisyon miktarı 60.307 tCO_{2e} şeklinde olduğu belirlenmiştir (Jiangling Motors Corporation Ltd., 2014).

Bunun yanında, WRI tarafından geliştirilen sera gazı emisyon hesaplama yöntemi kullanılarak, 2014 yılında Wolfram ile Jochem tarafından Volkswagen Otomotiv Sanayi'nin dolaylı emisyonları incelenmiştir. Bu incelemede, iş seyahatleri, lojistik faaliyetler, araç kullanımı ve bertarafı ile tedarik zincirine ilişkin süreçlerden kaynaklanan sera gazı emisyonları hesaplanmıştır. 2014 yılı verilerine göre, otomobil ve hafif ticari araçlardan kaynaklanan toplam emisyon 0,048 milyon ton olarak belirlenmiş; üretim tesislerinden kaynaklanan sera gazı salımının ise araç başına 4,79 kilogram olduğu tespit edilmiştir (Jochem ve diğ, 2014).

Sreng (2016) tarafından otomotiv sektörüne yönelik gerçekleştirilen araştırmada, karbon ayak izinin uluslararası standartlara uygun olarak hesaplanması ve raporlanmasına dair yöntemler incelenmiş; ayrıca bu ayak izinin insan sağlığına ve

iklim değişikliğine olan etkileri ile küresel otomotiv sektöründeki yansımaları değerlendirilmiştir. Otomotiv endüstrisi yaşam döngüsü perspektifinde analiz edildiğinde, karbon ayak izinin her adımda oluşabileceği vurgulanmıştır. Yılda 1 milyon araç üretimi gerçekleştirildiğinde, üretim sürecinde ortaya çıkan emisyon miktarının 1.700.000 tCO_{2e}'ye kadar ulaşabileceği tespit edilmiştir. Tesisteki araç üretiminden kaynaklanan elektrik tüketiminin emisyon miktarı 1.478.235,91 tCO_{2e} olarak hesaplanmıştır. Sabit yanma için kullanılan doğalgazdan kaynaklanan emisyon miktarının ise 2.450,45 tCO_{2e} olduğu belirlenmiştir. Sera gazı emisyonlarını azaltmak amacıyla, karbon yutağı olarak işlev gören yeşil alanların artırılması ve enerji ihtiyacının yenilenebilir bir kaynak olan güneş enerjisi ile karşılanması önerilmiştir. Yapılan hesaplamalar ile 250 watt gücüne sahip güneş panelleri sayesinde üretilen elektrik enerjisinin kullanılması durumunda, elektrik tüketimi faaliyetinin neden olduğu sera gazı emisyonlarının neredeyse tamamen ortadan kalkacağı ifade edilmiştir (Sreng, 2016).

Demirbaş (2018) tarafından geri dönüşüm faaliyeti gösteren bir tesiste gerçekleştirilen çalışmada, karbon ayak izi, tesisin içinde ve dışında elektrik, ısınma ve ulaşım kaynaklı olarak HAİDP'nin geliştirdiği Tier 1 ve Tier 2 yaklaşımlarıyla analiz edilmiştir. Yapılan araştırmada, tesisin karbon ayak izinin %76,8'inin ulaşımdan kaynaklandığı belirlenmiştir. Ulaşım faaliyetinin neden olduğu karbon ayak izi miktarı 102.000 tCO_{2e}, ısınma faaliyetinin neden olduğu karbon ayak izi miktarı 30.726 tCO_{2e} ve elektrik faaliyetinin neden olduğu karbon ayak izi miktarı ise 8,6 tCO_{2e} olarak saptanmıştır (Demirbaş, 2018).

Salonitis ve diğ. (2019); dökme demir ve alüminyum motor bloklarının üretim süreçlerini karşılaştırarak, alüminyumun daha hafif olmasına rağmen üretiminde yüksek enerji tüketimi nedeniyle karbon ayak izinin arttığını belirtmişlerdir. Alüminyum motor blokları daha hafif olmalarına rağmen, yüksek enerji gereksinimi nedeniyle karbon ayak izlerinin dökme demire göre %25–30 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, malzeme seçiminde sadece ağırlık değil, üretim sürecinin enerji tüketimi ve emisyonları da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Salonitis ve diğ, 2019).

Bitki lifli kompozit malzemelerin otomotiv bileşenlerinde kullanımı üzerine yapılan bir çalışmada, bu malzemelerin üretiminde elektrik tüketiminin toplam karbon emisyonlarının %42'sinden fazlasını oluşturduğu bulunmuştur. Ayrıca, mikrohücreli

köpük kalıplama işlemi, ürünün çevresel etkisini yaklaşık %15 oranında azaltmıştır. Bu bulgular, üretim süreçlerinde enerji verimliliğinin ve temiz enerji kullanımının önemini vurgulamaktadır (Lu ve diğ, 2023).

Liu ve diğ. (2024); altı farklı (örneğin deri, kumaş, TPE) otomotiv iç panel kaplamasının yaşam döngüsü değerlendirmesini yapmışlardır. Çalışmada, deri kaplamalı panellerin en yüksek karbon ayak izine (yaklaşık 62 kg CO_2-eq/ürün) sahip olduğu; enjeksiyonla kalıplanmış termoplastik elastomer (TPE) panellerin ise en düşük emisyona (yaklaşık 24 kg CO_2-eq/ürün) sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, malzeme türünün ve üretim yönteminin çevresel etkiler üzerinde önemli rol oynadığını göstermektedir (Liu ve diğ, 2024).

Metal otomotiv kalıplarının geleneksel yöntemlerle üretimi ile katmanlı üretim (Additive Manufacturing) yöntemi karşılaştırılmıştır. Additive Manufacturing (AM) teknolojisi kullanılarak üretilen metal kalıpların çevresel etkileri üzerine yapılan çalışmada, geleneksel üretim yöntemlerine göre AM'nin üretim aşamasında daha düşük çevresel etkilere sahip olduğu belirlenmiştir. Katmanlı üretim yöntemi, üretim sürecinde %35 daha az karbon emisyonuna neden olmuş; ancak kullanılan toz metal hammaddelerin üretimi daha yüksek çevresel etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak, kullanılan malzemenin çevresel etkileri ve maliyeti daha yüksek olmasına rağmen, kullanım aşamasında AM ile üretilen kalıpların daha avantajlı olduğu görülmüştür (Yang ve diğ, 2021).

Suksuntornsiri (2020), iki farklı lastik diş kalıbının üretim süreçlerini karşılaştırarak, kullanılan makinelerin ve malzemelerin karbon ayak izine katkılarını değerlendirmiştir. İki farklı lastik diş kalıbının (alüminyum ve çelik bazlı) üretim süreçleri incelenmiştir. Çalışmada, alüminyum kalıpların karbon ayak izinin üretim aşamasında çelik kalıplara kıyasla %18 daha fazla olduğu belirtilmiştir. Ayrıca CNC işlemeler, toplam karbon emisyonlarının %47'sini oluşturmuş, üretim sürecinde kullanılan enerji kaynaklarının çevresel etkileri önemli rol oynamıştır. Çalışmada, alüminyum gibi malzemelerin karbon ayak izinin, üretim yöntemine ve kullanılan enerji kaynaklarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği vurgulanmıştır (Suksuntornsiri, 2020).

2. KURAMSAL VE KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1 Sera Gazları ve Sera Etkisi

Sera gazları, atmosferde doğal olarak bulunan ve insan faaliyetleriyle artış gösteren gazlardır. Kyoto Protokolü'ne göre altı ana sera gazları arasında karbondioksit (CO_2), azot oksitler (N_2O), metan (CH_4), kükürt heksaflorür (SF_6), perflorokarbonlar (PFCs) ve hidroflorokarbonlar (HFCs) ve ayrıca su buharı (H_2O) ve ozon (O_3) yer almaktadır. Bu gazların atmosferdeki ısıyı tutma yetenekleri, sera etkisinin temelini oluşturmaktadır (IPCC, 2021). Kyoto Protokolü kapsamında, atmosferde ısıyı tutma özelliği bulunan karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), diazot monoksit (N_2O), hidroflorokarbonlar (HFCs), perflorokarbonlar (PFCs) ve kükürt heksaflorür (SF_6) gibi bileşikler sera gazları olarak tanımlanmaktadır. Bu gazlara ilişkin detaylı bilgiler Çizelge 2.1'de sunulmuştur (IPCC, 2007) (EPA, 2021).

Çizelge 2.1: Kyoto Protokolü'ne göre baz alınan sera gazları.

Sembol	İsim	CO_2 Eşdeğeri	Ana Kaynak
CO_2	Karbondioksit	1	Fosil yakıtlar yanması (kömür, petrol, doğal gaz), ormansızlaşma ve arazi kullanımı değişiklikleri, çimento üretimi gibi endüstriyel süreçler, taşımacılık sektörü.
PFC_S	PerFloro Karbonlar	6.500-9.200	Alüminyum üretimi ve yarı iletken sanayisi.
N_2O	Nitroksit	310	Tarım (azotlu gübrelerin kullanımı), Endüstriyel süreçler, fosil yakıtların yanması, organik atıkların ayrışması.
HFC_S	HidroFloro Karbonlar	140-11.700	Soğutma sistemleri ve klimalarda kullanılan gazlar, aerosol spreyler, endüstriyel çözücüler (UNEP, 2018).
SF_6	Sülfür Heksaflorit	23.900	Elektrik iletim sistemlerinde izolasyon gazı olarak kullanımı, endüstriyel prosesler (ör. magnezyum üretimi) (WMO, 2019).
CH_4	Metan	21	Tarım (özellikle sığır ve koyun gibi geviş getiren hayvanların mide fermantasyonu), pirinç tarlaları, atık yönetimi (katı atık depolama alanları), fosil yakıt üretimi ve dağıtımı (kömür madenciliği ve doğal gaz sızıntıları).

Çizelge 2.1'de belirtilen CO_2 eşdeğeri kavramı, karbondioksit dışındaki sera gazlarının, eşit miktarda CO_2'ye kıyasla 20 ile 23.900 kat arasında daha fazla ısı tutma

kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu ölçü birimi sayesinde farklı sera gazları ortak bir ölçekte değerlendirilerek emisyon hesaplamalarının yorumlanması ve karşılaştırılması kolaylaştırılmıştır. Kyoto Protokolü'nde dikkate alınan sera gazları arasında ısıl etkinlik bakımından en yüksek potansiyele sahip gaz SF_6 iken, CO_2 en düşük seviyededir. Ancak atmosferdeki miktar bakımından CO_2'nin çok daha fazla bulunması nedeniyle, küresel ısınma üzerindeki etkisi diğer gazlara kıyasla daha büyüktür (Downie ve diğ, 2012).

2.2 Küresel Isınma ve Küresel Isınmada Sera Gazları

Küresel ısınma, Dünya'nın yüzey sıcaklığında uzun dönemli bir artışı ifade eden, insan faaliyetleri ve doğal süreçlerin etkileşimi sonucu ortaya çıkan bir olgudur. Bu süreçte özellikle atmosferdeki sera gazlarının yoğunluğundaki artışın temel rol oynadığı bilimsel araştırmalarla kanıtlanmıştır (IPCC, 2021). İnsan faaliyetleri, özellikle fosil yakıt tüketimi, ormansızlaşma ve endüstriyel üretim süreçleri, bu gazların atmosferdeki konsantrasyonunu önemli ölçüde artırmaktadır (Myhre ve diğ, 2013). Örneğin, sanayi devrimi öncesinde atmosferdeki karbondioksit konsantrasyonu 280 ppm düzeyindeyken, günümüzde bu değer 420 ppm'i aşmıştır (Keeling ve diğ, 2022). Bu artış, küresel sıcaklıkların 1850-1900 yılları arasındaki ortalama seviyeye göre 1,1 °C artmasına neden olmuştur (IPCC, 2021). Sera gazlarının küresel ısınmadaki bu belirleyici etkisi, uluslararası politikaların ve bireysel davranış değişikliklerinin önemini daha da artırmaktadır.

2.3 Karbon Ayak İzi

Karbon ayak izi, bireylerin, kuruluşların, ürünlerin veya süreçlerin doğrudan veya dolaylı olarak atmosfere saldığı toplam sera gazı miktarını ifade etmektedir. Bu sınırlar, genellikle belirli bir aktivitenin yaşam döngüsü boyunca hesaplanır. Genellikle ton cinsinden karbondioksit eşdeğeri (tCO_{2e}) cinsinden ölçülmektedir ve iklim değişikliği üzerindeki etkileri değerlendirmek için bir göstergedir. Başka bir deyişle, karbon ayak izi; ulaşım, ısınma, elektrik kullanımı ve tüketim alışkanlıkları gibi insan faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan sera gazı emisyonlarının karbondioksit eşdeğeri (CO_2e) üzerinden hesaplanarak çevresel etkiye dönüştürülmesidir. Herhangi bir ürüne veya hizmete özel olarak hesaplanabileceği gibi, kurum ve kuruluşların tüm faaliyetleri için de hesaplanabilmektedir.

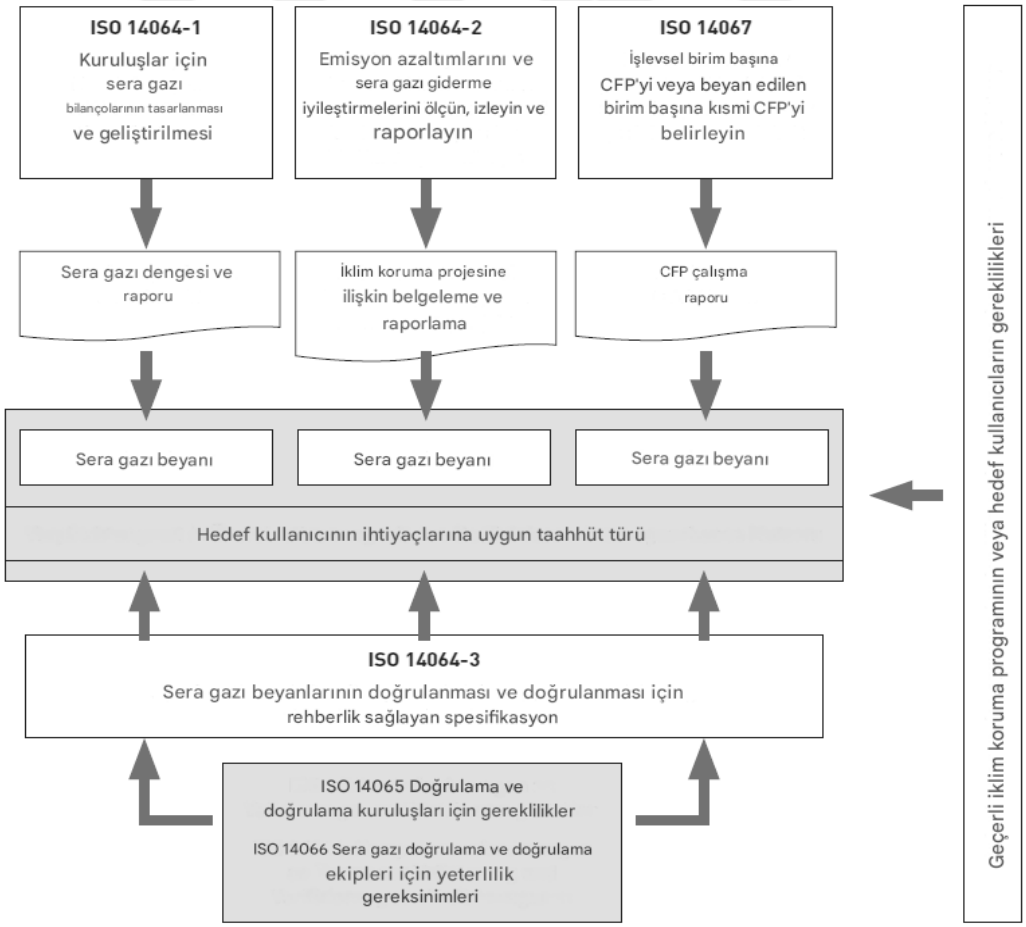
2.3.1 Kurumsal karbon ayak izi

Kurumsal karbon ayak izi, bir kuruluşun yürüttüğü faaliyetler neticesinde doğrudan ya da dolaylı yollarla atmosfere salınan toplam sera gazı miktarını tanımlamaktadır. Genellikle ton karbondioksit eşdeğeri (tCO_{2e}) cinsinden ölçülmektedir. Kurum ve kuruluşların iklim değişikliği üzerindeki etkisini analiz etmeye yarayan bir ölçüttür. Kurumsal karbon ayak izi, yalnızca doğrudan enerji kullanımı ve fosil yakıt tüketimini kapmamakta olup aynı zamanda tedarik zinciri, atık yönetimi ve diğer dolaylı etkileri de kapsamaktadır (GHG Protocol, 2004). Kurumsal karbon ayak izini hesaplamasında GHG Protocol, PAS 2050 ve ISO 14064 uluslararası standartlarından herhangi biri kullanılmaktadır. GHG Protokolü ve PAS 2060 standartları kapsamında sera gazı envanteri; tier düzeyleri ya da kapsamlar şeklinde adlandırılan üç ayrı değerlendirme yaklaşımıyla sınıflandırılmaktadır. Kapsam 1 (doğrudan emisyonlar), şirket veya birey tarafından kontrol edilen faaliyetler sonucu salınan sera gazlarıdır. Isınma, üretim faaliyetlerinde yakıt tüketimi sonucunda oluşan emisyonlar buna örnektir. Kapsam 2 (dolaylı emisyonlar), tesisin elektrik enerjisini tüketmesi aşamasında neden olduğu emisyonlar ile kurumun başka bir kurumdan satın aldığı buhar, soğutma veya sıcak suya bağlı emisyonlardır. Kapsam 3 (diğer dolaylı emisyonlar), tedarik zincirinde yer alan üretim, taşımacılık, atık bertarafı gibi süreçlerden kaynaklanan emisyonlardır. Kurumların kullandığı ürünlerden, taşeron hizmetlerine; kiralanan araçların yakıt tüketiminden, çalışanların iş seyahatlerinde kara, deniz ve hava yoluyla gerçekleştirdiği ulaşım faaliyetlerine kadar tüm kaynaklardan kaynaklanan emisyonları kapsamaktadır (Turan ve diğ, 2019).

2.3.2 ISO 14064 standardı ve seri standartları

ISO 14064 standardı ve seri standartları, sera gazı emisyonlarının ölçülmesi, izlenmesi, raporlanması ve doğrulanması için uluslararası kabul görmüş bir çerçeve sunmaktadır. 2006 yılında ISO tarafından ISO 14064 serisi standardları yayınlanmıştır. ISO 14064, bir sera gazı denkleştirme protokolü olarak tanımlanmakta olup, güncel halinde üç ayrı standart biçiminde sunulmaktadır. Bu kapsamda ISO 14064-1:2018 standardı, kurum düzeyinde sera gazı envanterinin oluşturulması, geliştirilmesi, yönetilmesi ve raporlanması için şartları tanımlamakta ve kuruluşların sera gazı envanterinin doğrulanması için esas teşkil etmektedir (ISO, 2018). ISO 14064-2:2019 standardı; sera gazı emisyonlarının azaltılması veya sera gazı

uzaklaştırmalarının artırılması için özel olarak tasarlanmış sera gazı projeleri veya proje bazlı faaliyetlere odaklanmakta ve sera gazı projelerinin doğrulanması ve geçerli kılınması (onaylanması) için esas teşkil etmektedir. ISO 14064-3:2019 standardı, ISO 14065'te (doğrulama ve geçerli kılma/onaylama faaliyetlerini yürüten kuruluşlar için akreditasyon standardı) tanımlanan akreditasyon şartlarına uygun şekilde; sera gazı bilgilerini doğrulayan ve geçerliliğini değerlendiren üçüncü taraf kuruluşlara yönelik ilke, gereklilik ve rehberlik sunan bir süreç içermektedir. Bu standart, bir proje ya da kuruluşun sera gazı beyanlarının eksiksiz, doğru, tutarlı, şeffaf ve maddi hatalardan arınmış olmasını sağlayarak hedef kitleye güvence sağlamayı amaçlamaktadır. Başka bir deyişle üçüncü bir tarafça gerçekleştirilen doğrulama ve onaylama faaliyetleri, ISO 14064-1 ve ISO 14064-2 standardlarına göre gerçekleştirilen sera gazı beyanlarının güvenilirliği artırmakta ve kuruluşlar ve proje sahiplerinin gönüllü karbon piyasaları ve emisyon kredilerinin ticareti mekanizmalarına katılımında anahtar rol üstlenmektedir. Şekil 2.1, ISO 14064 standardı ve seri standartları ailesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 2.1: ISO 14060 SG standartları ailesi arasındaki ilişki.

2.3.3 Ürün karbon ayak izi

Ürün karbon ayak izi (ÜKA), bir ürünün yaşam döngüsünün her aşamasında oluşturduğu toplam sera gazı (CO_2, CH_4, N_2O, vb.) emisyonlarının ölçüsüdür ve genellikle karbon dioksit eşdeğeri (CO_{2e}) cinsinden ifade edilmektedir. Bilimsel olarak Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDA) yöntemine dayanmaktadır ve ürünün yaşam döngüsündeki çeşitli aşamalarını (hammadde çıkarımı, üretim, taşımacılık, kullanım ve bertaraf) kapsamaktadır.

2.3.3.1 Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDA)

Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDA), bir ürünün, sürecin veya hizmetin hammadde çıkarımından bertarafına kadar çevresel etkilerini sistematik olarak değerlendiren bir yöntemdir. Değerlendirmenin ele alındığı yaşam döngüsü aşamasına bağlı olarak "beşikten mezara", "beşikten kapıya", "beşikten beşiğe" ve "kapıdan kapıya" olarak isimlendirilmektedir (Çamur, 2010).

Yaşam döngüsü değerlendirmesi metodolojisi ISO 14040 ve ISO 14044 standartları tarafından tanımlanmıştır ve dört temel aşamadan oluşmaktadır. ISO 14040; prensipler ve çerçeve (çalışmanın amacı, kapsamı, sistem sınırları ve işlevsel birimi belirlenmektedir), ISO 14041; amaç, kapsam ve envanter analizini (ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca kullanılan hammaddeler, enerji, su vb. girdiler ve atıklar, emisyonlar vb. çıktılar nicel olarak belirlenmektedir), ISO 14042; yaşam döngüsü etki incelemesini (toplanan veriler çevresel etkilere dönüştürülmektedir ve küresel ısınma potansiyeli, asitlenme, su ayak izi, ozon tabakası incelmesi vb. kategorilere ayrılmaktadır), ISO 14043; yaşam döngüsü yorumlamasını (sonuçlar analiz edilmektedir, belirsizlikler değerlendirilmektedir ve sürdürülebilirlik açısından iyileştirme önerileri sunulmaktadır) ve ISO 14044; ihtiyaçlar ve yönergeyi içermektedir (Özbilen ve diğ, 2011) (ISO, 2006a) (ISO, 2006b).

2.3.3.2 Ürün karbon ayak izi standartları

ISO 14067 Standardı, GHG Protocol, PAS 2050 ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi gibi uluslararası kabul görmüş çerçevelerle yapılmaktadır.

ISO 14067 standardı

ISO 14067 standardı, ürünlerin karbon ayak izinin göstergesi için gerekli kriterleri sağlayarak, performansının değerlendirilmesinde rakipçi bir araç olarak öne

çıkmaktadır. Bu standart, tüketicilerin ürün odaklı büyüme göstergelerine olan güvenini artırmayı ve ürün etiketlerinin daha net bir şekilde düzenlenmesine yardımcı olmayı amaçlamaktadır.

Standardın temel algoritması, yaşam döngüsü analizi yaklaşımına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, sera emisyonlarının hangi süreç veya aşamadan kaynaklandığını belirlemeye olanak tanmaktadır. ISO 14067, karbon ayak izi değerlendirmesini netleştirerek yaşam döngüsü analizi (YDA) yaklaşımında özel şartlar sağlamaktadır. Ayrıca sistem kısıtlamalarının seçimi, ürün karbon ayakizinin (ÜKA) miktarının belirlenmesi ve ürün kullanım ile kullanım ömrü aşamalarının simüle dilmesi için detaylı bir yol haritası sunmaktadır. Ürün karbon ayak izi çalışmaları sonucunda elde edilen veriler, bir ürün birimi veya sağlanan hizmetler açısından raporlanabilmektedir. ISO 14067'nin çerçevelenmesi, sürdürülebilirlik hedefine yönelik faaliyetler ve organizasyonlara hem büyüme hem de ekonomik açıdan avantajlar sunmaktadır.

GHG protokolü : ürün yaşam döngüsü hesaplama ve raporlama standardı

Şirketlerin ve diğer organizasyonların belirli bir ürünle ilişkili sera gazı (GHG) emisyonlarını ve uzaklaştırmalarını nicel olarak belirlemeleri ve kamuya raporlamaları için gereklilikler için rehberlik sağlamaktadır. Bu standardın temel amacı, şirketlerin tasarladıkları, ürettikleri, sattıkları, satın aldıkları veya kullandıkları ürünlerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltmak için bilinçli seçimler yapmalarına yardımcı olacak genel bir çerçeve sunmaktır. Standart amacı ürünlerin ham madde çıkarımından üretim, nakliye, depolama, kullanım ve nihai bertarafına kadar tüm yaşam döngüsü boyunca oluşan sera gazı emisyonlarını ölçmeye olanak tanımaktadır. Bu kapsamlı yaklaşım, şirketlerin ürün tasarımını iyileştirmelerine, verimliliği artırmalarına, maliyetleri düşürmelerine ve riskleri azaltmalarına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, müşterilerin çevresel taleplerine yanıt vermeyi kolaylaştırarak ürünlerin çevresel iyileştirilmesinde de net bir şekilde fayda sağlamaktadır (WRI & WBCSD, 2011).

PAS 2050

PAS 2050, hizmetlerin ve ürünlerin yaşam döngüsü süresince karbon ayak izi miktarlarının analiz edilmesi için gereksinimleri belirleyen bir Kamuya Açık Şartname'dir. İlk olarak 2008 yılında İngiliz Standartları Enstitüsü (BSI) tarafından yayınlanmış olup, 2011 yılında güncellenmiştir. Bu standart, ürünlerin "beşikten

kapıya" ve "beşikten mezara" yaklaşımlarıyla değerlendirilmesini öngörerek, ürün ve hizmetlerin çevresel etkilerinin bütüncül bir biçimde belirlenmesini amaçlamaktadır.

PAS 2050, sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında yaşam döngüsü analiziyle ilgili ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarını referans almaktadır. Ayrıca, hesaplamalarda uygunluk, tamlık, tutarlılık, doğruluk ve şeffaflık ilkelerine dayanmaktadır. Standart, sera gazı emisyonlarının uzaklaştırmaları, küresel ısınma potansiyeli (GWP) değerleri, arazi kullanımı, fosil ve biyojenik kaynaklardan dolayı oluşan emisyonlar ve karbon depolama etkilerinin analizine ilişkin bilgiler içermektedir (British Standards Institution, 2011).

2.3.3.3 Ürün karbon ayak izi yazılımları ve veri kaynakları

Ürün karbon ayak izi (ÜKA) hesaplaması, çok sayıda süreç girdisi ve çıktısının detaylı şekilde modellenmesini gerektirmektedir. Bu süreçte, sera gazı emisyonlarının doğru hesaplanabilmesi için yaşam döngüsü envanteri ve yaşam döngüsü etki değerlendirmesi adımlarında büyük miktarda veri işlenmektedir. Bu sebeple, YDA (LCA) temelli yazılımlar kullanmak bilimsel doğruluk, izlenebilirlik ve tekrar üretilebilirlik açısından kritik önem taşımaktadır (Finkbeiner ve diğ, 2010). Ayrıca, ISO 14067:2018 standardı doğrudan yazılım kullanımını zorunlu tutmamaktadır fakat karbon ayak izi hesaplamalarının yaşam döngüsü değerlendirmesi ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmesini talep etmektedir. Bu standart, doğru emisyon faktörlerinin, küresel ısınma potansiyeli katsayılarının (GWP100, IPCC) ve sistem sınırlarının uygulanmasını gerektirmektedir. Bu tür analizlerin manuel olarak yapılması, hataya açık olmakla birlikte uluslararası geçerlilik açısından da yetersiz olabilmektedir (ISO, 2018).

Sonuç olarak, ürün karbon ayak izi hesaplamalarında yazılım kullanımı; standardize edilmiş envanter veritabanlarına (Ecoinvent, GABI, ELCD vb. küresel LCI veritabanları), güncel etki değerlendirme yöntemlerine (IPCC, ReCiPe, CML vb.), sistematik modelleme yeteneğine, uluslararası kabul gören metodolojilere uyum sağlaması açısından tercih edilmektedir. Ürün karbon ayak izi hesaplamasında kullanılan yazılımlar arasında; SimaPro, OpenLCA, GaBi Software, Umberto LCA+, One Click LCA, Brightway2, EcoChain Mobius, CarbonScope, GREET (Argonne) sayılabilmektedir (GreenDelta, 2023). Yaygın kullanılan YDA yazılımları ve temel özellikleri Çizelge 2.2‘de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2: Yaygın kullanılan YDA (LCA) yazılımları ve temel özellikleri.

Yazılım Adı	Lisans Türü	Veritabanları	Öne Çıkan Özellikler	Odak Alanı/ Kullanım Yeri
OpenLCA	Açık kaynak	Ecoinvent, Agribalyse, Exiobase	Modüler yapı, çoklu metodoloji desteği, açık erişimli modeller	Genel amaçlı, akademik ve kurumsal
SimaPro	Ticari (PRé)	Ecoinvent, Industry DB	Detaylı süreç modelleme, LCIA uyumu, EPD üretimi	Endüstri, danışmanlık, akademi
Gabi Software	Ticari (Sphera)	Gabi DB, Ecoinvent, ELCD	Endüstriyel veri çeşitliliği, kapsamlı süreç zinciri kurulumu	Otomotiv, enerji, inşaat, elektronik
Umberto LCA+	Ticari	Ecoinvent, Gabi	Enerji ve madde akış görselleştirmesi, proses şemaları	Enerji yönetimi, üretim sektörü
Brightway2	Açık kaynak (Python)	Ecoinvent, özel veri	Kod tabanlı analiz esnekliği, gelişmiş senaryo yetenekleri	Akademik, araştırma odaklı projeler
One Click LCA	Ticari (web tabanlı)	Ecoinvent, EN15804, ILCD	Bina ve altyapı LCA'sı, LEED/BREEAM gibi sertifikalarla bütünleşmiş	İnşaat, mimarlık, çevresel beyan dokümanı (EPD)
EcoChain Mobius	Ticari (bulut tabanlı)	Özel veri, Ecoinvent	Kurumsal bazda çevresel KPI izleme, ürün-portföy değerlendirme	Sürdürülebilirlik yönetişimi
GREET	Açık kaynak (DOE/USA)	GREET veritabanı	Yakıt döngüsü emisyonları, enerji ve ulaşım sistemleri modellemesi	Ulaşım sektörü, biyoyakıtlar, enerji sistemleri
CarbonScope	Ticari (CleanMetrics)	CleanMetrics DB	Web tabanlı hızlı karbon ayak izi aracı, tedarik zinciri odaklı	KOBİ'ler, ürün karbon ayak izi, temel LCA

Bazı YDA yazılımlarında bu veriler hazır olarak temin edilebilmekte ve günümüzde farklı veri tabanlarına sahip çok sayıda YDA yazılımı bulunmaktadır. Çizelge 2.2'de bahsedilen yazılımları birbirinden ayıran en büyük özellikler; kullanıcı ara yüzleri, etki kategorileri ve veri tabanlarındaki farklılıklardır (İşler, 2012).

Yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarının doğruluğu ve bilimsel geçerliliği, yalnızca kullanılan yazılım aracılığıyla değil, aynı zamanda kullanılan verilerin güvenirliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, yaşam döngüsü değerlendirmesi analizlerinde yaygın olarak kullanılan veri tabanları (Life Cycle Inventory – LCI), standartlara uygun, kapsamlı ve güncel veri setleri sunmalıdır. YDA yazılımlarında yer alan ve kabul görmüş başlıca veri tabanları arasında; Ecoinvent, Agri-footprint, ELCD (European Life Cycle Database), Gabi Database, IPCC emisyon faktörleri (GWP değerleri), DEFRA, EPD verileri sayılmaktadır.

Ecoinvent, yaşam döngüsü envanteri verileri konusunda dünya çapında yaygın kullanılan veri tabanlarındandır. İsviçre merkezli Ecoinvent Derneği tarafından geliştirilen bu veritabanı, enerji üretimi, metal ve plastik işleme, kimya sanayi, taşıma, atık yönetimi ve tarım gibi çok çeşitli sektörlerde 18.000'den fazla süreç verisi sunmaktadır. Ecoinvent verileri, ISO 14040 ve ISO 14044 standartları ile uyumlu olacak şekilde yapılandırılmıştır ve hem global hem de bölgesel düzeyde veri katmanları içermektedir (Ecoinvent Association, 2023). SimaPro, OpenLCA ve Gabi gibi YDA (LCA) yazılımlarıyla entegre çalışmaktadır.

Agri-Footprint veri tabanı, tarım ve gıda sektörlerine özel olarak geliştirilmiş yaşam döngüsü verileri sunmaktadır. Blonk Consultants tarafından geliştirilen bu veri seti, bitkisel ve hayvansal üretim, gübre kullanımı, yem üretimi ve gıda işleme gibi süreçleri kapsamaktadır. Avrupa Birliği'nin tarım politikaları ve çevresel raporlama gerekliliklerine uyumlu şekilde güncellenen veri yapısı sayesinde, özellikle gıda ürünlerinin karbon ayak izi ve diğer çevresel etkilerinin değerlendirilmesinde tercih edilmektedir. (Blonk Consultants, 2023).

GaBi veri tabanı, Almanya merkezli Sphera şirketi tarafından geliştirilmiş olup özellikle sanayi sektörlerine yönelik ayrıntılı süreç verileri sunmaktadır. Otomotiv, elektronik, kimya, inşaat ve enerji sektörleri gibi alanlarda yüksek çözünürlüklü veri setleri barındıran Gabi, aynı zamanda Ecoinvent gibi uluslararası veri tabanlarıyla da entegre kullanılabilmektedir. Gabi verileri, Avrupa Birliği ve ISO standartlarına uyumlu olup, özellikle endüstriyel yaşam döngüsü analizlerinde tercih edilmektedir (Sphera Solutions, 2023).

Avrupa Komisyonu'na bağlı Ortak Araştırma Merkezi (Joint Research Centre – JRC) tarafından geliştirilen ELCD veri tabanı, Avrupa içi üretim süreçlerine yönelik standart

yaşam döngüsü verilerini içermektedir. ELCD, özellikle Avrupa Birliği mevzuatlarına uygun ürün çevresel beyanlarının (EPD) hazırlanmasında, bölgesel temsiliyeti yüksek veriler sunarak önemli bir kaynak oluşturmaktadır (European Commission – JRC, 2010).

Bu veri tabanları, LCA hesaplamalarında kullanılan yazılımlarla entegre şekilde çalışmakta olup, karbon ayak izi hesaplamalarının uluslararası standartlara uygun şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Hesaplamaların bilimsel doğruluğu, karşılaştırılabilirliği ve üçüncü taraf denetimine açık olması açısından veri kaynağının güvenilirliği kritik öneme sahiptir.

2.4 İklim Değişikliği Politikaları: Düzenlemeleri

Küresel ısınma ve iklim değişikliği, insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının artışıyla tetiklenen, ekosistemler, toplumlar ve ekonomiler üzerinde etkiler oluşturan küresel bir kriz şeklinde ifade edilmektedir. Sanayi devriminden bu yana fosil yakıt tüketiminin, ormansızlaşmanın ve yoğun sanayi faaliyetlerinin artması, atmosferde biriken sera gazlarının küresel sıcaklıkları yükseltmesine neden olmuştur. Bu durum, biyolojik çeşitlilik kaybı, deniz seviyelerinin yükselmesi, gıda ve su güvenliğinde azalma, aşırı hava olaylarının sıklaşması gibi ciddi sonuçlar doğurmuştur (IPCC, 2021) (UNEP, 2019).

İklim değişikliği, uluslararası toplumun ortak bir sorunu olarak, yıllar içerisinde birçok konferans, anlaşma ve protokol ile ele alınmıştır. Çizelge 2.3‘de bu etkinliklerin önemi ve sonuçları ele alınmış ve özetlenmiştir.

Çizelge 2.3: İklim değişikliğine ilişkin etkinliklerin önemi ve sonuçları.

Yıl	Etkinlik	Önemi	Sonuçlar
1972	Stockholm Konferansı	Çevre sorunları ilk kez uluslararası bir konferansta ele alınmış ve sürdürebilir kalkınma kavramlarının temelleri atılmıştır.	Çevre sorunlarının ekonomik kalkınmayla birlikte ele alınması gerektiği vurgulanmıştır.
1988	IPCC'nin Kuruluşu	Bilimsel araştırmaların uluslararası düzeyde koordine edilmesi ve hükümetlere iklim değişikliğiyle mücadele konusunda rehberlik edilmesi amacıyla kurulmuştur.	IPCC'nin raporları, iklim değişikliğinin insan kaynaklı olduğuna dair bilimsel kanıtlar sunmuş ve uluslararası müzakerelerin temelini oluşturmuştur.
1992	UNFCCC	İklim değişikliğiyle mücadelede ilk küresel yasal çerçevedir.	1994'te yürülüğe girerek küresel eylemin temellerini atmıştır (UNFCCC, 1992).
1997	Kyoto Protokolü	UNFCCC kapsamında bağlayıcı sera gazı emisyon azaltım hedeflerini içeren ilk uluslararası anlaşmadır.	Gelişmiş ülkelerle gelişmekte olan ülkeler arasında yükümlülüklerin farklılaştırıldığı bir rejim oluşturulmuştur.
2015	Paris İklim Anlaşması (COP21)	Kyoto Protokolü'nden farklı olarak, tüm ülkelerin sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik ulusal katkı beyanları (NDCs) sunmalarını zorunlu kılan bağlayıcı bir anlaşmadır.	Gelişmekte olan ülkelerin de emisyon azaltım taahhütlerinde bulunması sağlanmış ve gelişmiş ülkelerden finansal destek mekanizmaları taahhüt edilmiştir (UNFCCC, 2015).
2019	Avrupa Yeşil Mutabakatı	Avrupa Birliği'nin 2050 yılına dek karbon salımını sıfıra indirmeyi amaçlayan yol haritasını ortaya koyan stratejik dokümandır.	Avrupa Yeşil Mutabakatı, diğer bölgeler için bir model oluşturmuş ve iklim değişikliğiyle mücadelede bölgesel bir liderlik örneği sergilemiştir.
2021	Glasgow İklim Zirvesi (COP26)	Paris Anlaşması'nın uygulanabilirliğini sağlamak için bir yol haritası sunmayı amaçlamıştır.	Kömür kullanımının azaltılması çağrısında bulunulmuştur. Metan emisyonlarının azaltılmasına yönelik küresel bir taahhüt verilmiştir. 1,5 °C hedefinin altını çizen net sıfır taahhütleri güçlendirilmiştir.

Bu bağlamda, iklim değişikliğinin sınır aşan ve küresel ölçekte bir tehdit olması, sadece bireysel veya ulusal düzeyde değil, uluslararası düzeyde eşgüdümlü politikalar geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Avrupa Yeşil Mutabakatı, Net Sıfır Emisyon Hedefi Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) ve Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) gibi politikalar, bu küresel tehditlere karşı alınan önlemlerin birer yansımasıdır.

2.4.1 Avrupa yeşil mutabakatı

Avrupa Komisyonu, 11 Aralık 2019 tarihinde orijinal adı "European Green Deal" olan ve Türkçeye "Avrupa Yeşil Düzen Belgesi" ya da "Avrupa Yeşil Mutabakatı" olarak çevrilen belgeyi yayımlamıştır.

Avrupa Yeşil Mutabakatı (AYM), Avrupa Birliği'nin 2050 yılına kadar karbon salımını dengeleyerek iklim nötrlüğünü sağlamayı amaçlayarak, sürdürülebilir ekonomiye geçişi desteklemek ve iklim değişikliğini önlemek için kapsamlı bir politika çerçevesi sunan bir stratejidir (European Commission, 2019a).

Avrupa Yeşil Mutabakatı ile; Avrupa Birliği, 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını 1990 seviyelerine göre en az %55 oranında azaltılmayı 2050 yılına kadar sera gazı emisyonlarını sıfıra indirerek iklim nötr bir kıta olmayı hedeflemektedir. Ayrıca AB'nin ekonomik büyümesini kaynak kullanımından ayırarak sürdürülebilir bir ekonomi oluşturmayı amaçlayan yeni bir büyüme stratejisidir. Bu strateji, enerji, ulaşım, sanayi, tarım ve diğer sektörlerde kapsamlı dönüşümler öngörmektedir. Özellikle enerji sektöründe, Avrupa Birliği, sera gazı emisyonlarının %75'inden fazlasını oluşturan enerji sisteminin karbon salımını azaltmayı hedeflemektedir. Ulaştırma sektöründe ise, 2050 yılına kadar emisyonların %90 oranında azaltılması planlanmaktadır. Bu hedeflere ulaşmak için AB, 10 yıllık dönemde yaklaşık 1 trilyon avro tutarında sürdürülebilir yatırım yapmayı planlamaktadır (Avrupa Birliği Başkanlığı, 2024).

2.4.2 Net sıfır emisyon hedefi

Net sıfır emisyon hedefi, bilimsel temellerini 2018 yılında yayımlanan Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) "1,5 °C Küresel Isınma Özel Raporu"ndan almıştır. Bu rapor, küresel ısınmayı sanayi öncesindeki seviyelerin 1,5 °C üzerinde sınırlamanın, iklim etkilerini önlemede kritik olduğunu ortaya koymuştur (ISO, 2018). Bu hedefin uluslararası politika düzeyine taşınması, 2015 Paris İklim

Anlaşması ile mümkün olmuştur. Anlaşmanın 4. Maddesi, taraf ülkelerin, sera gazı emisyonlarını kademeli olarak azaltarak net sıfıra ulaşmalarını taahhüt etmesini şart koşmaktadır (IPCC, 2018).

Raporda, 2050 yılına kadar net sıfır emisyona ulaşılmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Sera gazı emisyonlarının tamamen ortadan kaldırılması yerine, salınım ve emisyonların doğal veya teknolojik yollarla dengelenmesini amaçlamakta, böylece karbon nötrlüğü sağlamaktadır (United Nations, 2021).

2.4.3 Emisyon ticaret sistemi (ETS)

Emiyon Ticaret Sistemi (ETS)'nin küresel düzeyde benimsenmesi, 1997 Kyoto Protokolü ile ivme kazanmıştır. Kyoto Protokolü'nün Ek B'sinde yer alan gelişmiş ülkeler, sera gazı emisyonlarını sınırlamak için piyasa temelli mekanizmalar kullanmayı taahhüt etmiştir. Bunun sonucunda Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi (EU ETS) 2005 yılında faaliyete geçmiştir ve günümüzde en büyük ETS sistemi olarak kabul edilmektedir (European Commission – JRC, 2023). Üç aşamada genişletilen sistem, 2030 yılına kadar emisyonları %55 oranında azaltmayı hedeflemektedir (Ellerman ve diğ, 2008).

Emisyon Ticaret Sistemi (ETS), sera gazı emisyonlarını sınırlamak ve azaltmak için piyasa tabanlı bir mekanizmadır. Bu sistem, hükümetlerin belirli bir dönemde toplam emisyon miktarını sınırlandırdığı (tavan ya da cap) ve bu sınır dahilinde emisyon haklarını ticarete açtığı bir düzenlemeye dayanmaktadır. Avrupa Emisyon Ticaret Sistemi (EU ETS) Avrupa'nın enerji, sanayi ve havacılık sektörlerinde uygulanmaktadır. Kurumların emisyon sınırları içerisinde kalmalarını ve fazla karbon kotası alım-satımı yapmalarını teşvik etmektedir (UNFCCC, 1997).

2.4.4 Sınırda karbon düzenleme mekanizması (SKDM)

Türkçeye "Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM)" olarak çevrilen orijinal adıyla Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), Avrupa Birliği'nin 2019 yılında başlattığı Avrupa Yeşil Mutabakat çerçevesinde şekillenmiştir. AB, 2050 yılına kadar karbon nötrlüğü hedeflerken, daha sıkı karbon fiyatlandırma ve düzenleme politikalarının, emisyon yoğun üretim faaliyetlerinin AB dışına taşınmasına (karbon kaçağı) neden olabileceğini öngörmüştür (European Commission, 2019b). Karbon kaçağı riski, özellikle enerji yoğun sektörlerde (çelik, çimento,

alüminyum gibi) kritik bir sorun olarak görülmüştür. Bu riskin azaltılması ve AB sanayisinin rekabetçiliğinin korunması amacıyla SKDM, Temmuz 2021'de Avrupa Komisyonu tarafından önerilmiş ve 2023 itibarıyla kademeli olarak yürürlüğe girmiştir. (Cosbey ve diğ, 2021).

Karbon yoğunluğu yüksek ürünlerin ithalatına ek maliyet getirerek, çevreye zarar veren üretim modellerini caydırmayı ve düşük karbonlu üretim yöntemlerini teşvik etmeyi hedeflemektedir (European Commission, 2021).

SKDM'nin işleyiş mekanizmasında ilk aşama olarak SKDM kapsamındaki ürünlerin ithalatında, üretim sırasında ortaya çıkan karbon emisyonları hesaplanmaktadır. Sonraki aşamada ise ithalatçılar, Avrupa ETS fiyatlarına dayalı olarak karbon sertifikalarını satın almaktadır. Eğer ithalatçı ülke, AB ETS'ye benzer bir karbon fiyatlandırma sistemi uyguluyorsa, bu fiyatlar SKDM sertifika maliyetinden düşülmektedir (WTO, 2022).

Bu düzenlemelerin temel amacı, küresel sıcaklık artışını 1,5 °C ile sınırlandırmak, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak ve karbon yoğun üretim modellerinden uzaklaşarak yeşil dönüşümü hızlandırmaktır. Ayrıca, ekonomik rekabeti sürdürülebilirlik standartları çerçevesinde eşitleyerek, gelişmekte olan ülkelerle adil bir iş birliği zeminini desteklemek gibi sosyal ve ekonomik faydalar da sunmaktadır.

Bu politikaların oluşturulmasındaki ana neden, küresel düzeyde ortak bir sorun olan iklim değişikliğiyle mücadelede, ülkeler arasında sorumluluk paylaşımı ve etkili çözüm mekanizmalarının geliştirilmesinin hayati önem taşımasıdır. Özellikle "Ortak Ancak Farklılaştırılmış Sorumluluklar" ilkesi doğrultusunda, farklı ekonomik kapasiteleri olan ülkeler arasında adil ve etkin bir eylem planı oluşturulması sağlanmıştır (UNFCCC, 1992).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), ürünlerin, hizmetlerin veya süreçlerin yaşam döngüleri boyunca çevresel etkilerinin sistematik olarak değerlendirilmesini sağlayan bir araçtır. ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarında çerçevesi çizilen bu yaklaşım, karar destek sistemlerinde, sürdürülebilirlik analizlerinde ve ürün tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (ISO, 2006a) (ISO, 2006b). Ayrıca sera gazı emisyonlarının ürün düzeyinde hesaplanmasında ISO 14067:2018 standardı yol gösterici niteliktedir.

ISO 14040 standardı uyarınca YDA (LCA) çalışmaları dört ana aşamadan oluşur:

1. Amaç ve kapsamın belirlenmesi
2. Yaşam döngüsü envanteri (Life cycle inventory – LCI)
3. Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (Life cycle impact assessment – LCIA)
4. Yorumlama

Bu dört aşama birbiriyle bağlantılı olup yinelemeli bir süreç izlemektedir. Analizin bütünlüğü ve doğruluğu, her aşamanın dikkatli bir şekilde uygulanmasına bağlıdır (Finnveden ve diğ, 2009).

YDA (LCA) modellemeleri, ISO standartlarına uyumlu yazılımlar aracılığıyla yürütülmektedir. Veri işleme, sistem sınırlarının tanımlanması, tahsisat yöntemlerinin uygulanması ve etki değerlendirmesi gibi süreçlerin yönetilmesini kolaylaştırmaktadır.

Bu çalışma kapsamında yaşam döngüsü analizi hesaplaması Simapro 9.6.0.1 yazılımı kullanılarak yapılmış ve Ecoinvent 3.10 veri tabanı desteği sağlanmıştır. Etki kategorisi IPCC 2021 ve CML-IA Baseline metodolojisine göre hesaplanmıştır.

3.1 Amaç ve Kapsamın Belirlenmesi

YDA sürecinin başlangıcını oluşturan amaç ve kapsam belirleme aşaması, çalışmanın neden yapıldığını, neyi hedeflediğini ve elde edilecek sonuçların hangi bağlamda

kullanılacağını açıklamaktadır. Bu kapsamda, fonksiyonel birim belirlenmekte ve çalışmanın sınırları (sistem sınırları) çizilmektedir. Ayrıca veri toplama stratejileri, kabul edilen varsayımlar, metodolojik tercihler ve potansiyel belirsizlikler bu aşamada ortaya konmaktadır. Bu adım, YDA çalışmasının temel yönlendirici çerçevesini oluşturmaktadır (ISO, 2006a).

3.1.1 YDA çalışmasının amacı

Bir ürün karbon ayak izi çalışması yürütmenin genel amacı, bir ürünün tüm önemli sera gaz salımlarını ve uzaklaştırmalarını ürünün yaşam döngüsü veya seçilen süreçler boyunca hesaplayarak, durdurma kriteri doğrultusunda CO_{2e} olarak ifade edilen küresel ısınmaya potansiyel katkısını hesaplamaktır.

3.1.2 YDA çalışmasının kapsamı

Analiz sürecinin sınırlarını belirleyen ve çalışmanın amacına uygun olarak hangi unsurların değerlendirme içine alınacağını sistematik biçimde tanımlayan aşamadır. ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına göre LCA'nın temel adımlarından biri olan kapsam belirleme süreci, çalışmanın metodolojik temelini oluşturarak elde edilecek sonuçların geçerliliği, karşılaştırılabilirliği ve uygulanabilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu aşamada; sistem sınırları, fonksiyonel birim, yaşam döngüsü aşamaları, veri kalitesi gereksinimleri, varsayımlar, kısıtlamalar ve seçilecek etki kategorileri gibi unsurlar detaylı şekilde tanımlanır.

3.1.3 Fonksiyonel birim

Fonksiyonel birim, YDA (LCA) çalışmasında tüm girdilerin ve çıktılarının dayandırıldığı, ürün veya hizmetin işlevini niceliksel olarak tanımlayan referans birimdir. ISO 14044 ve ISO 14067 standartlarında fonksiyonel birim; ölçülebilir, açık biçimde tanımlanmış, işlev odaklı, kullanım süresini içeren şekilde belirlenmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Fonksiyonel birim, bir ürün sisteminin referans birim olarak kullanılması için nicelleştirilmiş performansı olarak tanımlanmaktadır. Örneğin, bir ambalaj ürünü için “1 litre sıvıyı 1 hafta boyunca muhafaza edebilen ambalaj” şeklinde işlevsel bir tanımlama yapılabilmektedir (Guinée ve diğ, 2002).

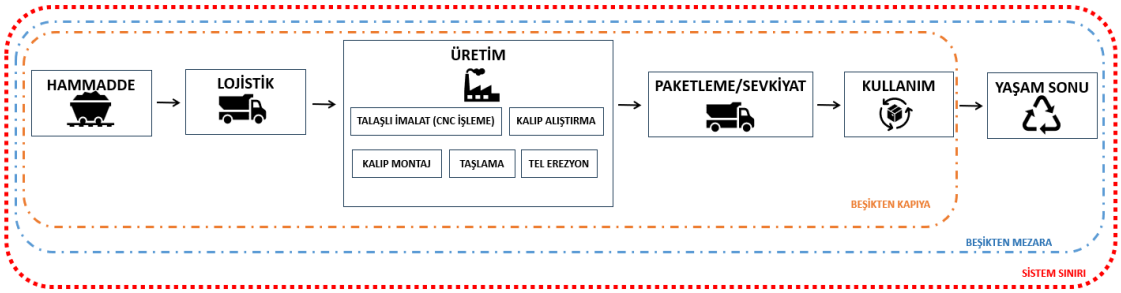
3.1.4 Sistem Sınırları

Sistem sınırları, analiz kapsamında değerlendirilecek tüm süreçleri ve aşamaları tanımlamaktadır ve bu sınırlar; ham madde çıkarımı, taşıma, üretim, kullanım, bertaraf/geri dönüşüm gibi ürün yaşam döngüsünün tüm aşamalarını (cradle-to-grave) kapsayabilmektedir. Ya da sadece üretim öncesine kadar olan kısmı (cradle-to-gate), veya belli bir süreç (gate-to-gate) gibi daha dar kapsamda belirlenebilmektedir. ISO 14044 standardı, sistem sınırlarının çalışmanın amacı, kapsamı, veri uygunluğu ve karşılaştırma kriterlerine göre şeffaf biçimde tanımlanmasını öngörmektedir.

ISO 14067 standardına göre, analiz edilmesi gereken yaşam döngüsü aşamaları ve sistem sınırları şu şekilde belirlenmiştir.

- Beşikten mezara: ürünün tüm yaşam süresi boyunca oluşan emisyonlar ve uzaklaştırma işlemlerini kapsamaktadır.
- Beşikten kapıya: ürünün organizasyondan çıktığı noktaya kadar yer alan süreçte meydana gelen emisyonlar ve uzaklaştırmaları içermektedir.
- Kapıdan kapıya: tedarik zinciri boyunca ortaya çıkan emisyonlar ve uzaklaştırmalar bu kapsamda değerlendirilmektedir.
- Kısmi CFP: sadece belirli aşamalardan kaynaklanan emisyonlar ve uzaklaştırmaları kapsamaktadır.

Bu yaşam döngüsü analizi çalışması, ISO 14040-44 standardına uygun yapılmış olup, sistem sınırı Şekil 3.1'de gösterildiği gibi beşikten mezara (cradle-to-grave) yaklaşımıyla değerlendirilmiştir.



Şekil 3.1: Beşikten mezara sistem sınırı.

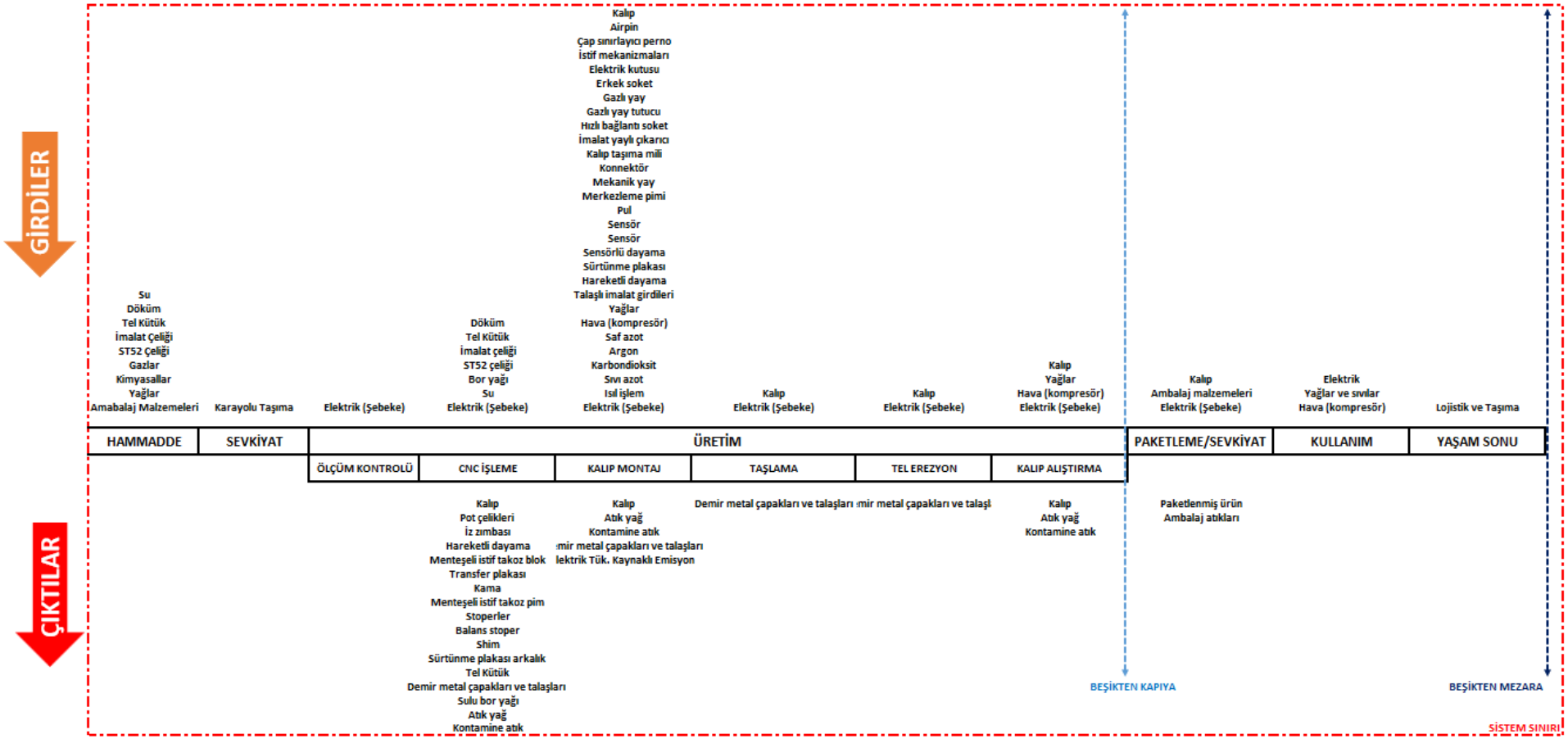
Bu yaklaşım kapsamında, ürünlerin hammadde çıkarımı, tedarik, üretim süreçleri, kullanım aşamaları ve bertaraf süreçleri ele alınmıştır ve sistem sınırları, ürünün yaşam

döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla şu aşamaları kapsamaktadır:

- Hammadde temini ve nakliyesi: üretimde kullanılan tüm ana ve yardımcı girdilerin doğal kaynaklardan elde edilmesi ve üretim tesisine ulaştırılması süreçleri,
- Enerji ve su tüketimi: üretim aşamasında kullanılan enerji ve su miktarlarının değerlendirilmesi,
- Üretim faaliyetleri: ürünün ortaya çıkmasında rol oynayan makine kullanımı, montaj, işleme gibi temel üretim adımları,
- Atıkların yönetimi: üretim sürecinde oluşan atıkların bertarafı veya geri dönüşüme kazandırılmasıyla ilgili işlemleri,
- Yan ürünler ve destekleyici malzemeler: asıl ürün dışında ortaya çıkan yan çıktılar ile süreçte kullanılan destekleyici malzemelerin çevresel etkilerini,
- Lojistik ve dağıtım: nihai ürünlerin sevkiyatında ortaya çıkan enerji kullanımı ve emisyonların analizini,
- Kullanım süreci: ürünün kullanım ömrü boyunca yol açtığı enerji tüketimi ve sera gazı salımlarını,
- Ömrünü tamamlamış ürünlerin bertarafı: kullanım ömrü sona eren ürünlerin geri dönüşümü, bertarafı ve atık yönetimi süreçlerini.

Bu kapsamda sistem sınırı, ürünün tüm yaşam döngüsünü göz önünde bulundurarak çevresel etkilerin detaylı bir şekilde analiz edilmesini ve şeffaf bir ürün karbon ayak izi değerlendirmesinin yapılmasını hedeflemiştir.

Şekil 3.2'de kalıp üretimine ait süreç akışı belirtilmiş tüm girdiler ve çıktılar sistem sınırları dahilinde verilmiştir.



Şekil 3.2: Süreç akışı ve sistem sınırı.

3.1.5 Kesme kuralları

Genel olarak, analiz edilen sisteme atfedilebilen tüm süreçler ve akışlar dahil edilmektedir. Belirli bir birim sürecin karbon ayak izi için münferit malzeme veya enerji akışlarının önemsiz olduğu tespit edilirse, bunlar hariç tutulabilmekte ve hariç tutulan veriler olarak raporlanmaktadır. Tutarlı durdurma kriterleri, amaç ve kapsam tanımlama aşamasında tanımlanmaktadır. Seçilen durdurma kriterlerinin çalışmanın sonucu üzerindeki etkisi de değerlendirilmektedir ve çalışma raporunda açıklanmaktadır. Bu çalışma kapsamında sistem sınırı dışında bırakılan unsurlar aşağıdaki gibidir.

- Aydınlatma ve ısınma faaliyetleri: Genel üretim ortamının enerji tüketimi olmakla birlikte, doğrudan ürünle ilişkilendirilemediğinden hariç tutulmuştur.
- Personel faaliyetleri: Çalışanların ulaşımı ve diğer bireysel aktiviteler hesaplamaya dahil edilmemiştir.
- Kesici uçlar: Etkisinin düşük olması nedeniyle hariç tutulmuştur.
- Hava: Etkisinin düşük olması nedeniyle hariç tutulmuştur.
- Kalıp alıştırma sürecinde kullanılan sac miktarı tahsisat yapılamadığı için hesaplamaya dahil edilmemiştir.

3.2 Yaşam Döngüsü Envanteri (LCI)

Bu aşama, ürün ya da süreçle ilişkili çevresel girdilerin ve çıktılarının nicel olarak belirlenmesini kapsamaktadır. Hammadde ve enerji tüketimi, hava, su ve toprak ortamlarına olan emisyonlar, yan ürünler ve atık akımları sistematik biçimde envantere dahil edilmektedir. Toplanan veriler birincil (saha verisi) veya ikincil (veritabanları, literatür) kaynaklardan elde edilebilmektedir. Yaşam döngüsü envanteri, çevresel etkilerin temel veri tabanını oluşturmaktadır (ISO, 2006a).

3.2.1 Veri toplama ve tahsisat

Çalışmayı üstlenen kuruluşun mali veya işletme kontrolüne sahip olduğu süreçler için tesise özgü veriler toplanmaktadır ve veriler, toplandıkları süreçleri temsil etmektedir. YDA (LCA) çalışmalarında kullanılan veriler birincil (doğrudan ölçüm yoluyla elde edilen) ve ikincil (veri tabanları, literatür, resmi raporlar) olmak üzere ikiye

ayrılmaktadır. Çalışma, mevcut en kaliteli verileri kullanarak sapma ve belirsizliği mümkün olduğu kadar azaltan verileri kullanmaktadır. Veri kalitesi hem nicel hem de nitel yönlerle karakterize edilmektedir. Veri kalitesi; ISO 14044'te tanımlanan zaman uygunluğu, coğrafi uygunluk, teknolojik uygunluk, eksiksizlik, tutarlılık ve doğruluk gibi kriterler doğrultusunda değerlendirilmektedir.

Verilerin temininde yaygın olarak kullanılan veri tabanları arasında Ecoinvent, GaBi, ELCD gibi kaynaklar yer almaktadır. Ayrıca ISO 14067, karbon ayak izi hesaplamalarında spesifik veri tercihini önermektedir.

Bu çalışma kapsamında sunulan 15.580,00 kg net 15.860,00 kg brüt "OP-20" kodlu kalıbın, beşikten mezara sistem sınırları doğrultusunda çevresel etkileri, IPCC GWP 100 ve CML-IA Baseline metodolojisine uygun olarak SimaPro 9.6.0.1 yazılımı ve Ecoinvent 3.10 veri tabanı kullanılarak değerlendirilmiştir.

Yaşam döngüsü analizi (LCA) çalışmasında, birden fazla ürün veya sürecin yer aldığı durumlarda, çevresel girdilerin ve çıktılarının nasıl paylaştırılacağı belirli kurallar çerçevesinde düzenlenmiştir ve çevresel girdilerin ve çıktıların ürünlere nasıl dağıtılacağı tahsisat yoluyla belirlenmektedir. ISO 14044'e göre öncelikle tahsisattan kaçınma tercih edilmelidir eğer bu mümkün değilse fiziksel ilişkilere dayalı (örneğin kütle, enerji içeriği) ya da ekonomik değer temelli tahsisat uygulanmalıdır. En sık kullanılan tahsisat yöntemleri: kütle tahsisatı, enerji içeriği tahsisatı, ekonomik tahsisat, prosessel ayrıştırma veya sistem genişletme yöntemleridir.

Bu çalışmada, üretim süreçlerinde birden fazla ürün elde edilmesi sebebiyle, veri envanterinin doğru şekilde ayrıştırılabilmesi için tahsisat uygulanmıştır. Tahsis yöntemi olarak kütle temelli tahsisat yaklaşımı benimsenmiştir. 2023 yılına ait üretim verileri esas alınarak gerçekleştirilen bu çalışmada, tahsis işlemi aşağıdaki adımlar doğrultusunda yürütülmüştür:

- Girdi ve çıktıların belirlenmesi: Üretim aşamalarından elde edilen her bir ürün ve yan ürünün kütlesi ölçülmüştür.
- Oranların hesaplanması: Ürün ve yan ürünlerin, toplam üretim içindeki kütle oranları tespit edilmiştir.
- Çevresel yüklerin dağıtımı: Hammadde tüketimi, enerji kullanımı, emisyonlar ve su tüketimi gibi çevresel etkiler, hesaplanan kütle oranlarına göre ilgili ürün ve yan ürünlere paylaştırılmıştır.

Bu yaklaşım sayesinde, çoklu çıktıların bulunduğu üretim sistemlerinde, çevresel etkilerin daha adil ve sistematik biçimde bölüştürülmesi sağlanmıştır.

Fonksiyonel birim üretimi için tüm girdiler ve çıktılar belirlendikten sonra standart mazlemeler markalarına ve üretici kodlarına bakılarak katologlarından malzeme içerik bilgisine bakılmış olup kg bilgisi de belirlenmiştir. Diğer girdi ve çıktılar ürün reçetesi için belirlendiği şekilde alınmıştır ve üretici kalite sertfikilarına bakılmıştır. Kontamine atık, yağ, gaz ve su gibi girdiler için birim miktar üzerinden örnek hesaplama yapılmıştır. YDA çalışmasına girdi teşkil eden veriler aşağıda yer alan Çizelge 3.1'de yer almaktadır.

Çizelge 3.1: YDA çalışması proses bazlı veri miktarı girdileri.

Proses	Malzeme türü	Veri miktarı	Birim
Ölçüm Kontrolü	Elektrik	0,30	kWh
Talaşlı İmalat (CNC/Torna)	Kalıp çelik girdileri	16.552,00	kg
	Elektrik	11.118,00	kWh
	Yağ	0,15	kg
	Su	2,85	kg
Kalıp Montaj	Kalıp	16.171,00	kg
	Gaz	1,07	kg
	Elektrik	3.610,00	kWh
Taşlama	Kalıp	16.026,00	kg
	Elektrik	210,00	kWh
Tel Erezyon	Kalıp	15.866,00	kg
	Elektrik	360,00	kWh
Kalıp Alıştırm	Kalıp	15.850,00	kg
	Elektrik	17.150,00	kwH
Paketleme	Kalıp	15.850,00	kg
	Ambalaj	10,00	kg
	Elektrik	80,00	kWh

3.2.2 Veri kalitesi ve hassasiyet analizi

ISO 14040-44 standartları kapsamına uygun şekilde hazırlanan yaşam döngüsü analizi çalışmalarında veri kalitesi önem taşımaktadır. Verilerin güvenilirliği, eksiksizliği, zamansal, coğrafi ve teknolojik temsiliyeti sonuçların geçerliliğini doğrudan etkileyen kritik unsurlardır. Bu bağlamda veri kalitesinin sistematik olarak değerlendirilmesi YDA çalışmasının güvenilirliğini pekiştirmektedir. YDA çalışmalarında sonuçların güvenilirliği doğrudan kullanılan verilerin kalitesi ile ilişkilidir. Veri kalitesi, sistematik bir değerlendirme ile ölçülmektedir ve belirsizlikler açıkça ortaya konmaktadır. Veri kalitesi değerlendirmesinin temel adımı veri kalite göstergelerinin belirlenmesi içermektedir (Weidema ve diğ, 1996) (European Commission – JRC, 2010). Veri kalitesi göstergeleri genellikle şu kriterler etrafında tanımlanmaktadır:

- Güvenilirlik: Verinin doğrudan ölçüme mi dayalı olduğu, yoksa tahmine, modellemeye veya ikincil kaynaklara mı dayandığı.
- Bütünsellik: Verinin eksiksiz olup olmadığı; örneğin tüm girdilerin ve çıktının kapsanıp kapsanmadığı.
- Zamansal Temsiliyet: Verinin YDA çalışmasında incelenen dönemle ne kadar uyumlu olduğu.
- Coğrafi Temsiliyet: Verinin değerlendirilen sürecin gerçekleştiği coğrafi konumu ne kadar doğru temsil ettiği.
- Teknolojik Temsiliyet: Verinin kullanılan teknoloji veya üretim süreci ile ne kadar uyumlu olduğu.

Bu göstergeler, PEDIGREE Matrix gibi yapılandırılmış araçlar kullanılarak puanlanmaktadır ve her bir veri seti için kalite profili oluşturulmaktadır. Her bir kategori için veriye bir kalite skoru atanmaktadır (genellikle 1-5 arasında), bu skorlar 1: Çok yüksek kalite, 2: Yüksek kalite, 3: Orta kalite, 4: Düşük kalite, 5: Çok düşük kalite şeklindedir. Bu kalite skorları kullanılarak veri kalitesi değerlendirmesi (DQR) hesaplanmaktadır.

$$\mathrm{DQR} = \frac{\mathrm{R} + \mathrm{C} + \mathrm{T} + \mathrm{G} + \mathrm{Te}}{5} \tag{3.1}$$

Denklem 3.1'de, görüleceği üzere DQR, veri kalitesi değerlendirme skorunu; R, reliability yani güvenilirlik skorunu; C, completeness yani bütünsellik skorunu, T, temporal representation yani zamansal temsiliyet skorunu; G, geographic representation yani coğrafi temsiliyet skorunu; Te, technological representation yani teknolojik temsiliyet skorunu ifade etmektedir.

Buradan çıkan DQR sonucuna göre;

- 1<DQR<2 Çok iyi kalite
- 2<DQR<3 İyi kalite
- 3<DQR<4 Orta kalite
- 4<DQR<5 Kötü kalite şeklinde yorumlanmaktadır.

Hesaplanan veri kalitesi değerlendirmesi nitel gözlem yöntemi ile gerçekleştirilebilmektedir. Nitel gözlem, verilerin toplandığı kaynakların

güvenilirliğinin, veri toplama sürecindeki titizliğin ve kullanılan metodolojilerin uygunluğunun detaylı bir şekilde incelenmesini içermektedir.

3.3 Etki Değerlendirme (LCIA)

Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (LCIA), envanterde elde edilen girdilerin ve çıktılarının çevresel etkilerini anlamaya yönelik bir analiz sürecidir. ISO 14044'e göre etki değerlendirme süreci; envanter verilerinin uygun etki kategorilerine atandığı sınıflandırma, her girdinin belirli bir etki kategorisindeki katkısının nicel olarak hesaplandığı karakterizasyon ve isteğe bağlı şekilde normalize etme, ağırlıklandırma, gruplayarak sunma şeklinde üç adımdan oluşmaktadır. Bu kapsamda veriler, öncelikle uygun etki kategorilerine sınıflandırılmaktadır ve her bir çıktı için karakterizasyon faktörleri aracılığıyla çevresel etkiler hesaplanmaktadır. Sıklıkla değerlendirilen etki kategorileri arasında küresel ısınma etkisi, asidifikasyon, ötrofikasyon, ozon tabakasındaki incelme ve fotokimyasal oksidant oluşumu yer almaktadır. Gerektiğinde normalizasyon, gruplama ve ağırlıklandırma gibi isteğe bağlı adımlar da uygulanabilmektedir. Karakterizasyon aşamasında, özellikle iklim değişikliği etkisi (GWP – Global Warming Potential) için IPCC'nin sağladığı karakterizasyon faktörleri kullanılarak CO_{2e} eşdeğeri emisyonlar hesaplanmaktadır.

Yaygın kullanılan etki değerlendirme yöntemleri arasında CML, ReCiPe, TRACI, ILCD gibi modeller bulunmaktadır (Hauschild ve diğ, 2018).

Çalışmada, yaşam döngüsü analizi hesaplaması, SimaPro 9.6.0.1 yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve süreçlerde Ecoinvent 3.10 veri tabanından yararlanılmıştır. Etki kategorileri IPCC 2021 ile CML-IA Baseline metodolojisi doğrultusunda değerlendirilmiştir. Fonksiyonel birime karşılık gelen karbon ayak izinin hesaplanmasında, SimaPro içerisinde yer alan "IPCC 2021 GWP100" yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, IPCC 2013 yaklaşımının güncellenmiş bir sürümü olup, sera gazlarının küresel ısınma potansiyelini (KIP-GWP) esas alarak iklim değişikliği üzerindeki etkilerini 100 yıllık bir zaman dilimi içinde analiz etmektedir (PRé Sustainability, 2020).

Aşağıda yer alan Çizelge 3.2'de, IPCC 2021 GWP100 yönteminde baz alınan temel GWP değerleri sunulmuştur.

Çizelge 3.2: IPCC 2021 GWP100 yönteminde baz alınan temel GWP değerleri.

Sera Gazı	GWP100 (IPCC 2021 AR6)
CO_2 (Karbondioksit)	1
CH_4 (Metan)	27,2 (fosil kaynaklı)
N_2O (Dinitrojen oksit)	273
SF_6 (Kükürtheksaflorür)	25.200
HFC-134a	1.430
HFC-152a	138
CFC-12	10.200

Karbon ayak izi hesaplaması iki aşamalı gerçekleştirilmektedir. İlk aşama faaliyet verisini sera gazı emisyonlarına dönüştürmektir ve aşağıdaki Denklem 3.8'de ifade edilmektedir.

$$\text{Sera Gazı Emisyonu} = \text{Faaliyet Verisi} \times \text{Emisyon Faktörü} \quad (3.8)$$

İkinci aşamada, her bir sera gazının küresel ısınma potansiyeli (GWP) dikkate alınarak emisyon miktarları, ton karbondioksit eşdeğeri (tCO_2e) cinsinden dönüştürülerek ifade edilmektedir.

$$\text{Sera Gazı Emisyonu} = \sum_{\text{Gas}}(\text{Emisyon}_{\text{Gaz}} \times \text{KIP}_{\text{Gaz}}) \quad (3.9)$$

Yanma kaynaklı emisyonların hesaplanabilmesi için, kullanılan yakıtlara ilişkin faaliyet verilerinin net kalorifik değer (TJ) biriminde sunulması gerekmektedir.

$$\text{Faaliyet Verisi} = \text{Tüketim Verisi} \times \text{Net Kalorifik Değer} \quad (3.10)$$

$$\text{Emisyonlar} = \text{Faaliyet Verisi} \times \text{Emisyon Faktörü} \times \text{Yükseltgenme Faktörü} \quad (3.11)$$

Burada net kalorifik değer TJ/t veya TJ/Nm^3 cinsinden, emisyonlar tCO_2 cinsinden, emisyon faktörü tCO_2/TJ, tCO_2/t, tCO_2/Nm^3, yükseltgenme faktörü birimsiz şekilde ifade edilmektedir.

Fonksiyonel birime karşılık gelen çevresel etkilerin analiz edilebilmesi amacıyla yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) kapsamında SimaPro yazılımında yer alan "CML-IA Baseline" etki değerlendirme yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, Leiden Üniversitesi'ne bağlı Çevresel Bilimler Enstitüsü (CML-Institute of Environmental Sciences) tarafından geliştirilmiş olup, çevresel etkilerin kategori temelli olarak sistematik biçimde analiz edilmesine olanak tanımaktadır (Guinée JB, 2022). CML-IA Baseline, çevresel etkileri aşağıdaki etki kategorileri üzerinden değerlendirmektedir:

- Abiyotik Tükenme: Yenilenemez nitelikteki doğal kaynakların, özellikle metalik ve mineral bazlı hammaddelerin, tükenme hızını değerlendiren bu etki kategorisi; mevcut rezervlerin azalmasının uzun vadeli çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır.
- Fosil Kaynakların Abiyotik Tükenmesi: Petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil enerji kaynaklarının tüketim hızını ve gelecekteki erişilebilirliğini dikkate almaktadır. Bu kaynakların tükenmesi, enerji arz güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından stratejik önem taşımaktadır.
- Küresel Isınma Potansiyeli (GWP): Karbondioksit (CO_2), metan (CH_4) ve diazot monoksit (N_2O) gibi sera gazlarının atmosferde birikerek küresel sıcaklık artışına neden olması, bu kategori kapsamında değerlendirilmektedir. İklim değişikliği, deniz seviyesindeki yükselme ve ekstrem hava olayları gibi sonuçlarla ilişkilidir.
- Ozon Tabakasının İncelmesi: Stratosferde yer alan ozon tabakasının, özellikle CFC'ler ve HCFC'ler gibi insan kaynaklı kimyasallar aracılığıyla incelmesi sonucu ortaya çıkan etkileri değerlendirmektedir. Bu durum, UV-B ışınlarının yeryüzüne ulaşmasını kolaylaştırarak insan sağlığı ve ekosistemler üzerinde olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir.
- İnsan Toksisitesi: Çevresel maruziyet sonucu insan sağlığı üzerinde zararlı etkiler oluşturabilecek toksik maddelerin etkilerini analiz etmektedir. Ağır metaller, organik solventler ve endüstriyel kirleticiler gibi maddelerin solunum, dermal temas veya sindirim yoluyla vücuda alınması, ciddi sağlık riskleri doğurabilmektedir.
- Tatlı Su Ekotoksisitesi: Endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan kimyasallar, pestisitler ve ağır metallerin tatlı su ekosistemlerindeki organizmalar üzerindeki toksik etkilerini incelemektedir. Söz konusu kirleticiler, sucul canlıların sağlığını tehdit ederek ekolojik dengeyi bozabilmektedir.
- Deniz Suyu Ekotoksisitesi: Deniz ortamına ulaşan toksik kirleticilerin (örneğin petrol türevleri, ağır metaller ve mikroplastikler) deniz canlıları üzerindeki olumsuz etkileri bu başlık altında değerlendirilmektedir. Bu tür kirlenmeler, besin zincirini ve deniz biyolojik çeşitliliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

- Kara Ekotoksisitesi: Tarımsal faaliyetler ve endüstriyel üretim sonucu ortaya çıkan toksik bileşiklerin, toprak ekosistemleri üzerindeki zarar verici etkilerini incelemektedir. Bu kirleticiler, toprakta yaşayan mikroorganizmaların yapısını bozarak bitki gelişimini engelleyebilmekte ve ekosistem hizmetlerini tehdit edebilmektedir.
- FotoKimyasal Oksidant Oluşumu: Azot oksitler (NO_x) ve uçucu organik bileşiklerin (VOC'ler) güneş ışığıyla etkileşerek troposferde ozon oluşturması sonucu ortaya çıkan bu etki; hava kirliliği, insan sağlığı sorunları ve bitki örtüsü hasarı ile ilişkilidir.
- Asidifikasyon Potansiyeli: Atmosfere yayılan sülfür dioksit (SO_2) ve azot oksitlerin (NO_X) atmosferde su buharı ile reaksiyona girerek asidik bileşikler oluşturması ve bu bileşiklerin yağışlarla yeryüzüne ulaşması sonucu meydana gelen etkiler değerlendirilir. Bu süreç, su ve toprak ekosistemlerinde kimyasal dengesizliklere yol açabilmektedir.
- Ötrofikasyon Potansiyeli: Özellikle azot ve fosfor gibi besin maddelerinin sucul ortamlarda aşırı birikmesiyle birlikte alg patlamalarına ve çözünmüş oksijenin azalmasına neden olan bu süreç, su kalitesinin bozulması ve biyolojik çeşitliliğin azalması gibi çevresel sorunlara zemin hazırlamaktadır.

3.4 Yorumlama

YDA sürecinin son aşaması olan yorumlama, elde edilen sonuçların bütüncül şekilde değerlendirilmesini ve karar verme süreçlerine katkı sağlamasını amaçlamaktadır. Bu aşamada, çalışmanın amacıyla uyumluluk gözden geçirilmekte, veri kalitesi ve belirsizlik analizleri yapılmakta, sonuçların güvenilirliği değerlendirilmekte ve çevresel açıdan iyileştirme fırsatları tanımlanmaktadır. Yorumlama adımı, aynı zamanda diğer üç aşamayla sürekli etkileşim hâlindedir.

Bu çalışma ile sürdürülebilir üretime olan bağlılığının desteklenmesi amaçlanmış bu anlamda çalışma kapsamında Bursa ilinde otomotiv yan sanayi metal sektöründe küresel ölçekte faaliyet gösteren kalıp, ekipman ve komponent tasarlayıp geliştirme ve üretim faaliyetlerini yürüten firma ele alınmıştır. Fonksiyonel birim olarak 2023 yılında üretimi yapılan 1 adet paketlenmiş OP-20 kalıbı belirlenmiştir. Muhtelif kalıp üretimi ve muhtelif otomotiv sac parça basımı gerçekleştiren tesiste veri kalitesinin

yüksek olması açısından 2023 yılında üretimi yapılan “OP-20” kodlu kalıbın hammadde çıkarımı, hammaddelerin temini, üretimi, paketlenmesi, satış lojistiği, kullanım ömrü ve kullanım ömrü sonu süreçlerindeki çevresel etkilerini değerlendirmiştir. Değerlendirme, kalıbın kullanım aşaması ve ömrünün sonunu da kapsayacak şekilde "beşikten mezara" yaklaşımı ile yapılmıştır.

4. BULGULAR

4.1 Yaşam Döngüsü Envanteri (LCI)

Bu çalışmanın veri kalitesi değerlendirilmesinde PEDIGREE Matrix aracı kullanılmış ve kalıp alıştırma, kalıp montaj, ölçüm kontrolü, paketleme, talaşlı imalat, taşlama ve tel erezyon prosesleri girdileri için reliability (R), completeness (C), temporal representation (T), geographic representation (G), technological representation (Te) skorları verilmiştir.

- Güvenilirlik (R) skoru, 1 skoru 9 adet, 2 skoru 68 adet şeklindedir ve skoru 1,88 bulunmuştur;

$$\mathrm{R} = \frac{[(9 \times 1) + (68 \times 2)]}{(9 + 68)} = 1{,}88 \tag{4.1}$$

- Bütünsellik (C) skoru, 1 skoru 77 adet şeklindedir ve skoru 1 bulunmuştur;

$$\mathrm{C} = \frac{[(77 \times 1)]}{(77)} = 1 \tag{4.2}$$

- Zamansal temsiliyet (T) skoru, 1 skoru 77 adet şeklindedir ve skoru 1 bulunmuştur;

$$\mathbf{T} = \frac{[(\mathbf{77} \times \mathbf{1})]}{(\mathbf{77})} = \mathbf{1} \tag{4.3}$$

- Coğrafi temsiliyet (G) skoru, 2 skoru 21 adet, 3 skoru 21 adet, 4 skoru 35 adet şeklindedir ve skoru 3,18 bulunmuştur;

$$\mathrm{G} = \frac{[(21 \times 2) + (21 \times 3) + (35 \times 4)]}{(21 + 21 + 35)} = 3{,}18 \tag{4.4}$$

- Teknolojik temsiliyet (Te) skoru, 1 skoru 77 adet şeklindedir ve skoru 1 bulunmuştur;

$$\mathrm{T} = \frac{[(77 \times 1)]}{(77)} = 1 \tag{4.5}$$

Denklem 3.1'e göre DQR skoru 1,61 bulunmuştur;

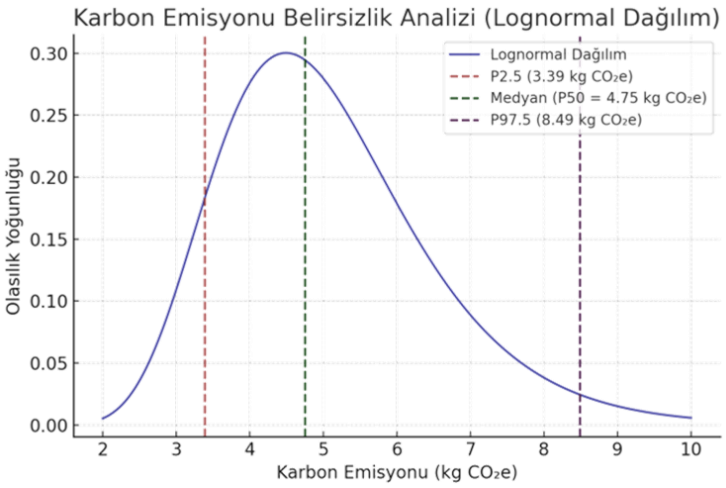
$$\mathrm{DQR} = \frac{\mathrm{R} + \mathrm{C} + \mathrm{T} + \mathrm{G} + \mathrm{Te}}{5} = \frac{1{,}88 + 1 + 1 + 3{,}18 + 1}{5} = 1{,}61 \qquad (4.6)$$

Değerlendirme sonucunda veri kalitesi 1,61 şeklinde hesaplanmıştır. Bu sonuç veri kalitesinin "çok iyi" seviyesinde olduğunu göstermektedir. Bu durum çalışmada kullanılan verilerin yüksek güvenilirliğe sahip olduğunu ortaya koymakta ve sonuçların doğruluğunu desteklemektedir.

YDA sonuçlarına göre hammadde olarak kullanılan demirin ve çeliğin kalıbın büyük çoğunluğunu oluşturduğu ve çevresel etkiler açısından en yüksek paya sahip olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda, ikincil veri olarak kullanılan Ecoinvent veri tabanındaki "steel production, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO}" ve "market for pig iron {RoW} verilerinin belirsizlik analizi ve sistem sınırları incelenmiştir.

4.1.1 Çelik üretimi, krom çeliği 18/8, sıcak haddelenmiş {GLO}

Dünya ve Avrupa üretim karışımının ortalamasını temsil etmekte olup, Avrupa'daki tüketim karışımına karşılık geldiği varsayılmaktadır. Sistem sınırları, yarı mamulün haddeleme tesisine kabulü ile başlamakta ve haddelenmiş ürün elde edilene kadar olan süreçleri kapsamaktadır. Farklı sıcak haddeleme yöntemleri ve çelik türlerinin ortalamasını içermektedir. Veriler, ağırlıklı olarak AB'deki tesislere dayanmaktadır. Belirsizlik analizi kapsamında, çevresel etkilere ilişkin veri güvenilirliği değerlendirilmiş ve modellemeden kaynaklı belirsizliklerin LCA sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Şekil 4.1'deki grafik, karbon emisyonlarının olasılık yoğunluğu dağılımını göstermektedir.



Şekil 4.1: Karbon emsiyonu belirsizlik analizi (lognormal dağılım).

Üretim sürecine ilişkin karbon emisyonlarının belirsizlik analizi, lognormal dağılım varsayımıyla gerçekleştirilmiş olup, Monte Carlo simülasyonları sonucunda elde edilen istatistiksel bulgular şu şekildedir; medyan (P50): 4,75 kg CO_{2e}, %2,5 yüzdelik değeri (P2.5): 3,39 kg CO_{2e}, %97,5 yüzdelik değeri (P97.5): 8,49 kg CO_{2e}, ortalama: 5,07 kg CO_{2e} ve standart sapma: 1,47 kg CO_{2e}.

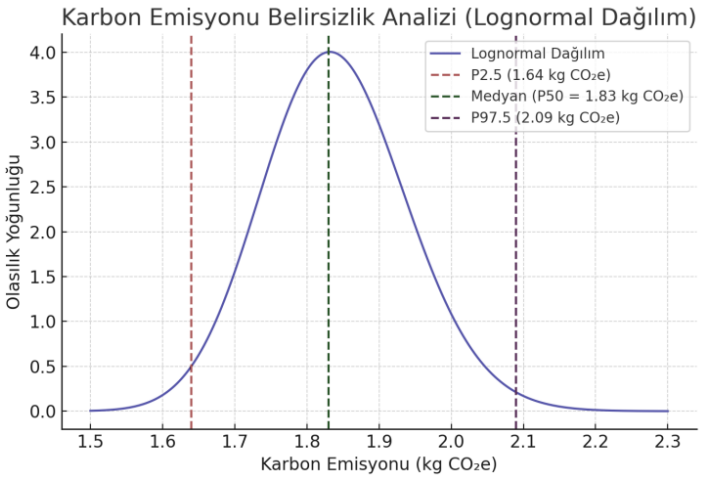
Elde edilen bu sonuçlara göre, karbon emisyonları için %95 güven aralığı 3,39 – 8,49 kg CO_{2e} olarak hesaplanmıştır. Medyan ve ortalama değerlerin birbirine yakın olması, dağılımın hafifçe asimetrik olmakla birlikte genel olarak merkezi eğilim gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Grafiğe göre mavi eğri, emisyonların dağılımını temsil etmektedir. Kırmızı çizgi (P2.5 = 3,39 kg CO_{2e}), en düşük %2,5'lik kesimi göstermektedir. Yeşil çizgi (P50 = 4,75 kg CO_{2e}), en olası emisyon değerini ifade etmektedir. Ve mor çizgi (P97.5 = 8,49 kg CO_{2e}), en yüksek %2,5'lik kesimi belirtmektedir. Analiz sonuçları, karbon emisyonlarına ilişkin belirsizlik ve varyasyonun güvenilir biçimde modellenebilmesi için sağlam bir temel teşkil etmektedir.

4.1.2 Pik demir pazarı {Row}

Belirli bir coğrafyadaki ürün tüketim karışımını temsil eden piyasa faaliyetidir. Küresel ölçekte çelik üretim tesislerine sıcak metal tedarikini kapsamaktadır. Sistem sınırları, yüksek fırın tesisinin çıkışında başlayıp çelik fabrikasının girişinde son bulmaktadır. Süreç; üreticiler, ithalatlar, nihai tüketiciye ulaşım ve taşıma kaynaklı kayıpları içerecek şekilde modellenmiştir. Taşıma mesafeleri, ecoinvent'in "Varsayılan Taşıma Varsayımları" modeline dayanmaktadır. Veriler, dünya genelindeki demir cevheri arzını temsil etmektedir. Belirsizlik analizi kapsamında, çevresel etkilere ilişkin veri güvenilirliği değerlendirilmiş ve modelleme belirsizliklerinin LCA sonuçlarına etkisi analiz edilmiştir.

Şekil 4.2'deki grafik, karbon emisyonlarının olasılık yoğunluğu dağılımını göstermektedir.



Şekil 4.2: Karbon emsiyonu belirsizlik analizi (lognormal dağılım).

Üretim sürecine ilişkin karbon emisyonlarının belirsizlik analizi, lognormal dağılım varsayımıyla gerçekleştirilmiş olup, Monte Carlo simülasyonları sonucunda elde edilen istatistiksel bulgular şu şekildedir; medyan (P50): 1,83 kg CO_{2e}, %2,5 yüzdelik değeri (P2.5): 1,64 kg CO_{2e}, %97,5 yüzdelik değeri (P97.5): 2,09 kg CO_{2e}, ortalama: 1,84 kg CO2e, standart sapma: 0,1 kg CO_{2e}.

Elde edilen bu sonuçlara göre, karbon emisyonları için %95 güven aralığı 1,64 – 2,09 kg CO_{2e} olarak hesaplanmıştır. Medyan ve ortalama değerlerin birbirine yakın olması, dağılımın hafifçe asimetrik olmakla birlikte genel olarak merkezi eğilim gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Grafiğe göre mavi eğri, emisyonların dağılımını temsil etmektedir. Kırmızı çizgi (P2.5 = 1,64 kg CO_{2e}), en düşük %2,5'lik kesimi göstermektedir. Yeşil çizgi (P50 = 1,83 kg CO_{2e}), en olası emisyon değerini ifade etmektedir. Ve mor çizgi (P97.5 = 2,09 kg CO_{2e}), en yüksek %2,5'lik kesimi belirtmektedir. Analiz sonuçları, karbon emisyonlarına ilişkin belirsizlik ve varyasyonun güvenilir biçimde modellenebilmesi için sağlam bir temel teşkil etmektedir.

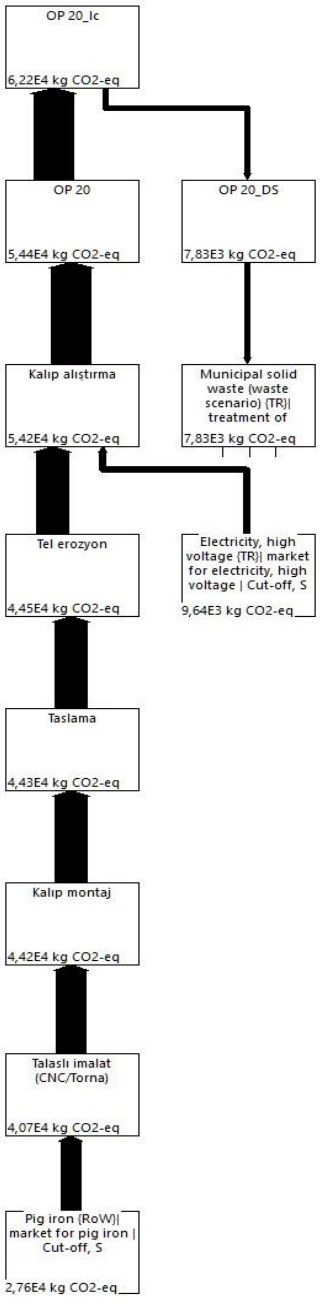
4.2 Etki Değerlendirme (LCIA)

Fonksiyonel birime (OP-20 ürünü) karşılık gelen karbon ayak izinin hesaplanma sonucuna göre emisyon miktarı 62.184,42 kg CO_{2eq} bulunmuştur.

Aşağıdaki Çizelge 4.1'de OP-20 kodlu kalıbın emisyon miktarları ve yüzdelik dağılımları, Şekil 4.3'de ise de OP-20 kodlu kalıbın emisyon miktarlarına ait ürün ağacı dağılımları yer almaktadır.

Çizelge 4.1: OP-20 kodlu kalıbın emisyon miktarları ve yüzdelik dağılımları.

Hesaplama Aşamaları	Emisyon (kg CO_{2eq})	%
OP-20	54.400	87,48
Kalıp Alıştırma	54.200	87,16
Tel Erozyon	44.500	71,56
Kalıp Montaj	44.200	71,08
Taşlama	43.400	69,79
Talaşlı imalat	40.700	65,45
Ürün kullanım ömrü sonu	7.830	12,59
Paketleme	139	0,22
Ölçüm Kontrolü	0	0



Şekil 4.3: OP-20 kodlu kalıbın emisyon miktarlarına ait ürün ağacı.

Aşağıda yer alan Çizelge 4.2 Normalizasyon tablosu'nda farklı etki kategorileri karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. Çizelge 4.3 Karakterizasyon tablosu'nda ise çevresel etkileri sunulmuştur.

Çizelge 4.2: Normalizasyon tablosu.

Etki Kategorisi	Birim	Toplam	OP-20	Bertaraf Senaryosu	%
Deniz Suyu Ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eq	7,80E-06	7,63E-06	1,69E-07	85,55
Tatlı Su Ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eq	4,97E-07	3,95E-07	1,02E-07	5,45
Kara Ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eq	4,20E-07	4,19E-07	9,00E-10	4,60
İnsan Toksisitesi	kg 1,4-DB eq	3,51E-07	3,50E-07	1,01E-09	3,85
Abiyotik Tükenme (Fosil Yakıtlar)	MJ	1,76E-08	1,75E--08	1,63E-10	0,19
Küresel Isınma (GWP1OOa)	kg CO_2 eq	1,23E-08	1,08E-08	1,56E-09	0,13
Ötrofikasyon	kg PO_4 eq	9,39E-09	8,94E-09	4,50E-10	0,10
Asitleşme	kg SO_2 eq	7,64E-09	7,52E-09	1,19E-10	0,08
Abiyotik Tükenme	kg Sb eq	2,46E-09	2,44E-09	1,57E-11	0,03
Fotokimyasal Oksidasyon	kg C_2H_4 eq	2,06E-09	2,05E-09	1,33E-11	0,02
Ozon Tabakası İncelmesi (ODP)	kg CFC11 eq	2,42E-12	2,35E-12	7,20E-14	0,00

Çizelge 4.3: Karakterizasyon tablosu.

Etki kategorisi	Birim	Toplam	OP-20	Bertaraf Senaryosu
Abiyotik Tükenme	kg Sb eq	2,10E-01	2,10E-01	1,33E-03
Abiyotik Tükenme (Fosil Yakıtlar)	MJ	5,54E+05	5,49E+05	5,13E+03
Küresel Isınma (GWP1OOa)	kg CO_2 eq	6,18E+04	5,40E+04	7,82E+03
Ozon Tabakası İncelmesi (ODP)	kg CFC 11 eq	2,16E-04	2,09E-04	6,43E-06
İnsan Toksisitesi	kg 1,4-DB eq	2,72E+06	2,72E+06	7,84E+03
Tatlı Su Ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eq	2,57E+05	2,05E+05	5,28E+04
Deniz Suyu Ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eq	9,10E+08	8,91E+08	1,97E+07
Kara Ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eq	2,04E+04	2,03E+04	4,37E+01
Fotokimyasal Oksidasyon	kg C_2H_4 eq	1,75E+01	1,74E+01	1,10E-01
Asitleşme	kg SO_2 eq	2,15E+02	2,12E+02	3,36E+00
Ötrofikasyon	kg PO_4 eq	1,24E+02	1,18E+02	5,93E+00

Gerçekleştirilen yaşam döngüsü analizi (YDA) ve ürün karbon ayak izi (ÜKA) hesaplamaları kapsamında, kalıp üretim sürecinde kullanılan krom içeren çelik (18/8 sıcak haddelenmiş) ve pik demir girdilerinin, karbon emisyonları açısından en yüksek çevresel etkiye sahip bileşenler olduğu belirlenmiştir. Yapılan analizlere göre bu durumun temel sebepleri arasında söz konusu çelik türlerinin üretim aşamalarındaki yoğun enerji tüketimi, hammadde temininden nihai ürüne kadar geçen süreçteki emisyonlar ve özellikle elektrik kullanımı kaynaklı dolaylı etkiler yer almaktadır. Çelik ve pik demir üretimi, maden çıkarımı, cevher işleme, ergitme, alaşım hazırlığı, haddeleme ve taşıma gibi enerji ve kaynak yoğun aşamaları içermektedir. Bu süreçlerde önemli miktarda su kullanımı, ağır metal salımı ve fosil kaynak tüketimi gerçekleşmekte, dolayısıyla toplam karbon ayak izine doğrudan katkı sağlamaktadır.

Ayrıca üretim proseslerinde kullanılan elektriğin üretim kaynağına (örneğin kömür, doğal gaz veya yenilenebilir enerji) bağlı olarak çevresel etkiler değişkenlik göstermektedir.

Analizlerde sektörde genel kabul gören metodolojilere ve mevcut ikincil veri tabanlarına dayalı varsayılan veriler kullanılmıştır. Ancak bu veriler sektörel ortalamaları temsil ettiğinden, belirli bir tedarikçiye veya üretim tesisine özel birincil verilerle karşılaştırıldığında daha yüksek çevresel etki değerleriyle sonuçlanabilmektedir. Özellikle çelik üretiminde kullanılan enerji türü, tedarikçilerin çevresel yönetim uygulamaları, atık su arıtma süreçleri gibi parametreler, karbon ayak izi hesaplamalarında önemli değişkenler olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle daha gerçekçi sonuçlara ulaşmak ve çevresel etkileri daha doğru değerlendirebilmek için tedarikçiye özgü birincil verilerin toplanması, üretim süreçlerindeki enerji ve kaynak tüketiminin detaylandırılması büyük önem taşımaktadır.

4.3 İyileştirme Önerileri

İyileştirme çalışmaları kapsamında, yüksek emisyon değerlerine sahip krom çelik ve pik demir girdileri yerine, daha düşük karbon ayak izine sahip alternatif malzemelerin değerlendirilmesi, üretim proseslerinde enerji verimliliği önlemlerinin uygulanması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, malzeme ve tasarım değişikliği ile parçanın ağırlığın azaltılması ve alternatif nakliye seçeneklerine geçiş sağlanması (denizyolu ve demiryolu taşımacılığı) önerilmektedir. YDA çalışmasının ilerleyen aşamalarında mevcut ikincil verilerle yapılan analizlerin tedarikçiye özgü verilerle karşılaştırmalı olarak yeniden değerlendirilmesi ve süreç bazlı çevresel iyileştirme fırsatlarının detaylı biçimde ortaya konulması hedeflenmelidir.

OP-20 kalıp ürün kullanım ömrü sonu için sıhhı depolama bertaraf senaryosu LCA modellemesi gerçekleştirilmiştir.

Aşağıda yer alan Çizelge 4.4‘te bertaraf senaryolarından olan yakma senaryosu ve sıhhi depolama senaryosuna ait sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu iki senrayo için Fark (Z) tabloda yer almaktadır.

Çizelge 4.4: Modelleme karşılaştırma tablosu.

Metot	Birim	Etki Kategorisi	Bertaraf Senaryosu Yakma	Bertaraf Senaryosu Sıhhi Depolama	Fark (Z)
IPCC GWP1OO	kg CO_2 eq	GWP100	6,22E+04	4,59E+04	-26,17
CML-IA Baseline	kg Sb eq	Abiyotik Tükenme	2,10E-01	3,30E-01	57,42
CML-IA Baseline	MJ	Abiyotik Tükenme (Fosil Yakıtlar)	5,54E+05	3,77E+05	-31,99
CML-IA Baseline	kg CO_2 eq	Küresel Isınma (GWP1OOa)	6,18E+04	4,56E+04	-26,23
CML-IA Baseline	kg CFC 11 eq	Ozon Tabakası İncelmesi (ODP)	2,16E-04	1,54E-04	-28,6
CML-IA Baseline	kg 1,4-DB eq	İnsan Toksisitesi	2,72E+06	2,72E+06	-0,13
CML-IA Baseline	kg 1,4-DB eq	Tatlı Su Ekotoksisitesi	2,57E+05	2,54E+05	-1,32
CML-IA Baseline	kg 1,4-DB eq	Deniz Suyu Ekotoksisitesi	9,10E+08	8,83E+08	-3,03
CML-IA Baseline	kg 1,4-DB eq	Kara Ekotoksisitesi	2,04E+04	2,03E+04	-0,18
CML-IA Baseline	kg C2H4 eq	Fotokimyasal Oksidasyon	1,75E+01	1,45E+01	-16,97
CML-IA Baseline	kg SO2 eq	Asitleşme	2,15E+02	1,31E+02	-39,3
CML-IA Baseline	kg PO4 eq	Ötrofikasyon	1,24E+02	6,20E+01	-49,97

Sonuçlara göre, kalıp üretim sürecine ilişkin yaşam döngüsü analizinde, sıhhi depolama seçeneği çoğu çevresel etki kategorisinde yakma senaryosuna kıyasla daha düşük etki değerleri ile sonuçlanmıştır. Özellikle küresel ısınma potansiyeli (%26,17 azalma), fosil kaynak tükenmesi (%31,99 azalma), asitleşme (%39,30 azalma) ve ötrofikasyon (%49,97 azalma) kategorilerinde dikkate değer iyileşmeler gözlemlenmiştir. Ancak, abiyotik tükenme kategorisinde artış meydana gelmiştir. Abiyotik tükenme kategorisinde gözlemlenen %57,41 oranındaki artış, sıhhi depolama altyapısının kurulumu ve işletimi sırasında kullanılan malzeme girdilerine (örneğin sızdırmazlık örtüleri, borulama sistemleri ve izleme ekipmanları gibi) bağlı olarak modelde ortaya çıkmaktadır. Bu altyapı bileşenlerinin üretiminde kullanılan metal ve mineral kaynaklar, elementel kaynak tüketimini artıran başlıca faktörlerdir. Yakma senaryosunda bu tür ilave altyapı girdileri daha sınırlı kalmakta ve enerji geri kazanımı sayesinde çevresel etkiler dengelenebilmektedir. Ötrofikasyon, azot ve fosfor gibi besin elementlerinin sucul ortamlara taşınarak alg patlamalarına, oksijen azalmasına ve ekosistem bozulmalarına yol açmasını ifade etmektedir. Yakma senaryosunda bu tür bileşenler yüksek sıcaklıklarda parçalanarak inert formlara dönüşmekte ve böylece

çevresel dolaşıma katılımları büyük ölçüde sınırlandırılmaktadır. Sıhhi depolama durumunda ise, organik içerikli fraksiyonların ayrışması sırasında oluşan sızıntı suları, azot ve fosfor gibi maddeleri içerebilmektedir. Her ne kadar bu sular arıtılsa da modelleme kapsamında dikkate alınan uzun vadeli salınımlar ve infiltrasyon etkisi ile bu bileşenlerin yer altı veya yüzey sularına taşınma potansiyeli öne çıkmaktadır. Bu nedenle, ötrofikasyon kategorisinde sıhhi depolama senaryosuna ait değerde gözlemlenen azalma, atık karakteristiği ve sahanın çevresel yönetim altyapısına göre değişiklik gösterebilecek niteliktedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

İklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlamak amacıyla, kurumlar ve işletmeler toplam ve faaliyet türüne özgü karbon ayak izi hesaplamalarının ardından sera gazı emisyonlarının kontrol altına alınması ve azaltılmasına yönelik stratejiler geliştirmeye başlamaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından yayımlanan raporlarda, iklim değişikliğinin ani ve geri döndürülemez sonuçlarının önlenebilmesi için küresel sera gazı emisyonlarında hızlı ve kesintisiz bir azaltım sürecinin gerekliliği açıkça vurgulanmaktadır.

Literatür incelendiğinde, iklim değişikliğinden kaynaklanan zararlı etkilerin en aza indirilmesi ve durdurulması için enerji tüketiminin azaltılması ve sera gazı emisyonlarının düşürülmesine yönelik çok sayıda çalışma yürütüldüğü görülmektedir. Elektrik tüketiminden kaynaklanan emisyonların azaltılmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması ve enerji verimliliği projelerinin geliştirilmesi öne çıkmaktadır. Diğer yandan, kömür, petrol, fuel oil ve biyokütle gibi konvansiyonel enerji kaynaklarının yerine doğalgaz gibi daha düşük karbon yoğunluklu alternatif yakıtların yanı sıra, atıktan türetilmiş yakıtların kullanımına yönelik uygulamaların da giderek yaygınlaştığı gözlemlenmektedir. Lojistik ve ulaşımdan kaynaklanan emisyonların azaltılmasına yönelik olarak ise; araç rotalarının optimizasyonu, fosil yakıt kullanımının azaltılarak yenilenebilir enerjiyle çalışan araçlara geçiş yapılması, üretim ve dağıtım süreçlerinde çevresel etkisi düşük lojistik çözümlerin tercih edilmesi, ayrıca atık suların yeniden kullanımı gibi uygulamaların yaygınlaştırılabileceği literatürde belirtilmektedir. Ancak, bir ürün ya da hizmetin "beşikten mezara" (cradle-to-grave) yaşam döngüsü boyunca yalnızca elektrik, doğalgaz veya lojistik gibi kaynaklardan değil, diğer faaliyetlerden kaynaklı emisyonların da bulunduğu ve bu alanlara yönelik azaltım çalışmalarının yeterince ele alınmadığı dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, üretim süreçlerinde düşük karbon ayak izine sahip ürün ve hizmetlerin tercih edilmesi, emisyon azaltımı açısından etkili stratejilerden biri olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım aynı zamanda üretici ve hizmet sağlayıcılar üzerinde, düşük emisyonlu üretim gerçekleştirmeleri yönünde

yatırımcı ve müşteri taleplerini artıran bir baskı unsuru olarak ortaya çıkmaktadır. Karbon ayak izini azaltmayı hedefleyen kuruluşlar, tedarik süreçlerinde sıfıra yakın veya düşük emisyonla üretilmiş ürün ve hizmetleri tercih etmektedir. Bu bağlamda, sera gazı emisyonlarının etkin şekilde yönetilebilmesi için ürün veya hizmet düzeyinde karbon ayak izi hesaplamalarının yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu hesaplama, bir ürünün ya da hizmetin yaşam döngüsü boyunca hammaddenin temininden üretim, kullanım ve bertaraf aşamalarına kadar olan süreçlerde ortaya çıkan sera gazı emisyonlarının nicel olarak belirlenmesini kapsamaktadır. Ürün Karbon Ayak İzi (ÜKA), bir ürün sistemine ait sera gazı salımları ve giderimlerinin toplamını temsil etmektedir; bu hesaplama, yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yaklaşımına dayanmakta olup, sonuçlar karbondioksit eşdeğeri (CO_{2e}) cinsinden ve iklim değişikliği etki kategorisi dikkate alınarak ifade edilmektedir. Hammaddenin çıkarılıp işlenmesinden başka bir endüstriye hammadde olarak girişinden ürünün bertarafına kadar olan süreçte yapılması gereken engelleme ve iyileştirme süreçleri için önem arz etmektedir. Bu sayede tüm faaliyetler için öncelikle mevcut durumun analizi yapılmıştır ve ardından iyileştirme uygulamaları için metotlar bulunmaya çalışılmıştır ve yapılan iyileştirmelerin sonuçları gözlemlenebilmiştir.

Bu ÜKA çalışmasında çevresel etki potansiyeli, pazar talebi ve rekabet, üretim miktarı, iyileştirme potansiyeli, stratejik önemi ve veri kalitesi dikkate alınarak ölçülebilir ve net fonksiyonel birim olarak örnek bir OP-20 kodlu kalıp, beşikten mezara sistem sınırı ile seçilmiştir. Analizi yapılan ürünün, PCR sınıflandırmasının yapılabilmesi için teknik çizim, kütle, boyut, akış şeması, sistem sınırı, ürün reçetesi, etkiketi vb. ürün bilgileri toplanmıştır. Akış şemasına ve sistem sınırına göre tier bilgileri analiz edilmiştir. IPCC GWP 100 ve CML-IA Baseline metodolojisine uygun olarak SimaPro 9.6.0.1 yazılımı ve Ecoinvent 3.10 veri tabanı kullanılarak hesaplama yapılmış ve etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar analiz edilmiş ve fonksiyonel birim olan OP-20 kalıbına karşılık gelen karbon ayak izinin hesaplanma sonucuna göre emisyon miktarı 62.184,42 kg CO_{2eq} bulunmuştur. Gerçekleştirilen yaşam döngüsü analizi (YDA) ve ürün karbon ayak izi (ÜKA) hesaplamaları sonucunda, kalıp üretim sürecinde kullanılan 18/8 sıcak haddelenmiş krom içeren çelik ve pik demir girdilerinin, karbon emisyonları açısından en yüksek çevresel etkiye sahip bileşenler olduğu belirlenmiştir. Analiz bulguları, bu malzemelerin üretim süreçlerinin yüksek enerji tüketimi gerektirmesi, hammadde temininden nihai ürüne kadar olan tüm aşamalarda önemli

miktarda sera gazı emisyonu oluşması ve özellikle elektrik kullanımına bağlı dolaylı etkilerin belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Çelik ve pik demir üretimi; maden çıkarımı, cevherin işlenmesi, ergitme, alaşım hazırlığı, haddeleme ve taşıma gibi enerji ve kaynak yoğun prosesleri içermektedir. Bu süreçlerde gerçekleşen yüksek fosil yakıt tüketimi, su kullanımı ve ağır metal salımları, toplam karbon ayak izi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Ayrıca, üretim proseslerinde kullanılan elektriğin üretim kaynağı (örneğin kömür, doğal gaz veya yenilenebilir enerji) çevresel etkilerin seviyesini önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu bulgular, kalıp üretiminde kullanılan hammadde seçimlerinin ve enerji kaynaklarının karbon ayak izi üzerindeki kritik rolünü açıkça ortaya koymaktadır.

İyileştirme çalışmaları çerçevesinde, yüksek karbon ayak izine sahip olan kromlu çelik ve pik demir yerine daha çevreci alternatif malzemelerin değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca üretim süreçlerinde enerji verimliliğinin artırılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, malzeme ve tasarım optimizasyonları ile parça ağırlığının azaltılması ve deniz/demiryolu gibi alternatif taşıma yöntemlerine geçişin sağlanması potansiyel iyileştirme alanları olarak öne çıkmaktadır. YDA'nın ileri aşamalarında, mevcut ikincil verilerin tedarikçiye özgü birincil verilerle karşılaştırmalı olarak yeniden analiz edilmesi ve süreç bazlı çevresel iyileştirme fırsatlarının ayrıntılı biçimde ortaya konulması hedeflenmelidir. Kalıp üretimine ilişkin YDA sonuçları, atık yönetiminde sıhhi depolama senaryosunun, yakma yöntemine kıyasla çoğu çevresel etki kategorisinde daha düşük emisyon değerleriyle sonuçlandığını göstermiştir. Özellikle küresel ısınma potansiyeli, fosil kaynak tükenmesi, asitleşme ve ötrofikasyon gibi kategorilerde anlamlı azalmalar gözlemlenmiştir. Ancak, abiyotik kaynak tükenmesi kategorisinde sıhhi depolama seçeneği %57,41 oranında daha yüksek etki değeri göstermiştir. Bu artışın temel nedeni, sıhhi depolama altyapısında kullanılan malzemelerin (örneğin sızdırmazlık sistemleri, borular, izleme ekipmanları) üretiminde tüketilen elementel kaynaklardır. Buna karşılık, yakma yönteminde bu tür altyapı gereksinimleri daha sınırlı olup, enerji geri kazanımı sayesinde bazı çevresel etkiler dengelenebilmektedir. Ötrofikasyon açısından değerlendirildiğinde, yakma senaryosunda yüksek sıcaklık nedeniyle azot ve fosfor gibi bileşenlerin inert formlara dönüşmesi bu etkinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Sıhhi depolamada, atık içerisindeki organik maddelerin ayrışması sonucu oluşan sızıntı sularında bu tür besin elementlerinin bulunma riski devam

etmekte olup, uzun vadeli çevresel salınımlar bu etki kategorisinin sonuçlarını etkileyebilmektedir. Dolayısıyla ötrofikasyon üzerindeki etkiler, atık karakteristiği ve alanın yönetim altyapısına göre değişkenlik gösterebilmektedir.

Bu çalışma, kalıp üretiminin çevresel etkilerinin sistematik bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Bu kapsamda çevresel etkilerin belirlenmesi sağlanmış bu bağlamda döküm kalıbının hammaddeden nihai üretime kadar olan tüm yaşam döngüsü boyunca oluşan sera gazı emisyonları ve diğer çevresel etkiler kantitatif olarak hesaplanmış; özellikle enerji yoğun üretim adımlarının karbon ayak izi üzerindeki belirleyici rolü ortaya konmuştur. Aynı zamanda kritik süreçlerin ve iyileştirme alanlarının tanımlanması sağlanmış ve analizler sonucunda kalıp üretiminde kullanılan çelik türü, enerji tüketimi ve ısıl işlemler gibi proseslerin çevresel etkiyi en çok artıran faktörler olduğu saptanmış, çevresel performansın artırılması için öncelikli müdahale alanları netleşmiştir. Kalıp gibi yüksek mühendislik gerektiren ürünlerde, çevresel etkilerin sayısal verilere dayanarak değerlendirilmesi, ürün tasarımı, tedarikçi seçimi ve üretim teknolojilerinin sürdürülebilirlik ekseninde yeniden yapılandırılmasına katkı sunmaktadır. Ayrıca Avrupa Yeşil Mutabakatı, CBAM ve ISO 14067 gibi düzenlemelerin gerektirdiği karbon hesaplama ve raporlama süreçlerine doğrudan katkı sağlayan bu analiz, aynı zamanda çevreye duyarlı tedarik zinciri oluşturma açısından da stratejik bir rol üstlenmektedir. Bu yönleriyle, kalıp ürününe özgü gerçekleştirilen bu YDA ve karbon ayak izi analizi, hem akademik literatüre sektörel bir uygulama örnek kazandırmakta hem de otomotiv yan sanayisinde çevresel sürdürülebilirlik odaklı ürün geliştirme ve üretim yönetimi açısından uygulanabilir çıktılar üretmektedir. Böylece ürün müşterisine karşı şeffaflık, kuruluşun performansınının artması, satış faaliyetlerinin değer zincirinde güven vermesi, sınırda karbon gibi yürürlüğe girecek olan mevzuatlara hazırlık, kaynak kullanımının indirgenmesi, tesise özgü proses değerleri ile kabul edilmiş bir data haricinde yönetilen bir yapı sağlanması, ARGE süreçlerinde yeni tasarımların güncel değerlendirmeleri, dijital ürün pasaportu tüzüğü gibi faaliyetlerde hazırlık çalışmaları kapsamında katkılar sağlanmıştır.

Böylece kuruluşların ürün geliştirme süreçlerine çevresel performans kriterlerini entegre etmeleri, tasarım aşamasında YDA verilerinden yararlanmaları, enerji yoğun prosesler için özel enerji verimliliği projeleri geliştirilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranı artırılması önerilmektedir. Ayrıca tedarik zinciri

boyunca karbon verisi toplanabilirliğini artırmak amacıyla, dijital izlenebilirlik sistemleri ve tedarikçi eğitimleri yaygınlaştırılması önerilmektedir. Bunlarla birlikte benzer çalışmalarda farklı sistem sınırları (ör. kapıdan-mezara) ve fonksiyonel birimler ile genişletilmesi, çok kriterli çevresel değerlendirmeler (ör. su ayak izi, asidifikasyon potansiyeli gibi) ile desteklenmesi tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

Avrupa Birliği Başkanlığı. (2024). *Avrupa Yeşil Mutabakatı*. AB Resmi Web Sitesi. https://www.ab.gov.tr/avrupa-yesil-mutabakati_53729.html.

Blonk Consultants. (2023). *Agri-footprint 6.0: LCI database for agricultural products* [Life cycle inventory database]. Blonk Sustainability/Mérieux NutriSciences. https://blonksustainability.nl/tools-and-databases/agri-footprint.

British Standards Institution (BSI). (2011). *PAS 2050:2011 - Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. London, UK: BSI. https://doi.org/10.3403/30227173.

Cosbey, A., Droege, S., Fischer, C., Reinaud, J. (2021). Border carbon adjustments and trade: Issues and challenges. *Climate Policy, 21(7)*, 888–902. https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1903689.

Çamur, C. (2010). *Isı yalıtım malzemelerinin yaşam döngüsü değerlendirme yöntemiyle çevresel etkilerinin değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Demirbaş, F. (2018). *Geri kazanım tesisinde karbon ayak izinin değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri.

Downie, J., Stubbs, W. (2012). Corporate carbon strategies and greenhouse gas emission assessments: The implications of scope 3 emission factor selection. *Business Strategy and the Environment, 21*(6), 412–422. https://doi.org/10.1002/bse.1734.

Ecoinvent Association. (2023). *Ecoinvent Database v3.9 overview*. https://www.ecoinvent.org

Ellerman, D., Buchner, B. (2008). Over-allocation or abatement? A preliminary analysis of the EU ETS based on the 2005–06 emissions data. *Environmental and Resource Economics, 41*(2), 267–287. https://doi.org/10.1007/s10640-008-9190-y.

Environmental Protection Agency (EPA). (2021). *Global greenhouse gas emissions data*. https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data.

Erbil, S. (2015). *Bir otomobil fabrikasında karbon envanterinin oluşturulması* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, İstanbul.

European Commission – Joint Research Centre. (2010). *ILCD handbook: General guide for life cycle assessment – Detailed guidance*. Publications Office of the European Union. https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-

Handbook-General-guide-for-LCA-Detailed-guidance-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf.

European Commission – Joint Research Centre. (2023). *European reference life cycle database (ELCD)*. Publications Office of the European Union. https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/.

European Commission. (2019). *The European Green Deal*. Publications Office of the European Union. https://commission.europa.eu/green-deal_en.

European Commission. (2019). *Carbon Neutrality by 2050: Roadmap and policies*. European Commission. https://commission.europa.eu/neutrality-2050_en.

European Commission. (2021). *Carbon border adjustment mechanism*. Publications Office of the European Union. https://commission.europa.eu/cbam_en.

European Commission. (2023). *The EU emissions trading system* [Official website page]. https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en.

Finkbeiner, M., Schau, E. M., Lehmann, A., Traverso, M. (2010). Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability, 2*(10), 3309–3322. https://doi.org/10.3390/su2103309.

Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinee, J., Heijungs, R., Hellweg, S., ... Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management, 91*(1), 1–21. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018.

GreenDelta. (2023). *LCA data services and tools* [Data and services webpage]. https://www.greendelta.com/what-we-do/data/.

GHG Protocol. (2004). *The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard* (Revised edition). World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development.

Guinée, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., ... van Oers, L. (2002). *Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards*. Kluwer Academic Publishers.

Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., Olsen, S. I. (2018). *Life cycle assessment: Theory and practice*. Springer.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate change 2007: Synthesis report*. https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate change 2007: Synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels*. https://www.ipcc.ch/sr15/.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al., Eds.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

International Organization for Standardization (ISO). (2006a). *ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. Geneva, Switzerland: ISO.

International Organization for Standardization (ISO). (2006b). *ISO 14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*. Geneva, Switzerland: ISO.

International Organization for Standardization (ISO). (2018). *ISO 14064-1:2018 – Greenhouse gases – Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals*. Geneva, Switzerland: ISO.

International Organization for Standardization (ISO). (2018). *ISO 14067:2018 – Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification*. Geneva, Switzerland: ISO.

İşler, A. (2012). *Aspir yağı etil esteri ve yaşam döngüsü değerlendirmesi* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Jiangling Motors Corporation Ltd. (2014). *Greenhouse gas inventory report* (pp. 9–19).

Jochem, H., Wolfram, T. (2014). *Carbon footprint environment sustainability report*. Volkswagen AG, 126–129.

Keeling, R. F., Whorf, T. P. (2022). *Atmospheric CO_2 concentrations (1958–2022)*. Scripps Institution of Oceanography. https://scrippsco2.ucsd.edu.

Liu, Q., Yang, X., Ma, L., Zhang, J. (2024). Life cycle assessment of six types of automotive interior trim panels. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 64*, 103438. https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103438.

Lu, B., Wang, Y., Chen, X., Guo, Q., Tian, X. (2023). Life cycle assessment of natural fiber composites for automotive applications: A case study of microcellular foamed flax/PLA. *Materials, 16*(14), 4952. https://doi.org/10.3390/ma16144952

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., ... Zhang, H. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. In T. F. Stocker et al. (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis* (pp. 659–740). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/.

Özbilen, A., Dincer, I., Rosen, M. A. (2011). A comparative life cycle analysis of hydrogen production via thermochemical water splitting using a Cu–Cl cycle. *International Journal of Hydrogen Energy, 36*(17), 11321–11328. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.12.035.

Özçağ, M., Yılmaz, B., Sofuoğlu, E. (2017). Türkiye'de sanayi ve tarım sektörlerinde seragazı emisyonlarının belirleyicileri: İndeks ayrıştırma analizi.

Uluslararası İlişkiler, 14(54), 175–195. https://doi.org/10.33458/uidergisi.432581.

PRé Sustainability. (2020). *Database manual methods*. https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/06/DatabaseManualMethods.pdf.

Salonitis, K., Zarifis, N., Stournaras, A. (2019). Comparison of the carbon footprint in the manufacturing of cast iron and aluminum engine blocks. *Journal of Cleaner Production, 228*, 52–66. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.265

Sphera Solutions. (2023). *GaBi databases – Industrial LCI data for product sustainability*. https://gabi.sphera.com

Sreng, R. (2016). *Otomotiv endüstrisinde karbon ayakizi* (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.

Stockholm Resilience Centre. (2017). *How SRC contributed to the 2016 Swedish Agenda 2030 High Level Policy Forum report*. Stockholm University. https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2017-02-28-contributions-to-agenda-2030.html

Suksuntornsiri, T. (2020). Embodied greenhouse gas emissions for two different types of tire tread molds. *International Journal of Energy and Environmental Engineering, 11*, 381–390. https://doi.org/10.1007/s40095-020-00338-y

Talu, N. (2019). Türkiye'de iklim değişikliği ile mücadele politikaları, yasal ve kurumsal yapı. *İklim Değişikliği Eğitim Modülleri Serisi, 4*, 5–7.

Turan, R. Ş., Karaer, F. (2019). Bursa Osmangazi Belediyesi kurumsal karbon ayak izi hesabı ve iklim değişikliği uyum çalışmaları. *Su Vakfı, 4*(1), 17–24.

Türkeş, M., Sümer, U. M., Çetiner, G. (2000). Küresel iklim değişikliği ve olası etkileri. In *Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Seminer Notları* (13 Nisan 2000, İstanbul Sanayi Odası) (ss. 7–24). Çevre Bakanlığı, ÇKÖK Genel Müdürlüğü. https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/iklimetkileri.pdf

Tüzel, G. B. (2018). *Sürdürülebilir kalkınma hedefleri ve toplam faktör verimliliği*. Türkiye Cumhuriyeti ve Avrupa Birliği desteğiyle yayımlanmıştır.

United Nations Environment Programme (UNEP). (2018). *HFC emission reports*. https://www.unep.org/resources/report/hfc-emission-reports.

United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). *Emissions gap report 2019*. https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2019.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (1992). *Common but differentiated responsibilities principle*. https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (1997). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. https://unfccc.int/kyoto_protocol.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). *Technical paper on N_2O emissions from industrial sources and mitigation options*. https://unfccc.int/resource/docs/2015/tp/02.pdf.

United Nations. (2021). *Net zero coalition*. https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition.

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2016). *Climate change indicators in the United States* (4th ed., EPA 430-R-16-004). https://www.epa.gov/climate-indicators.

Vikipedi. (2025). *Sürdürülebilir kalkınma amaçları*. Wikipedia. Erişim tarihi: 15.02.2025.

Weidema, B. P., Wesnæs, M. S. (1996). Data quality management for life cycle inventories—An example of using data quality indicators. *Journal of Cleaner Production, 4*(3–4), 167–174. https://doi.org/10.1016/S0959-6526(96)00043-1

Wetherald, R. T., Manabe, S. (1999). Detectability of summer dryness caused by greenhouse warming. *Climatic Change, 43*(3), 459–511. https://doi.org/10.1023/A:1005411924498.

World Meteorological Organization (WMO). (2019). *Greenhouse gas bulletin: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2018*. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21700.

World Resources Institute (WRI), World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2011). *Greenhouse Gas Protocol: Product life cycle accounting and reporting standard*. https://ghgprotocol.org/product-standard

World Trade Organization (WTO). (2022). *Trade and climate change: Carbon border adjustment mechanisms*. WTO Report. https://www.wto.org/english/news_e/news22_e/climate_01jul22_e.htm.

Yang, S., Tang, Y., Zhang, X. (2021). Life cycle sustainability analysis of metal tooling for automotive parts using additive manufacturing. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 9*(6), 2589–2601. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c08445.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-SOYAD **:** Kübra Zekiye YAZIR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2021 Bursa Teknik Üniveristesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği