

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ İLE PLASTİK GERİ KAZANIM
SEKTÖRÜNÜN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Özlem BİLALOĞLU

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

EYLÜL 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ İLE PLASTİK GERİ KAZANIM
SEKTÖRÜNÜN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Özlem BİLALOĞLU

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Aliye Suna ERSES YAY

EYLÜL 2025

Özlem BİLALOĞLU tarafından hazırlanan “Yaşam Döngüsü Analizi İle Plastik Geri Kazanım Sektörünün Çevresel Etkilerinin Belirlenmesi” adlı tez çalışması 10.09.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Doç. Dr. Aliye Suna ERSES YAY(Danışman)**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Berna KIRIL MERT**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr. Öğr. Üyesi Gökhan TÜRKER**
İstanbul Medeniyet Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Yaşam Döngüsü Analizi İle Plastik Geri Kazanım Sektörünün Çevresel Etkilerinin Belirlenmesi” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(10/09/2025).

(imza)

Özlem BİLALOĞLU





Aileme ve arkadaşlarıma,



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının başarıyla tamamlanmasında emeği geçen tüm değerli kişi ve kurumlara en içten minnettarlığımı sunmak benim için bir onurdur.

Başta bu çalışmanın temelini oluşturan, bilimsel disiplini ve eşsiz rehberliğiyle bana her aşamada ışık tutan kıymetli danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Aliye Suna ERSER YAY'a müteşekkirim. Kendisinin engin bilgisi ve sonsuz desteği, bu çalışmanın bilimsel niteliğini en üst seviyeye taşımıştır.

Akademik hayatım boyunca bana her daim inanan, moral ve motivasyon kaynağı olan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Nurtaç Öz'e de gönülden teşekkür ederim. Kendisinin ilham veren duruşu, benim için her zaman çok kıymetli oldu.

Pratik uygulamalar için önemli bir kaynak olan saha çalışmalarında desteklerini esirgemeyen “Şam Yapı A.Ş. Sakarya Şubesi” firmasına ve özellikle Sabri Cem BİNGÖL'e ve değerli çalışanı Çevre Mühendisi Kubilay Duman'a, bu çalışmanın saha araştırmaları ve veri toplama süreçlerinde sağladıkları teknik destek, tesis erişim imkanı ve uzmanlık paylaşımları için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Aileme, bu uzun ve yoğun akademik yolculuğumda bana sonsuz sevgi, sabır ve güven vererek her daim yanımda oldukları için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve düşüncelerimi paylaştığım, zorlu anlarımda yanımda olan, moral desteği sağlayan değerli arkadaşlarıma da bu başarının bir parçası olduklarını bilmelerini isterim.

Bu tez çalışmasına doğrudan veya dolaylı olarak katkıda bulunan herkese en derin saygılarımla teşekkür ederim.

Özlem BİLALOĞLU



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Plastiklerin Tarihçesi ve Gelişimi	3
2.2. Plastik Yapısı ve Türleri	5
2.2.1. Termoplastikler	5
2.2.2. Termoset plastikler	8
2.3. İşletmede Geri Kazanımı Yapılan Plastik Türleri, Özellikleri ve Kullanım Alanları	8
2.3.1. Polietilen (PE)	8
2.3.2. Polipropilen (PP)	9
2.4. Plastik Atık Kaynaklı Çevresel Kirlilik ve Etkileri	9
2.5. Plastik Atıklar Rakamsal Boyutları ve Etkileri	11
2.6. Plastik Üretimi ve Kullanım Alanları	11
2.7. Plastik Atık Kaynakları	11
2.8. Plastik Atıkların Geri Kazanımı İçin Hazırlık Süreçleri Üzerine Değerlendirme	12
2.9. Plastik Atıkların Geri Kazanımı	12
2.10. Plastik Atıkların Geri Kazanılması Üzerine Genel Değerlendirme	13
2.11. Atık Yönetim Hiyerarşisi	14
2.11. Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) Tarihçesi	16
2.12. LCA Tanımı ve Metodolojisi	20
2.13. Yaşam Döngüsü Analizi Aşamaları	21
2.13.1. Amaç ve kapsamın belirlenmesi	21
2.13.2. Envanter analizi	22
2.13.3. Etki değerlendirmesi	23
2.13.4. Yorumlama	23
3. MATERYAL VE YÖNTEM	25
3.1. Tezin Amacı	25
3.2. Çalışmanın İş Akış Proses Şemaları	25
3.2.1. Plastik Atık Geri Kazanım Metodu	26
3.3. Yaşam Döngüsü Analizi	27
3.3.1. Amaç ve kapsamın belirlenmesi (LCA)	27

Atıksu arıtma tesisi çalışma prensibi:.....	34
3.3.2. Yaşam döngüsü envanter analizi.....	36
3.3.3. Etki değerlendirme	42
3.3.4. Yorumlama (Hassasiyet analizi)	42
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	47
4.1. Yaşam Döngüsü Analizi CML-IA Metodu Etki Analizi Sonuçları	47
4.2. Yaşam Döngüsü Analizi ReCiPe Metodu Etki Analizi Sonuçları	52
4.3. Yaşam Döngüsü Analizi IMPACT Metodu Etki Analizi Sonuçları	56
4.3.1. IMPACT karakterizasyon metodu etki analizi sonuçları	56
4.3.2. IMPACT normalizasyon metodu etki analizi sonuçları	60
4.4. “1 kg rLDPE” Granül Üretimi İçin Yapılmış Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi	62
4.5. Birincil ve Geri Dönüştürülmüş Plastik Hammaddelerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi	67
4.5.1. Çalışma bulgularının literatür ile doğrulanması.....	68
4.6. Plastik Malzemelerin Yaşam Döngüsü ve Geri Dönüşüm Yaklaşımları	69
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	77

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BM	: Birleşik Milletler
C	: Karbon
EC	: Avrupa Komisyonu
EPA	: ABD Çevre Koruma Ajansı
GWP	: Küresel Isınma Potansiyeli
GES	: Güneş Enerji Santrali
H	: Hidrojen
HDPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
ILCD	: Uluslararası Referans Yaşam Döngüsü Veri Sistemi
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
LCA	: Life Cycle Assessment (Yaşam Döngüsü Analizi)
LCI	: Yaşam Döngüsü Envanteri
LDPE	: Düşük Yoğunluklu Polietilen
N	: Azot
O	: Oksijen
OEF	: Kuruluş Çevresel Ayak İzi
PA	: Poliamid
PAGEV	: Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı
PC	: Polikarbonat
PE	: Polietilen
PEF	: Ürün Çevresel Ayak İzi
PET	: Polietilen tereftalat
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
PVC	: Polivinil Klorür
rLDPE	: Geri Dönüştürülmüş Düşük Yoğunluklu Polietilen

SETAC	: Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği
TOC	: Toplam Organik Karbon
UNEP	: Birleşmiş Milletler Çevre Programı
UNCLOS	: Birleşmiş Milletler Deniz Hukuku Sözleşmesi
YDA	: Yaşam Döngüsü Analizi
YDEA	: Yaşam Döngüsü Envanter Analizi



SİMGELER

pH	: Hidrojen iyonu konsantrasyonu (Asitlik/Bazlık derecesi)
m³	: Hacim
t	: Zaman
CO₂	: Karbondioksit
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
kWh	: Kilowatt-saat
eq	: Eşdeğer
MJ	: Megajul
CFC-11	: Kloroflorokarbon-11
Sb	: Antimon
DB	: Diklorobenzen
C₂H₄	: Etilen
SO₂	: Kükürt dioksit
PO₄³⁻	: Fosfat iyonu
NO_x	: Azot oksitler
Bq	: Bekerel



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Termoplastiklerin kategorileri [10].....	7
Tablo 2.2. Plastik atıklarla ilgili uluslararası kuruluşlar [28].....	13
Tablo 2.3. LCA tarihinde önemli etkinlikler.	19
Tablo 3.1. Atık kabulüne ait ulaşım verileri.....	37
Tablo 3.2. Ürün sevkiyatına ait ulaşım verileri.	38
Tablo 3.3. Proses girdi ve çıktılarına ait veri envanteri tablosu.	39
Tablo 3.4. 2024 yılı elektrik karışım değerleri (Türkiye, Polonya, Hollanda).	43
Tablo 4.1. “1 kg rLDPE” CML-IA toplu karakterizasyon sonuçları.	47
Tablo 4.2. “1 kg rLDPE” toplu karakterizasyon sonuçları.....	52
Tablo 4.3. “1 kg rLDPE” üretim ve ulaşım kaynaklı IMPACT toplu karakterizasyon sonuçları.	56
Tablo 4.4. “1 kg rLDPE” üretimi IMPACT normalizasyon sonuçları.	60



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Türkiye'de plastik mamul üretiminin sektörel dağılımı [7].	5
Şekil 2.2. Atık yönetim hiyerarşisi piramidi [29].	16
Şekil 2.3. Yaşam Döngüsü Analizi Metodolojisi (ISO 14040:2006) [40].	21
Şekil 2.4. Bir ürünün yaşam döngüsüne ait girdi ve çıktıları.	22
Şekil 3.1. Kabulü yapılan plastik atıklar.	25
Şekil 3.2. Geri kazanım işlemi yapılmış granül formunda ki plastikler.	26
Şekil 3.3. Plastik atık geri kazanım faaliyeti iş akış şeması.	27
Şekil 3.4. Granül üretimi için sistem sınırları.	29
Şekil 3.5. Atık kabulü iş akış şeması.	30
Şekil 3.6. Ayırıştırma işlemi iş akış şeması.	31
Şekil 3.7. Kırma işlemi iş akış şeması.	32
Şekil 3.8. Yıkama ve kurutma işlemi iş akış şeması.	33
Şekil 3.9. Granül hattı iş akış şeması.	34
Şekil 3.10. Atıksu arıtma tesisi akış şeması.	36
Şekil 3.11. Atık kabulü miktar dağılımı.	37
Şekil 3.12. Elektrik kullanımından kaynaklı çevresel etkiler (Türkiye, Polonya, Hollanda).	44
Şekil 4.1. “1 kg rLDPE” yaşam döngüsü CML-IA karakterizasyon analiz sonuçları.	49
Şekil 4.2. Üretim kaynaklı etki oranları (CML-IA metodu).	51
Şekil 4.3. Deniz yolu ulaşım kaynaklı etki oranları(CML-IA metodu).	51
Şekil 4.4. Kara yolu ulaşım kaynaklı etki oranları(CML-IA metodu).	51
Şekil 4.5. “1 kg rLDPE” yaşam döngüsü ReCiPe karakterizasyon analiz sonuçları.	53
Şekil 4.6. Üretim kaynaklı etki oranları (ReCiPe metodu).	55
Şekil 4.7. Deniz yolu ulaşım kaynaklı etki oranları (ReCiPe metodu).	55
Şekil 4.8. Kara yolu ulaşım kaynaklı etki oranları (ReCiPe metodu).	55
Şekil 4.9. “1 kg rLDPE” yaşam döngüsü IMPACT karakterizasyon analiz sonuçları.	57
Şekil 4.10. Üretim kaynaklı etki oranları (IMPACT metodu).	59
Şekil 4.11. Deniz yolu ulaşımından kaynaklı etki oranları (IMPACT metodu).	59
Şekil 4.12. Kara yolu ulaşımından kaynaklı etki oranları (IMPACT metodu).	59
Şekil 4.13. IMPACT normalizasyon etki analiz sonuçları.	61
Şekil 4.14. Yaşam döngüsü envanteri (LCI) SimaPro akış şeması.	63



YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ İLE PLASTİK GERİ KAZANIM SEKTÖRÜNÜN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Plastik atıkların küresel ölçekte artışı, doğal kaynakların hızla tükenmesi, biyoçeşitlilik kaybı ve habitat tahribatı gibi çevresel sorunları her geçen gün daha da derinleştirmektedir. Bu bağlamda, plastik atık geri kazanım faaliyetlerinin önemi, doğrusal ekonomiden dögüsel ekonomiye geçiş sürecinde stratejik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde "kullan-at" modeline dayalı olarak geliştirilen ürünlerin yaygınlığı, çevre üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaya devam etmektedir. Bu çalışma, Türkiye'de tehlikesiz atık plastik geri kazanım sektöründe faaliyet gösteren Şam Yapı A.Ş. Sakarya Şubesi özelinde, 1 kg düşük yoğunluklu polietilen (rLDPE) granül üretiminin çevresel etkilerini Yaşam Dögüsü Değerlendirmesi (LCA) perspektifiyle kapsamlı bir şekilde analiz etmeyi amaçlamıştır.

Araştırmanın metodolojik temelini, bir ürünün yaşam dögüsü boyunca çevresel etkilerinin değerlendirilmesinde uluslararası kabul görmüş bir standart olan Yaşam Dögüsü Değerlendirmesi oluşturmaktadır. Çalışmada, firma operasyonlarından saha çalışması yoluyla titizlikle derlenen envanter verileri, LCA disipliniinde yaygın olarak kullanılan SimaPro yazılımı modelleri aracılığıyla işlenmiş ve nicelleştirilmiştir. Analitik sağlamlığı artırmak amacıyla, CML-IA baseline V3.05, ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.02 ve IMPACT 2002+ V2.14 gibi uluslararası geçerliliği olan çoklu çevresel etki değerlendirme metodolojileri eşzamanlı olarak uygulanmıştır. Bu çoklu metodoloji yaklaşımı, iklim değışikliği, insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynak tükenmesi gibi geniş bir etki kategorisi yelpazesinde, bulguların birbirini doğruladığı ve bütüncül bir perspektif sunulmasını mümkün kılmıştır.

Elde edilen nicel bulgular, rLDPE granül üretiminin çevresel ayak izine ilişkin karmaşık bir tablo ortaya koymuş ve en yüksek katkıya sahip olan süreçleri net bir şekilde tanımlamıştır. Analiz sonuçları, insan sağlığı ve ekosistem kalitesi üzerindeki en baskın çevresel etkilerin, tesisin dahili üretim proseslerinden kaynaklandığını açıkça göstermiştir. Özellikle, ekstrüzyon, eritme ve peletleme gibi yüksek enerji gerektiren adımları içeren granül hattı prosesi ile plastik atıkların dekontaminasyonu için kritik öneme sahip, yoğun su ve enerji tüketen yıkama hattı prosesi, toplam çevresel yük içinde en yüksek paya sahip olarak belirlenmiştir. Bu proseslerin elektrik tüketimi, iklim değışikliği ve fosil kaynak tükenmesi kategorilerinde doğrudan ve önemli bir etkiye sebep olmaktadır.

Tesis sınırları ötesinde, lojistik ve tedarik zinciri faaliyetlerinin de işletmenin genel çevresel ayak izi üzerinde kayda değer bir paya sahip olduğu tespit edilmiştir. Hammaddelerin büyük çoğunluğunun deniz yolu ve nihai etapta kara yolu taşımacılığı ile yurt dışından tedarik ediliyor olması, bu süreci önemli kılmaktadır. Uzun mesafeli taşımacılık, yakıt tüketimine bağlı olarak iklim değışikliği, atmosferik emisyonlar yoluyla ekosistem kalitesi ve fosil kaynak tüketimi kategorilerinde ölçülebilir ve ciddi etkiler yaratmaktadır.

Bununla birlikte, çalışmanın bir diğer önemli bulgusu, firmanın uygulamakta olduğu proaktif çevre yönetimi uygulamalarının, mutlak çevresel yükü dengeleyici ve azaltıcı nitelikte olmasıdır. Şam Yapı A.Ş.'nin hayata geçirdiği temiz üretim teknolojileri arasında, yıkama hattından çıkan atıksuların tesis içindeki arıtma ünitesinde arıtılarak kapalı devre sistemde yeniden kullanıma sunulması yer almaktadır. Bu uygulama, tatlı su tüketimini ve atıksu deşarjını asgari seviyeye indirgeyerek tesisin su ayak izinde kayda değer bir iyileşme sağlamaktadır. Benzer şekilde, tesis çatısına kurulu güneş enerjisi panelleri ile elektrik ihtiyacının bir bölümünün yenilenebilir kaynaklardan karşılanması, şebeke elektriğine bağlı karbon emisyonlarını ve fosil kaynak tüketimini doğrudan azaltmaktadır. Söz konusu sürdürülebilir uygulamalar, üretim proseslerinden kaynaklanan kaçınılmaz çevresel etkileri hafifletmede kilit rol oynamakta ve firmanın genel sürdürülebilirlik performansını yukarı taşımaktadır.

Çalışmanın sonucunda, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi bulguları ışığında, tesisin çevresel performansını daha da iyileştirmek amacıyla bir dizi stratejik öneri geliştirilmiştir. Bu öneriler arasında, granül hattı ve yıkama hattı gibi enerji ve suyun yoğun kullanıldığı proseslerde verimlilik artırıcı teknolojik iyileştirmelerin hayata geçirilmesi, yenilenebilir enerji kullanım payının kapasite artırımı yoluyla daha da yükseltilmesi ve ithalata dayalı lojistik süreçlerin, özellikle kara yolu taşımacılığının çevresel maliyetini azaltmak amacıyla tedarik zincirinin optimize edilmesi ve yerel kaynak temininin değerlendirilmesi yer almaktadır. Bu araştırmanın, plastik geri kazanım sektöründeki sürdürülebilirlik çabalarına bilimsel ve veriye dayalı bir zemin sağlayacağı, benzer işletmeler için çevresel performans iyileştirme yol haritaları sunacağı ve böylece döngüsel ekonomi prensiplerinin endüstriyel ölçekte yaygınlaşmasına ve etkin bir şekilde içselleştirilmesine katkıda bulunacağı öngörülmektedir.

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF THE PLASTIC RECYCLING SECTOR

SUMMARY

The escalating crisis of plastic waste on a global scale represents one of the most critical environmental challenges of our time, profoundly intensifying a suite of interconnected problems including the rapid depletion of finite natural resources, alarming rates of biodiversity loss, and widespread habitat destruction. This linear "use-dispose model" economic model is increasingly recognized as unsustainable, creating immense pressure on planetary systems. Consequently, the strategic imperative to transition towards a circular economy, which prioritizes resource efficiency and waste elimination, has elevated the importance of plastic recovery and recycling activities from a simple waste management solution to a fundamental pillar of sustainable industrial policy. This thesis addresses this urgent global context by conducting a meticulous and quantitative environmental analysis of a specific operation within Turkey's non-hazardous plastic waste recovery sector. The study focuses explicitly on the operations of "Şam Yapı A.Ş. Sakarya Branch," with the core objective of quantifying and evaluating the environmental impacts associated with the production of one kilogram of recycled low-density polyethylene (rLDPE) granule. The aim is to move beyond generalized assumptions and provide a data-driven, granular understanding of the environmental costs and benefits inherent in the recycling process, thereby offering actionable insights for improving sustainability within the industry.

The methodological foundation of this research is a comprehensive Life Cycle Assessment (LCA), conducted in accordance with the ISO 14040 and 14044 standards, which provides a structured framework for evaluating the environmental aspects and potential impacts associated with a product throughout its entire life cycle. For this study, the system boundaries encompassed the journey from the acquisition of post-consumer plastic waste as a raw material to the final output of rLDPE granule, a valuable secondary raw material for manufacturing. To ensure methodological rigor and reliability, a detailed inventory of all relevant inputs (including energy, water, and transportation) and outputs (such as emissions to air and water) was compiled through direct field studies and meticulous data collection from the facility's operations. This robust inventory dataset was then modeled and analyzed using the SimaPro software, a leading tool in the LCA discipline renowned for its extensive databases and analytical capabilities. A defining strength of this study is its multi-methodological approach to impact assessment. To ensure analytical robustness and provide a cross-validated, holistic perspective, three distinct, internationally recognized impact assessment methods were applied concurrently: CML-IA baseline V3.05, ReCiPe 2016 Midpoint (H), and IMPACT 2002+. This tripartite approach ensured that the findings were not an artifact of a single modeling choice, thereby offering a reliable and multi-faceted perspective across a wide spectrum of impact categories, including climate change, human health, ecosystem quality and resource depletion.

The quantitative results of the LCA present a detailed and nuanced picture of the environmental footprint of rLDPE granule production, successfully identifying and quantifying the specific processes that function as environmental "hotspots." The analysis unequivocally demonstrated that the most significant environmental impacts, particularly on human health and ecosystem quality, originate from within the facility's production boundaries. Two operational lines were identified as the primary contributors to the total environmental burden. The first is the granule line process, which includes energy-intensive stages such as extrusion, melting, and pelletizing. The substantial electricity demand for these thermal and mechanical processes directly translated into major contributions to impact categories like global warming potential (due to carbon emissions from the electricity grid) and fossil resource depletion. The second major hotspot is the washing line process, which is critical for the decontamination of incoming plastic waste. This process exhibited a significant environmental footprint due to its dual dependence on high volumes of water and the energy required for heating, pumping, and machinery operation, making it a key driver of the facility's water footprint and associated energy related emissions.

Beyond the factory gates, the study determined that logistical and supply chain activities constitute a considerable and often underappreciated portion of the overall environmental footprint. A pivotal finding was the facility's heavy reliance on imported plastic waste, which necessitates long-distance international transportation via a combination of maritime shipping and, more impactfully, extensive road freight. This logistics network was shown to generate substantial emissions, with measurable and serious effects in categories such as climate change from fuel combustion, ecosystem quality from atmospheric pollutants, and resource consumption from the use of diesel and other fossil fuels. However, a crucial and positive finding of the research was the identification and evaluation of the company's proactive environmental management practices, which serve to effectively mitigate the absolute environmental load of its operations. Notably, the implementation of a closed-loop water management system, where wastewater from the washing line is treated on-site and reused within the process, dramatically reduces freshwater consumption and minimizes polluted discharge. Similarly, the partial integration of solar energy via rooftop panels directly displaces grid electricity, thereby reducing the carbon footprint and fossil resource depletion associated with the plant's energy-intensive operations. These clean production technologies play a vital role in counterbalancing the inherent impacts of production and elevate the company's overall sustainability performance.

Based on the empirical evidence generated by the Life Cycle Assessment (LCA), this study culminates in the formulation of a series of strategic, evidence-based recommendations, which are meticulously designed to guide the facility toward a state of significantly reduced environmental footprint. These proposals are strategically targeted at the environmental hotspots (specifically, the granule production line, the washing process, and the logistics network) identified by the comprehensive analysis. The recommendations include, first, pursuing advanced energy and water efficiency measures within the granule and washing lines, a critical intervention given their high consumption profiles. This could involve the adoption of high-efficiency motors, the implementation of advanced process control systems for optimal resource utilization, and the integration of heat recovery technologies to capture and reuse waste thermal energy.

Concurrently, a second, and equally critical, recommendation advocates for a substantial expansion of on-site renewable energy generation capacity. Increasing the

share of solar power, for instance, is paramount to achieving a deeper decarbonization of the facility's electricity supply, thereby directly mitigating the carbon intensity embedded in its core manufacturing processes and reducing its reliance on the fossil fuel-based grid. A third strategic axis focuses on the comprehensive optimization of the logistical supply chain, which was revealed as a major contributor to the overall impact. This optimization necessitates a multi-faceted approach, including the implementation of advanced logistics software for route and load factor optimization (to minimize fuel consumption per ton-kilometer), the investigation and execution of modal shifts (from high-impact road transport to more environmentally benign alternatives, such as rail, where infrastructure and economics permit), and a strategic, long-term initiative to source a greater proportion of post-consumer plastic waste from local or domestic markets. This latter initiative is crucial for curtailing the substantial environmental costs, particularly greenhouse gas emissions and air pollutants, associated with long-distance, import-dependent transportation.

It is therefore anticipated that the granular findings and the robust methodological framework presented in this thesis will provide a solid, scientific, and data-driven foundation for substantively enhancing sustainability practices within the broader plastic recovery sector. By offering a transparent, rigorous, and methodologically sound case study, this research provides concrete and actionable roadmaps for analogous enterprises (including recyclers and compounders) seeking to benchmark, diagnose, and improve their environmental performance. Ultimately, it is projected that this work will contribute meaningfully to the wider adoption, nuanced understanding, and effective operational implementation of circular economy principles on an industrial scale, thereby supporting the essential and ongoing transition towards a more sustainable, resilient, and resource-efficient future for the plastics industry.



1. GİRİŞ

Plastik kullanımı, günümüz modern yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Nüfus artışı, teknolojik gelişmeler, üretim ve kullanım kolaylığı gibi faktörler, plastik türevli malzemelerin her alanda yaygınlaşmasına yol açmıştır. Bu durum, plastik tüketimini ivmelendirirken, doğrudan orantılı olarak plastik atık oluşumunu da küresel bir çevre sorununa dönüştürmüştür. Doğada uzun süre çözünmeden kalabilen plastikler, çevre kirliliğinin en büyük kaynaklarından biri haline gelmiştir. Günümüzde artan çevre kirlilikleri ile ilgili haberlerde ve sosyal medyada paylaşımlar yapılması, insanların doğal kaynakları koruma yönünde bilincinin gelişmesini sağlamıştır. Bu bağlamda, plastik atıkların geri kazanılması çevresel kirliliğin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Endüstriyel kuruluşlarda proses sonucu elde edilen ürünlerin süreçleri çevreye olan etkilerinin önemli bir boyut kazanması ve faaliyetleri sonucunda oluşabilecek veya oluşması muhtemel çevre kirliliklerinin en aza indirgenmesi yönünde çalışmalara yöneltmiştir.

Artan çevre kirliliği farkındalığı, bireylerin ve kuruluşların doğal kaynakları koruma yönünde ki bilincinin gelişmesini sağlamıştır. Bu bağlamda, plastik atıkların geri kazanılması, hem çevresel kirliliğin azaltılması hem de kaynak verimliliğinin artırılması açısından hayati bir önem taşımaktadır. Endüstriyel kuruluşlar, faaliyetleri sonucunda oluşabilecek çevresel etkilerin önemini idrak ederek, kirliliğin en aza indirgenmesi yönünde proaktif çalışmalar yürütmektedir. Çevreci yaklaşımların benimsenmesi, endüstriyel sürdürülebilirliği temel bir iş pratiği haline getirmiştir.

Sürdürülebilirlik kavramı, günümüzde sadece çevresel boyutta değil, ekonomik ve sosyal boyutlarda da geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Bu popüler yaklaşımın temelinde, bir ürün veya hizmetin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini bütünsel olarak değerlendiren yaşam döngüsü yaklaşımı (LCA) yatmaktadır. Gerçek bir çevresel sürdürülebilirlik anlayışı için LCA, sadece bir yasal zorunluluk olarak değil, endüstriyel sorumluluğun ve sürekli iyileştirmenin bir ilkesi olarak ele alınmalıdır. Zira, plastik geri kazanım süreçleri de kendi içinde enerji ve kaynak tüketimi

barındırdığından, bu süreçlerin çevresel faydalarının yanı sıra potansiyel yüklerinin de bütünsel bir yaklaşımla değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışması, Türkiye'de tehlikesiz atık plastik geri kazanım sektöründe faaliyet gösteren “ŞAM YAPI A.Ş SAKARYA ŞUBESİ” özelinde gerçekleştirilmiştir. Bu tesisin plastik geri kazanım sürecinin yaşam döngüsü analizi perspektifinden çevresel etkilerini değerlendirmek ve sektördeki sürdürülebilirlik potansiyelinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma, geri kazanım faaliyetinin çevresel yüklerini ve faydalarını şeffaf bir şekilde ortaya koyarak, hem ilgili firma hem de sektördeki diğer paydaşlar için çevresel performans iyileştirme stratejilerine bilimsel bir zemin sunmayı hedeflemektedir.

Bu çerçevede, plastik atık geri kazanımının gerçekleştirildiği aşamalardaki çevresel etkiler ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve bu etkilerin hesaplaması yapılmıştır. Spesifik olarak, bu çalışmanın amacı aşağıdaki hedeflere odaklanmaktadır:

- Plastik geri kazanımının her aşamasındaki çevresel etkileri tanımlamak ve bu etkilerin büyüklüğünü ölçmek.
- Plastik geri kazanım süreçlerinde enerji tüketimi, su kullanımı, sera gazı salınımı ve atık üretimi gibi çevresel parametreleri değerlendirmek.
- Plastik geri kazanımının çevresel etkilerini azaltmaya yönelik stratejiler geliştirmek ve sektörün sürdürülebilirliğine katkı sağlamak.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Plastiklerin Tarihçesi ve Gelişimi

Plastiklerin tarihsel gelişimi, endüstriyel kuruluşların şekillenmesinde kritik bir rol oynamıştır. Bu köklü dönüşüm, 19. yüzyılda doğal polimerlerle başlayan, 20. yüzyılda sentetik malzemelerle devrim yaratan ve günümüzde sürdürülebilirlik tartışmalarıyla şekillenen bir süreç olarak karşımıza çıkmaktadır.

İngiliz mucit John Osborne 17. yüzyılda doğal bir plastik olan boynuzu ısıtıp kalıplaştırmıştır. 19. yy da orta gelirli insanların boynuz endüstrisini keşfetmesi ile bu sektör hızla gelişmiştir. 1847’de tropikal ağaçlardan elde edilen sakızlar özellikle kauçuk ve gutta percha olağanüstü bir ilgi görmüştür. Gutta percha 1850’lerde telgraf tellerinin kaplanarak korunması amacı ile kullanılmaya başlanmıştır. Thomas Hankok bu malzeme ile çok ilgilenen kişilerden olmasına rağmen kauçuğun vulkanizasyonu ile tanınmaktadır. Aynı zamanlarda Amerika’da Goodyear da ilk bilinçli kimyasal modifikasyon olan vulkanizasyonla ilgilenmekteydi. Hancock ve Goodyear’ın birbirlerinden habersiz olarak yürüttükleri çalışmalar doğal polimerler üzerine bilinçli olarak uygulanan ilk modifikasyondur. Yarı sentetik plastiklerin tarihçesi 100 yıl önceye dayanır, fakat diğer malzemelere kıyasla plastikler aralarında en modern olanıdır. Geçtiğimiz yüzyılda plastiklerin kullanımı, toplumu milenyuma taşıyacak teknolojik ilerlemelere yol açmıştır. Ticari olarak yapılan ilk plastikler yarı sentetiktir. Bunlar, genellikle pamuk artıklarından elde edilen selülozdan üretilmiştir. İnsan yapısı ilk plastik Alexander Parkes tarafından 1862 yılında pamuk artıklarının nitrik asitle muamelesi sonucu keşfedilmiştir. (Selüloz nitrat). Alexander Parkes kolayca şekillendirilen ve biçimlendirilen bu plastiğe Parkesin adını vermiştir. Bu malzeme kullanılarak takılar, bıçak sapları, kutular ve daha birçok ürün üretilmiştir. Parkesin’ in küçük miktarlarda hazırlanması kolay olmuş, ancak bu yarı sentetik plastik endüstriyel olarak üretilmemiştir. 1870 yılında Amerikalı matbaacı John Wesley Hyatt, ticari bakımdan ilk başarılı plastik olan Selüloid’i üretmiştir. Bu keşif fildişinin ve kaplumbağa kabuğunun yerine kullanılabilecek bir materyal oluşturulmasını sağlamıştır. Selüloid, bilardo topları, bıçak sapları ve fotoğraf filmi gibi birçok ürünün

yapımında kullanılmıştır. Selüloz nitrat türevlerinin yanıcı özelliği sahip olmaları kullanım alanlarını kısıtladığından 1900'lerin başlarında selüloz asetat kullanılmaya başlanmıştır [1].

İlk sentetik plastik olan bakalit, 1907 yılında Leo Baekeland tarafından icat edilmiştir [2]. Leo Baekeland tarafından keşfi, malzeme biliminde bir dönüm noktası oluşturmuş; ardından gelen polimer teknolojileri, tıptan inşaata kadar sayısız alanda devrim yaratmıştır. Ancak bu ucuz ve dayanıklı malzemenin yaygınlaşması, aynı zamanda geri dönüşüm sistemlerinin yetersizliği ve doğada uzun süreli kalıcılığı nedeniyle küresel bir çevre krizine de yol açmıştır.

Plastiğin kullanım alanının genişlediği diğer bir alan müzik sektörüdür. 19. yüzyıl ortalarına kadar insanlar sadece canlı müzik dinlerken, plastiğin geliştirilmesiyle kayıt imkânlarının gelişmesinden dolayı müziğe erişim halk arasında yaygın hale gelmiştir. 19. yüzyılda Thomas Edison fonograf silindirini icat etmiş ve fonograflara mum yoluyla kayıt yapıp dinleyebilmeyi başarmıştır; böylece plastik sayesinde kayıtlar daha dayanıklı hale gelmiş ve daha uzun ömürlü olmuştur. Plastikten plak, kaset ve CD'nin icadıyla müzik gittikçe daha geniş halk kitlelerine ulaşmıştır. Plastik kullanımının yaygınlaşması, zamanla sinema sektörünün gelişmesine de katkı sağlamıştır. Kâğıttan yapılan ilk film bobinleri selüloidin bulunmasının ardından, onun daha dayanıklı ve kolay şekillendirilebilir nitelikte olması selüloidin sinema filmlerinde kullanılması için bir alternatif haline getirmiştir. Selüloidin sinema sektörüne girişiyle birlikte başta Hollywood filmleri olmak üzere dünyada filmlerin daha yaygın bir biçimde dağıtılmasının önü açılmıştır [3].

İkinci Dünya Savaşı, plastik teknolojisinde önemli atılımlara sahne olmuştur. Özellikle polietilen ve polistiren gibi malzemelerin askeri ihtiyaçlar doğrultusunda geliştirilmesi, endüstrinin yönünü değiştirmiştir. Naylonun keşif süreci ise ilginç bir örnek teşkil eder: 1920'lerde laboratuvar ortamında sentezlenen bu malzeme, ancak 1940'larda askeri uygulamalarla (paraşüt üretimi gibi) değer kazanmış ve sonrasında sivil alanda yaygınlaşmıştır. Bu dönemdeki buluşlar, plastiklerin günlük yaşamdaki vazgeçilmez konumunu hazırlayan temel taşlar olarak görülebilir.

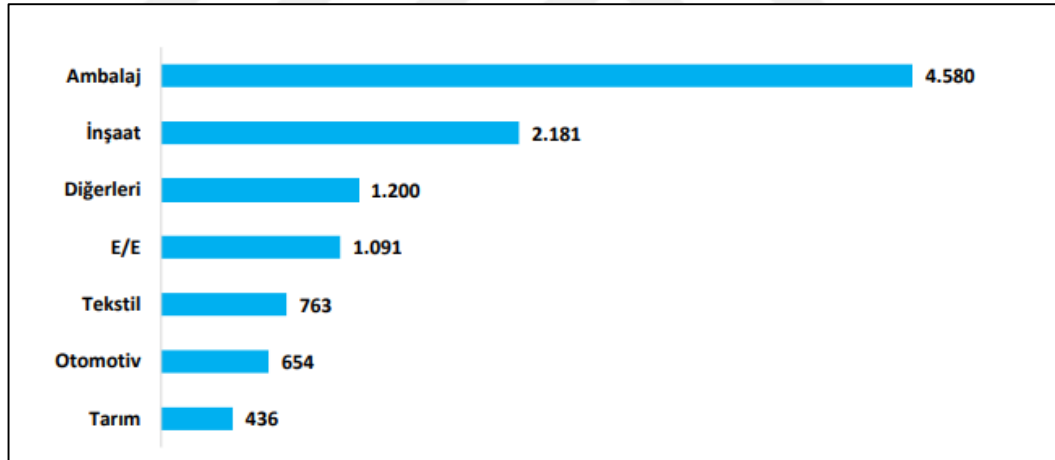
Diğer taraftan 1950 yılından günümüze değin plastiklerin farklı türleri; otomobil yan sanayinde, bahçe mobilyalarında, paketleme, elektronik ve beyaz eşyaların plastik kısımları, pet, fiber, diş fırçası kılları, misina, boru, profil, CD, gözlük, yiyecek paketleme, yapı ve inşaat malzemeleri, teflon tava, pek çok çözücüye ve aside karşı

dirençli tıbbi malzeme ve fiber üretimi gibi sektörlerde yoğun bir şekilde kullanılmaya devam etmiştir [4].

2.2. Plastik Yapısı ve Türleri

Plastiklerin temel yapısı organik kökenli polimelerden oluşmaktadır. Karbon (C), Hidrojen (H), Oksijen (O) ve Azot (N) elementlerini içermektedir. Hammadde kaynakları fosil kökenlidir. %99 petrol, doğal gaz ve kömürden üretilmektedir. Bazı katkı maddeleri ile karıştırıldığından inorganik kökenli de olabilir. Ancak çoğu plastik temelde organik karakter taşımaktadır.

Plastiklerin çeşitliliği oldukça geniştir ve kullanım alanlarına göre farklı türleri bulunmaktadır [5]. Günümüzde, sayısız plastik ürün üretmek için 25'ten fazla farklı plastik malzeme türü ve yaklaşık 8000 farklı sınıf kullanılıyor [6]. PAGEV 2023 Raporunda belirtilen Türkiye’de ki plastik mamul üretiminin sektör dağılımı “Alt Sektörler Bazında Plastik Mamul Üretimi (1.000 ton) - 2023 grafiği” Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Türkiye’de plastik mamul üretiminin sektörel dağılımı [7].

Plastikler genellikle iki ana polimer ailesi altında sınıflandırılır: Termoplastikler ve termosetler. Termoplastikler, ısıtıldıklarında erir ve soğutulduklarında yeniden sertleşirler [8]. Özetle, plastik malzemeler ısı davranış açısından termoset(ısı sertleşir) ve termoplastik (ısı yumuşar) olmak üzere başlıca iki sınıfa ayrılmaktadır.

2.2.1. Termoplastikler

Termoplastik polimerler, "zincirler arası sadece zayıf van der Waals kuvvetleri veya hidrojen bağları bulunan, ısıtıldığında bu etkileşimlerin kırılmasıyla viskoelastik hale gelen lineer makromoleküller" olarak tanımlanmaktadır [9].

Termoplastik polimerler, günlük hayatta kullanılan plastik malzemelerin büyük çoğunluğunu oluşturan ve ısıl işlemlerle tekrar tekrar şekillendirilebilen önemli bir malzeme grubunu temsil etmektedir. Bu malzemelerin en karakteristik özelliği, ısıtılma durumunda yumuşayarak akışkan hale gelmeleri ve bu durumdayken çeşitli mekanik yöntemlerle istenilen forma dönüştürülebilmeleridir. Soğutulduklarında ise başlangıçtaki sert ve dayanıklı hallerine geri dönmektedirler.

Termoplastiklerin bu davranış biçimi, kimyasal yapılarında herhangi bir değişiklik olmaksızın yalnızca fiziksel dönüşüm geçirmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, malzemenin moleküler yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Termoplastikler, çok sayıda uzun polimer zincirlerinin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Söz konusu polimer zincirleri, ısı enerjisi uygulandığında birbirlerinden uzaklaşarak gevşemekte ve böylece malzeme yumuşak bir karakter kazanmaktadır. Soğutma işlemi uygulandığında ise bu zincirler tekrar birbirine yaklaşarak iç içe geçmekte ve malzeme orijinal sertliğine kavuşmaktadır. Bu özellikleri sayesinde termoplastikler, geri dönüşüm süreçlerine son derece uygun malzemelerdir. Isıl işlemlerle defalarca şekillendirilebilmeleri, bu malzemelerin sürdürülebilirlik açısından önemini artırmaktadır. Ancak, her ısıl işlem döngüsünde malzemenin mekanik özelliklerinde bir miktar bozulma meydana gelebileceği de unutulmamalıdır. Termoplastik malzemelere örnek olarak PA, PE, PET, PP, PS ve PVC türleri verilmektedir. Termoplastik kategorilerine göre örnek kullanım alanların Tablo.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Termoplastiklerin kategorileri [10].

Tip	Kısaltma	Tanım	Örnek Kullanım
Polietilen Tereftalat	PET	Polyester ekstrüde edilmiş ve kalıplanmış. Şeffaf, güçlü ve hafif	Plastik şişeler (su, meşrubat) ve diğer birçok tüketici ürününün ambalajı olarak
Yüksek Yoğunluklu Polietilen	HDPE	Orta düzeyde opaklık, LDPE'ye kıyasla daha az esnek	Süt sürahileri, su şişeleri, şampuan şişeleri, motor yağı kapları, saksılar, kovalar, oyuncaklar
Polivinil klorür	PVC	Güçlü, hafif. Plastikleştiriciler eklenerek daha esnek hale getirilebilir	Sihhi tesisat boruları, kapılar, pencereler, kredi kartları, kablo kılıfları, bahçe hortumları, oyuncaklar
Düşük Yoğunluklu Polietilen	LDPE	Yüksek netlik ve orta düzeyde esneme	Plastik torbalar, sıkılabilir şişeler, gıda kapları, balonlu naylon, tek kullanımlık bardaklar, kağıt kartonlar için kaplamalar
Polipropilen	PP	Dayanıklı ve pürüzsüz bir yüzeye sahiptir.	Şişe kapakları, yoğurt ve margarin kapları, pipetler, sıcak yemek kapları, araba parçaları, tek kullanımlık bezler
Polistiren	PS	Belirli bir sertliğe sahip ekonomik plastikler	Tek kullanımlık köpük bardaklar, paket servis yiyecek kapları, plastik çatal bıçak takımı, askılar, köpük ambalajlar
Polikarbonat	PC	Şeffaf, yüksek darbe dayanımı	Göz koruması, kırılmaz camlar, UV ışınlarına dayanıklı camlar, bariyerler, çitler

2.2.2. Termoset plastikler

Termoset plastikler, "ısıtıl işlem sırasında geri dönüşümsüz kimyasal reaksiyonlar sonucu üç boyutlu çapraz bağlı ağ yapısı oluşturan polimerler" olarak tanımlanmaktadır [11].

Genel amaçlı termosetler, ortalama (termosetlerde) mekanik özellikler, sıcaklığa karşı daha düşük direnç, daha yüksek genleşme katsayıları ve düşük maliyetli/emtia benzeri üretim ve satış (ton/yıl) ile karakterize edilir. Mühendislik termosetleri daha yüksek mekanik özelliklere ve sıcaklık direncine sahiptir ve daha dayanıklı oldukları düşünülür. Daha pahalıdır ve orta düzeyde bir üretim hacmine sahiptirler. Yüksek sıcaklık termosetleri, genellikle uzun süreler boyunca 400°F'nin üzerindeki sıcaklıklara dayanabilir, ancak mukavemetlerini, yapışkanlıklarını, termal ve elektriksel direnç özelliklerini korurlar. Maliyetler genellikle daha yüksektir ve üretim yöntemleri oldukça karmaşık olabilir [12].

2.3. İşletmede Geri Kazanımı Yapılan Plastik Türleri, Özellikleri ve Kullanım Alanları

2.3.1. Polietilen (PE)

Yaygın polimerlerden polietilen (PE), daha iyi bilinen ve en çok kullanılanlardan biridir. Etilen monomerinin eklem polimerizasyonu yoluyla oluşturulur. PE, büyük ölçüde moleküler ağırlığına bağlı olan çok çeşitli özellikler gösterir. PE ayrıca ekstrüzyonla işlenebilir. Ancak, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek yoğunluklu polietilenden (HDPE) daha kolay ekstrüde edilebilir. PE, yarı kristalin bir polimerdir . Çoğu market poşeti PE'den üretilir [13].

Polietilen malzemler yüksek yoğunluklu (HDPE) ve düşük yoğunluklu (LDPE) olarak iki farklı türe ayrılmaktadır.

- **Düşük yoğunluklu polietilenler;** Esnek, yarı ışık geçirgenliğine sahip, mumsu yapıda, düşük sıcaklıklara dayanıklı ve ucuzdur. Genel olarak gaz ve su boruları, plastik poşet ve diğer paketleme ürünleri (özellikle gıda ürünlerinin paketlenmesi) ve çok çeşitli numune ve saklama kapları yapımında kullanılırlar.
- **Yüksek yoğunluklu polietilenler;** HDPE, diğerlerine kıyasla doğrusal bir yapıya sahip, düşük dallanma derecesine sahip düşük maliyetli bir termoplastiktir. Düşük basınç (10-80 bar) ve düşük sıcaklık (70-300 °C) altında

üretir. HDPE'nin yaygın kullanımları arasında sabun kapları ve temizlik solüsyonları, dondurucu poşetleri, alışveriş poşetleri, suni ahşap tahtalar, yiyecek ve içecek saklama, borular, koruyucu kasklar, şişe kapakları, araç yakıt depoları, geri dönüştürülmüş ahşap-plastik kompozitler ve yalıtım bulunur [14].

2.3.2. Polipropilen (PP)

Ambalaj endüstrisi polipropilene en çok talep gösteren endüstridir ve bu nedenle gelecekte pazarın büyümesi beklenmektedir. Yüksek çekme mukavemeti , daha iyi yüzey kalitesi, üstün bariyer özellikleri ve düşük maliyet, polipropilene çeşitli ambalaj uygulamaları için ideal bir ürün olarak tanımlar [15].

PP, kovalar, alet kavanozları (klinik ortam kullanımı için sıklıkla temizlenebilir), huniler, tepsiler ve şişeler dahil olmak üzere farklı ev eşyaları üretme yeteneğine sahiptir ve yüksek önceliğe sahiptir. Polipropilen , polietilenden daha uygun bir kullanım sağlayan mükemmel mekanik özellikler gösteren renksiz bir malzemedir. Polipropilen genellikle paketlenme bandında, yemek kutularında, cips paketlerinde, pipetlerde, yiyecek kaplarında, şişe kapaklarında, giysilerde, hobi modellerinde, malzemelerde ve cerrahi alet ve malzemelerinde kullanılır [14].

2.4. Plastik Atık Kaynaklı Çevresel Kirlilik ve Etkileri

Plastik sektöründe ki sanayi kuruluşları, sera gazı etkisinin potansiyel kirleticiler kategorisinde yer almaktadır.

Plastik kirliliği, bir ekosistemde plastik nesnelerin ve parçacıkların çevreyi olumsuz yönde etkileyecek şekilde birikmesidir. Plastik kirleticiler boyutlarına göre makro, mezo veya mikro atık olarak sınıflandırılmaktadır [16].

20. yüzyıl öncesi dönemde plastik atıklardan kaynaklı çevresel kirliliğin etkisi ciddi bir sorun olarak kayıtlara geçmemiştir. Bunun sebebi küresel ölçekte sanayileşmenin fazla yaygınlaşmaması, plastik malzemelerin günlük yaşamda kullanımı az olduğundan ve kullanım ile doğru orantılı şekilde plastik atıklar fazla olmadığından canlılar için riskli görülen bir tehlike arz etmiyordu ve çevre sorunu olarak algılanmıyordu. 20. yüzyıldan itibaren tüketim kültürünün plastik malzeme temelli bağımlı hale gelmesi, tek kullanımlık plastik malzemelerinin kullanımının artması ve

aynı doğrultuda plastik atıkların artmasıyla başta insanlar olmak üzere tüm canlılar ve çevre için ekosistemin doğal yapısının bozulmasıyla tehlike arz etmeye başlamıştır.

Güncel araştırmalar neticesinde, plastiklerin neden ekosistem için en tehlikeli atıkların başında geldiği ise üretilen plastiklerin %99'a yakın kısmının petrol, doğal gaz ve kömür gibi yenilenemeyen fosil yakıtlarından %1'lik kısmının ise nişasta, selüloz, şeker ve bitkisel yağ gibi çeşitli biyobazlı polimelerden üretilmesinden kaynaklanmaktadır.

Fosil yakıtların plastik üretmek üzere işlenmesi esnasında çevreye, geri dönüşü olmayan zararları var ve plastiğin imalatı sırasında çok miktarda zararlı gaz ve atıklar çevreye bırakılmaktadır [17]. Bu üretim sürecinde atmosfere salınan yoğun sera gazları, uçucu organik bileşikler ve diğer zararlı emisyonları hem küresel iklim değişikliğini artırmaktadır hemde çevresel kirliliğe yol açmaktadır. Özellikle petrokimya endüstri tesislerinde gerçekleşen kırma ve polimerizasyon işlemleri sırasında ortaya çıkan atıksular ve katı atıklar, çevreye karışarak uzun vadeli kirlilik gerçekleştirmektedir.

Plastik malzemelerin üretim proseslerinde, yüksek enerji gereksinimi nedeniyle önemli ölçüde karbon emisyonuna yol açmaktadır. Yapılan yaşam döngüsü analizlerinde, plastik üretiminin birim başına düşen sera gazı salınımının diğer endüstriyel üretim süreçleriyle karşılaştırıldığında önemli ölçüde aştığını ortaya koymaktadır. Fosil yakıt kaynaklı hammaddelerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan bu yüksek karbon ayak izi, plastik endüstrisinin sürdürülebilirlik açısından en kritik zorluklarından birini oluşturmaktadır.

Plastiklerin çevreye verdiği zararlar sadece bunlarla kalmayıp doğada çözülmesi çok uzun yıllar alması ve uzun süren yok olma sürecinde ekolojik döngüye dahil olmaktadır. Besin zincirinden girerek toprağa, suya ve havaya verdiği çevresel kirlilik sebebiyle ekosistemin dengesini bozmaktadır.

Sonuç olarak plastik malzemelerin üretilmesi, kullanılması ve sonrasında atık oluşumu sorunu antropojenik çevresel kirlilik etkilerinin en belirgin göstergelerinden biri haline gelmiş ve çevre politikalarının merkezinde yer almaya başlamıştır. Bu durum artık sürdürülebilir malzeme yönetiminin benimsenmesini ve döngüsel ekonomi yaklaşımlarını zorunlu kılmaktadır.

2.5. Plastik Atıklar Rakamsal Boyutları ve Etkileri

Son otuz yılda, küresel plastik üretimi ve hane halkı ile sanayiler tarafından üretilen atık miktarları büyük oranda artış göstermektedir. 2050 yılına kadar biriken plastik atıkların 26 milyar tona ulaşacağı tahmin edilmektedir [18].

Diğer taraftan yıllık üretiminin 420 milyon tonu geçen plastiklerin yaklaşık %12'si yakılmakta ve sadece %9'u geri dönüştürülmektedir (UNEP, 2022 raporu). Burada akıllara gelen diğer soru ise geri dönüştürülen ve yakılan plastikler toplam plastik üretiminin %21'i iken geri kalan %79 oranında plastikler nereye gitmektedir? En bilinen geleneksel yöntemlerle çöplüklere atıldığını ya da okyanuslar da dâhil olmak üzere su ekosistemlerine salınmakta olduğunu söyleyebiliriz. Özellikle gelecek dönemlerde plastik yönetimiyle ilgili etkin çözümler ve uygulamalar hayata geçirilmediği takdirde, su ekosistemlerinde birikecek plastik atıkların 2040 yılında yaklaşık 29 milyon tona çıkacağı tahmin edilmektedir [19]. Yıllık küresel plastik üretimi 460 milyon tona ulaşmıştır [20].

2.6. Plastik Üretimi ve Kullanım Alanları

Dünyada üretilen petrolün yaklaşık %6-8'i plastik üretiminde kullanılmaktadır [21]. Plastik, otomotiv, elektronik cihazlar (buzdolabı, çamaşır makinesi, televizyon), mobilya ve inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır [22]. Ambalaj atıklarının yaklaşık %40-50'si plastik içermektedir [23].

2.7. Plastik Atık Kaynakları

Geri kazanım sistemlerinde besleme malzemesi olarak kullanılan atık plastikler üç ana kaynaktan sağlanır. Bu kaynaklar ham plastik üreticileri, plastik ürün imalatçıları ve tüketiciler olarak sınıflanabilirler. İlk iki gruptan gelen atıklar çoğunlukla cinslerine göre ayrılmış durumdadır. Buna karşılık tüketim sonrası plastikler özel tesislerde kentsel atıklardan çeşitli yöntemlerle ayrıştırılırlar. Kent çöplüklerinde büyük miktarlarda bulunan bu plastik atıklar evlerden, sanayiden, inşaatlardan, hastanelerden ve diğer tüketim merkezlerinden metal, kağıt, ahşap ve organik atıklarla karışmış halde gelirler. Atıklar içinde en çok rastlanan plastik bileşenler PVC, polietilen, neopren, kauçuk, polistiren, polipropilen, elyaflar, film ve köpüklerdir. Bu bileşenler çoğunlukla metal parçaları da içerir [24].

2.8. Plastik Atıkların Geri Kazanımı İçin Hazırlık Süreçleri Üzerine Değerlendirme

Plastik atıkların geri dönüşüm sürecinde en kritik aşama, hiç şüphesiz ki atıkların geri kazanıma hazır hale getirilmesidir. Bu süreç, yalnızca çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ekonomik açıdan da değerli bir kaynak oluşturur. Kabulü yapılan plastik atıklar için öncelikle içinde bulunan metallerin plastiklerden ayrılması gerekir. Genellikle plastik atıklar preslenmiş balya halinde kabulü yapıldığından şerit tel olarak ifade edilen metal tellerin ayrıştırılması yapılır.

Plastik atıkların geri dönüşümünde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, farklı plastik türlerinin birbirine karışmasıdır. Bu nedenle, kaynağında ayrıştırma sistemlerinin yaygınlaştırılması ve tüketici bilincinin artırılması, geri dönüşüm sürecinin verimliliğini önemli ölçüde artıracaktır.

2.9. Plastik Atıkların Geri Kazanımı

Plastiklerin geri dönüşümü hem kimyasal hem de fiziksel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kimyasal geri dönüşüm, monomerlere tam depolimerizasyon veya oligomerlere kısmi depolimerizasyon için hidroliz, metanoliz, aminoliz ve glikoliz gibi işlemleri içermektedir. Bununla birlikte, piroliz, hidrojenasyon ve gazlaştırma gibi yüksek sıcaklık ve yüksek basınca dayanan bazı kimyasal geri dönüş teknikleri de kullanılmaktadır. Öte yandan, fiziksel geri dönüşüm, literatürde ve endüstride en yaygın kullanılan geri dönüşüm yöntemidir. Fiziksel geri dönüşümün gerçekleştirilmesi için toplama, ön işlem ve yeniden ekstrüzyon adımlarını içeren belirli bir yol vardır [25].

Endüstriyel kuruluşlarda en yaygın kabul gören ve teknik-ekonomik uygulanabilirliği yüksek olan geri dönüşüm yöntemi mekanik geri dönüşüm metodudur. Bu yöntem, plastik atıkların toplanması, polimer türlerine göre ayrıştırılması, kırma işlemiyle boyut küçültme, yıkama ve kurutma işlemlerinin ardından en son ısıtma işlemi uygulanarak granül formuna dönüştürülmesini ve nihayetinde yeni ürünlerin üretiminde kullanılmak üzere ikincil hammadde olarak değerlendirilmesini kapsamaktadır.

2.10. Plastik Atıkların Geri Kazanılması Üzerine Genel Değerlendirme

Avrupa Birliği tarafından açıklanan plastik stratejisine göre 2030 yılına kadar plastiklerin %100'ünün tekrar kullanılması ve geri dönüştürülmesi hedeflenmektedir. Biyolojik olarak parçalanabilir plastiklerin mekanik geri dönüşümü, ayırma, öğütme, yıkama, kurutma, yeniden granülasyon ve birleştirme gibi çeşitli aşamalardan geçer ve ardından geri dönüştürülmüş ürünler yeni ürünlere dönüşür. Biyolojik olarak parçalanmayan plastiklerden kaynaklanan kontaminasyonu önlemek için biyolojik olarak parçalanabilir plastik geri dönüşümünde sıralama ve ayırma önemli bir rol oynar ve ayrıca kaliteli geri dönüştürülmüş ürünler elde etmeye yardımcı olur [26].

Plastik atıkların çevresel etkileri açısından yönetimini sağlamak için uluslararası kuruluşlar bulunmaktadır. İlgili kuruluşlar Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Plastik atıklarla ilgili uluslararası kuruluşlar [26].

Organizasyon	Politika	İşlev
Birleşmiş Milletler (BM)	Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH) (2016)	Tüm deniz kaynaklarının korunmasını ve sürdürülebilir kullanımını güvence altına almak ve kara faaliyetlerinden kaynaklanan deniz kirliliğini önlemeyi/azaltmayı amaçlamaktadır.
	Deniz plastik çöpleri ve mikroplastikler hakkında karar (MP) (2019)	Okyanustaki MP'lerin ve çöplerin uzun vadeli ortadan kaldırılmasını sağlayın. Kara tabanlı faaliyetlerden plastikleri ve MP'leri önleyin/azaltın.
Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP)	Tek kullanımlık plastik ürün kirliliğinin ele alınması (2019)	Tek kullanımlık plastiklerin ulusal ve bölgesel düzeylerde kontrol altına alınmasını, plastik alternatiflerinin kullanılmasını ve atık yönetiminin iyileştirilmesini amaçlayan politikaların teşvik edilmesini sağlamak.
	Sürdürülebilir tüketim ve üretim (2019)	Sürdürülebilir kalkınmanın 2030 gündemine yansıyan tüketim ve üretim kalıplarındaki değişimin sağlanması.

Tablo 2.2. (Devamı) Plastik atıklarla ilgili uluslararası kuruluşlar [26].

Organizasyon	Politika	İşlev
UNEP, Uluslararası Doğa Koruma Birliği (IUCN) ve Yaşam Döngüsü Girişimi	Plastik kirliliğinin belirlenmesi ve şekillendirilmesine yönelik ulusal rehber.	Müdahalenin ilerlemesini değerlendirmek için bir çerçeve ve araçlar aracılığıyla plastik sızıntılarının belirlenmesine yönelik rehberlik sağlanır.
Dünya Sağlık Örgütü (WHO)	Milletvekillerinin çevrede varlığının değerlendirilmesi ve insan sağlığına etkisi (2019)	Çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkileri milletvekillerinin incelenmesini teşvik edin. Milletvekillerini ölçmek için yöntemler oluşturun ve %90'a kadar çıkarılması bekleniyor.
Birleşmiş Milletler Deniz Hukuku Sözleşmesi (UNCLOS)	“Okyanuslar için Anayasa” 1982, (1994) yılında yürürlüğe girdi	Deniz kaynaklarının kullanımının düzenlenmesi ve istikrarlı bir insanlık yaşamı oluşturulması yönünde benzeri görülmemiş bir girişimde bulunulmuştur (plastik için belirtilmemiştir, ancak diğer deniz atıkları gibi tehlikeli madde olarak kabul edilmektedir).

Plastik üretimi ve geri dönüşüm süreçleri, çeşitli çevresel emisyonları beraberinde getirmektedir. Üretim aşamasında kullanılan kimyasallar ve işlemlerden kaynaklanan sera gazı emisyonları, plastik endüstrisinin çevresel etkilerinin önemli bir parçasıdır [18].

2.11. Atık Yönetim Hiyerarşisi

Plastik atıkların çevresel etkilerinin azaltılmasında öncelikli olarak dikkate alınması gereken yaklaşım, atık yönetim hiyerarşisidir. Bu yaklaşım, atık oluşumunun önlenmesini temel alır ve sırasıyla yeniden kullanım, geri dönüşüm, enerji geri kazanımı ve en son çare olarak bertaraf uygulamalarını içerir. Böylece hem çevresel zararlar azaltılmakta hem de kaynakların daha verimli kullanılması hedeflenmektedir.

Atık hiyerarşisi, atık önleme ve yönetim mevzuatı ve politikasında bir öncelik sırası olarak uygulanır. Avrupa Birliği (AB) atık politikalarının ve mevzuatının temel taşıdır

ve AB atık çerçeve direktifinde (Direktif 2008/98/EC) belirtilmiştir. Amacı iki yönlüdür;

- Atık üretimi ve yönetiminin olumsuz etkilerini en aza indirmek,
- Kaynak verimliliğini artırmak için.

Hiyerarşi genel olarak ters bir piramit şeklinde tasvir edilir; en üstte en çok tercih edilen seçenekler, en altta ise atık yönetiminde son çare olarak bertaraf yer alır [27].

Türkiye’de atık yönetim hiyerarşisi, 2 Nisan 2015 tarihli ve 29314 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Atık Yönetimi Yönetmeliği’nin temelini oluşturan genel ilkeler arasında yer alır ve ulusal atık yönetimi stratejisinin önemli bir parçasını teşkil eder. Ayrıca, 12 Temmuz 2019 tarihli ve 30829 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Sıfır Atık Yönetmeliği de bu hiyerarşik prensipleri esas alarak, atık önleme, azaltma, tekrar kullanma ve atıkları kaynağında ayrıştırarak ayrı toplanmasını sağlanması gibi atık yönetimine vurgu yapmaktadır.

11.08.1983 tarihli. 18132 Resmi Gazete Sayılı ve 2872 sayılı Çevre Kanunu’nun 8. Maddesindeki kirletme yasağı başlığı altında “Her türlü atık ve artığı, çevreye zarar verecek şekilde, ilgili yönetmeliklerde belirlenen standartlara ve yöntemlere aykırı olarak doğrudan ve dolaylı biçimde alıcı ortama vermek, depolamak, taşımak, uzaklaştırmak ve benzeri faaliyetlerde bulunmak yasaktır.” hükmü bulunmaktadır [28].

Bu hükme göre, her türlü atık ve artığın çevreye zarar verecek şekilde bertaraf edilmesi yasaklanmış olup, atık yönetim faaliyetlerinin ilgili yönetmeliklerde belirtilen standart ve yöntemlere uygun olarak gerçekleştirilmesi zorunlu kılınmıştır. Söz konusu yasak kapsamında, atıkların doğrudan veya dolaylı olarak alıcı ortama verilmesi, depolanması, taşınması, uzaklaştırılması ve benzeri faaliyetlerin çevreye zarar vermeyecek şekilde yürütülmesi gerekmektedir.

Bu düzenleme, çevre hukukunun temel ilkelerinden olan "kirleten öder" ilkesiyle uyumludur. Kanun, atık yönetiminde önleyici yaklaşımı benimsemekte ve çevresel zararın kaynağında önlenmesini amaçlamaktadır.

Şekil 2.2’de sunulan atık yönetim hiyerarşisi piramidi, sürdürülebilir atık yönetiminin temel prensiplerini görselleştirmek üzere bu çalışma kapsamında oluşturulmuştur. Piramit, Avrupa Birliği Atık Çerçeve Direktifi (2008/98/EC) esas alınarak tasarlanmış

olup, atık yönetimindeki öncelik sıralamasını (önleme, yeniden kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım ve bertaraf) hiyerarşik olarak yansıtmaktadır.



Şekil 2.2. Atık yönetim hiyerarşisi piramidi [29].

2.11. Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) Tarihçesi

Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) gelişimi, çevresel etkilerin daha bilinçli bir şekilde değerlendirilmesi ve sürdürülebilirlik anlayışının gelişmesiyle şekillenmiştir. LCA tarihinin başlangıcını ve bugüne kadar ki gelişimine dair literatür araştırması yapılmış olup sürecin özeti aşağıda anlatılmaktadır.

- **Başlangıç (1960'lar ve 1970'ler):** LCA'nın ilk gelişimi, 1960'larda enerji ve hammadde kullanımında ki sınırlamaların gelmesinin ardından çevre bilincinin artmasıyla atılmaya başlanmıştır. Özellikle ABD'de enerji tüketimi ve kaynak kullanımı üzerine yapılan çalışmalar, YDA'nın temellerini atmıştır [30]. Yaşam döngüsü analizi (YDA), 1960'larda başlayan çevresel etki değerlendirmeleriyle ortaya çıkmış ve zamanla gelişerek günümüzdeki halini almıştır [31]. Çevresel etkiler, yalnızca ürünün üretim aşamasında değil, kullanım ömrü boyunca da değerlendirilmesi gerektiği fikri ön plana çıkmıştır. Bu dönemde, çevre kirliliği, kaynak tükenmesi ve enerji verimliliği gibi konular üzerinde duruluyordu. 1970'lerde ise “Life Cycle Assessment” terimi ilk kez kullanılmaya başlanmış ve bu dönemde ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) gibi kuruluşlar, ürünlerin çevresel etkilerini değerlendirmek için yöntemler geliştirmiştir [32].

Enerji ve çevre krizleri bu dönemde daha fazla dikkat çekmeye başladı. Özellikle, enerji tüketiminin çevresel etkileri hakkında daha fazla bilgi edinme çabaları artmıştı. Ancak, LCA'nın kapsamlı bir analiz aracı olarak kullanılmasından önce, daha çok enerji analizlerine yönelik çalışmalar yapılıyordu.

- **Metodolojik gelişmeler (1980'ler):** 1980'lerin başında, yaşam döngüsü analizi (LCA) daha sistematik bir hale gelmeye başladı. Bu dönemde, bazı araştırmacılar ve mühendisler, ürünlerin ve süreçlerin çevresel etkilerinin sadece üretim aşamasını değil, tüm yaşam döngüsünü kapsamayı gerektiğini fark etmeye başlamıştır.

1980'lerde YDA, Avrupa'da da yaygınlaşmaya başlamış ve SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) gibi kuruluşlar, YDA'nın metodolojik çerçevesini oluşturmak için önemli çalışmalar yürütmüştür [33].

1990'lara gelindiğinde, YDA uluslararası standartlar haline gelmiş ve ISO 14040 serisi standartları (ISO 14040:1997 ve ISO 14044:2006), YDA'nın prensiplerini ve uygulama adımlarını belirlemiştir. ISO 14040 standardı, yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDA) sürecinin prensiplerini ve çerçevesini belirlemek amacıyla geliştirilmiştir [34]. Bu standardın temel amacı, bir ürünün veya hizmetin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini sistematik bir şekilde değerlendirmek ve bu değerlendirmeyi standart bir metodolojiye dayandırmaktır [35].

ISO 14040, YDA çalışmalarının tutarlı, şeffaf ve güvenilir olmasını sağlamak için kılavuzluk eder [36]. Böylece LCA daha resmi ve tanınan bir metodoloji haline gelmeye başladı. Bu dönemde birçok araştırma ve endüstri, çevresel etkileri ölçmenin daha tutarlı bir yolunu aramıştır. Bu süreç, LCA'nın çevre mühendisliği ve endüstriyel tasarımda önemli bir araç olarak kullanılmasını sağlamıştır.

- **Yaygınlaşma ve gelişme (2000'ler):** 2000'ler ve sonrasında ise YDA, sürdürülebilirlik çalışmalarının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir [32]. 2000'li yıllarda, LCA'nın uygulama alanları genişlemeye devam etti. Hem akademik alanda hem de endüstride daha fazla kabul gördü. Çevre dostu ürün tasarımı ve sürdürülebilir üretim süreçlerinin daha yaygın hale gelmesi, LCA'nın önemini artırdı.

- **Günümüz ve gelecek:** Günümüzde yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), sürdürülebilirlik çalışmalarının vazgeçilmez bir aracı haline gelmiştir. Son yıllarda LCA metodolojisi, dijitalleşme ve yazılım teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde daha erişilebilir ve uygulanabilir hale gelmiştir [37]. Özellikle LCA yazılımları ve veri tabanları, karmaşık hesaplamaları kolaylaştırarak, LCA'nın endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşmasını sağlamıştır [38].

LCA'nın endüstriyel uygulamalarda kullanımının yaygınlaşması, Avrupa Birliği'nin dögüsel ekonomi politikaları ve yeşil mutabakat hedefleri doğrultusunda artış göstermiştir. Endüstriyel kuruluşlar, ürünlerinin çevresel etkilerini azaltmak ve sürdürülebilirlik raporlamalarını iyileştirmek için LCA metodolojisi kullanımı yaygınlaşmıştır.

Bunun yanı sıra, yaşam döngüsü değerlendirmesi son yıllarda politika oluşturma süreçlerinde giderek daha kritik bir rol oynamaktadır. İklim değışikliğıyle mücadele politikalarında, ürün ve hizmetlerin çevresel etkilerinin bütüncül bir şekilde analiz edilmesi amacıyla LCA yaklaşımı sıklıkla başvuru olan bir yöntem haline gelmiştir. Özellikle karbon ayak izi hesaplamalarından dögüsel ekonomi stratejilerine kadar pek çok alanda, karar vericiler LCA sonuçlarını politika oluşturma süreçlerine entegre etmektedir. LCA'nın geleceğı, özellikle dijitalleşme, yapay zeka ve veri analizi gibi alanlarla entegrasyonunu içermektedir. Bu sayede daha hızlı ve daha doğru analizler yapılabileceğı öngörülmektedir. Yıllara göre LCA tarihinin özeti aşağıda yer almaktadır.

- **1960'lar ve 1970'ler:** Bu dönemlerde özellikle sanayileşmenin artmasıyla birlikte çevresel sorunlar daha görünür hale geldi. Çevre bilincinin artması ve çevresel etkilere dair farkındalık arttı.
- **1980'ler:** İlk sistematik çevresel analiz çalışmaları ve yaşam döngüsü düşüncesinin temelleri atıldı.
- **1990'lar:** LCA uluslararası standartlar haline geldi. ISO 14040 serisi standartları (ISO 14040:1997 ve ISO 14044:2006), LCA'nın prensiplerini ve uygulama adımlarını belirledi.
- **2000'ler:** LCA hem akademik çalışmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlandı.

- **Bugün:** LCA sürdürülebilirlik ve çevre yönetimi için vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Dijitalleşme, yapay zeka ve büyük veri teknolojileri sayesinde, LCA daha verimli ve erişilebilir hale gelmiştir.

LCA ile ilgili bugüne kadarki önemli gelişmeler Tablo 2.3’de gösterilmiştir.

Tablo 2.3. LCA tarihinde önemli etkinlikler.

Etkinlik	Yıl
Kimyasal ürünlere ait üretim için gerekli enerjinin araştırıldığı, muhtemel ilk LCA-odaklı çalışma	1963
Coca Cola’nın içecek kaplarının karşılaştırmasını yaptığı ilk çalışması	1969
Çevresel açıdan geliştirilmiş girdi/çıktı modeli için metodolojik temel hazırlandı.	1970
ABD Çevre Koruma Ajansı tarafından görevlendirilen, halka açık ve hakemli ilk LCA çalışması “Dokuz İçecek Konteyneri Alternatifinin Kaynak ve Çevresel Profil Analizi”nin yayınlanması.	1974
Kritik hacimlere dayalı ilk etki değerlendirme yöntemi tanıtılması.	1984
Yaygın olarak kullanılan ilk ticari LCA yazılımı olan GaBi’nin ilk versiyonu yayınlandı.	1989
Bir diğer yaygın olarak kullanılan ticari LCA yazılımı SimaPro’nun ilk versiyonu yayınlandı.	1990
“Yaşam Döngüsü Analizi” terimi ortaya çıktı.	1990
Farklı enstitüler tarafından LCI veritabanları oluşturuldu.	1990
İlk çevresel tema odaklı etki değerlendirme metodolojisi, CML92	1992
LCA çerçevesini, terminolojisini ve metodolojisini uyumlu hale getirmek için SETAC tarafından uygulama kuralları yayınlandı.	1993
Tamamen LCA odaklı ilk akademik dergi “ International Journal of Life Cycle Assessment” yayın hayatına başladı.	1996
LCA ilkeleri ve çerçevesi hakkında ISO 14040 standardı yayınlandı.	1997
Hedef ve Kapsam tanımını yapan ISO 14041 standardı yayınlandı.	1998
Hasar odaklı metodoloji Eco-indicator 99 ortaya çıktı.	1999
Yaşam Döngüsü etki değerlendirmesi üzerine ISO 14042 standardı yayınlandı.	2000

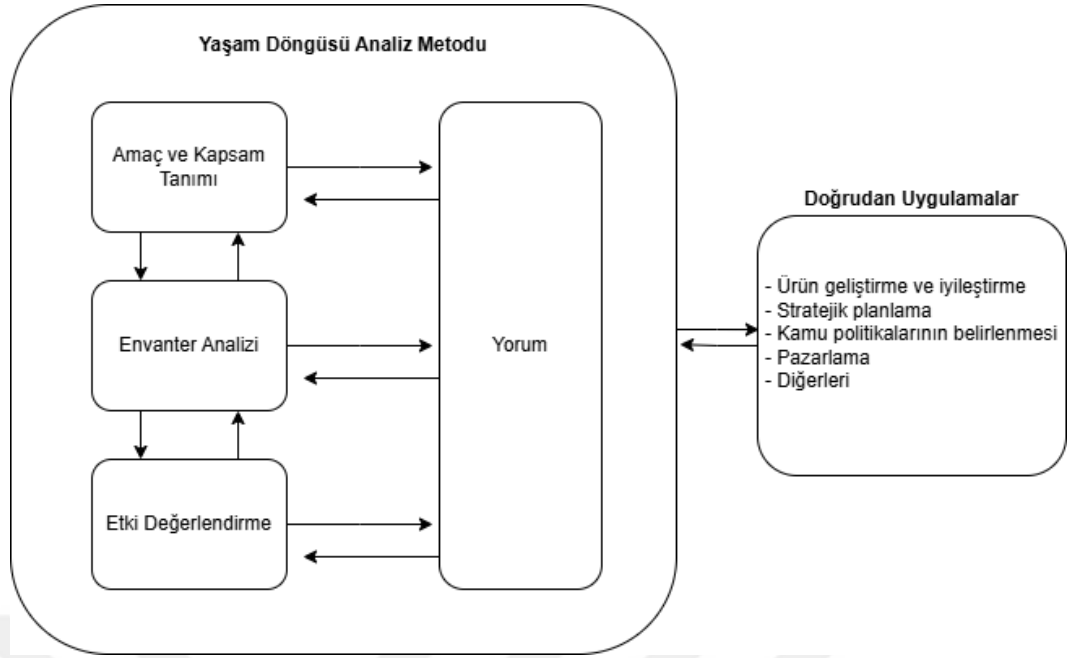
Tablo 2.3. (Devamı) LCA tarihinde önemli etkinlikler.

Etkinlik	Yıl
Yaşam Döngüsü yorumu üzerine ISO 14043 standardı yayınlandı.	2000
UNEP/SETAC Yaşam Döngüsü Girişimi başlatıldı.	2002
LCI veritabanı ecoinvent version 1.01 yayınlandı.	2003
ISO 14040 ve ISO 14044 aracılığıyla LCA için genel bir metodolojik çerçeve ve kılavuzsuz oluşturulması.	2006
Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Analizi için bir çerçeve önerildi.	2008
ILCD handbook yayınlandı.	2010
PEF ve OEF kılavuzları yayınlandı.	2012 ve sonrası

2.12. LCA Tanımı ve Metodolojisi

Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), bir ürünün yaşam döngüsü boyunca (beşikten mezara veya beşikten kapıya) potansiyel çevresel etkileri ve kullanılan kaynakları değerlendirmek için kullanılan bir araçtır, yani hammadde ediniminden, üretim, kullanım aşamaları ve atık yönetimi yoluyla geri dönüşüm aşamasına kadar [34]. LCA, sürdürülebilirlik çalışmalarında ve çevresel etki değerlendirmelerinde kilit bir araçtır [39].

Özetle, bir ürünün veya eylemin tüm yaşam döngüsü boyunca tüm potansiyel çevresel etkilerini değerlendiren ve kullanılan doğal kaynaklarını daha kapsamlı bir şekilde değerlendiren bir analiz yöntemi aracıdır. ISO 14000 Çevre Yönetim Sistemleri standartları serisi içerisinde yer alan ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına göre LCA metodolojisi tanımlanmıştır. Şekil 2.3’de gösterildiği gibi ISO 14040:2006 standart çerçevesinde LCA’nın metodolojisi birbiriyle ilişkili dört aşamadan oluşmaktadır ve her aşama bir önceki aşamayı takip etmektedir. LCA metodolojisi özeti Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Yaşam döngüsü analizi metodolojisi (ISO 14040:2006) [40].

2.13. Yaşam Döngüsü Analizi Aşamaları

LCA, genellikle dört temel aşamadan oluşmaktadır; amaç ve kapsamın belirlenmesi, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve yorumlama. LCA metodolojisi kapsamında tüm aşamalar birbiriyle ilişkili ve her aşama bir önceki aşamayı takip etmektedir. Her bir aşama, çalışmanın bütüncül bir şekilde tamamlanabilmesi için kritik öneme sahiptir.

2.13.1. Amaç ve kapsamın belirlenmesi

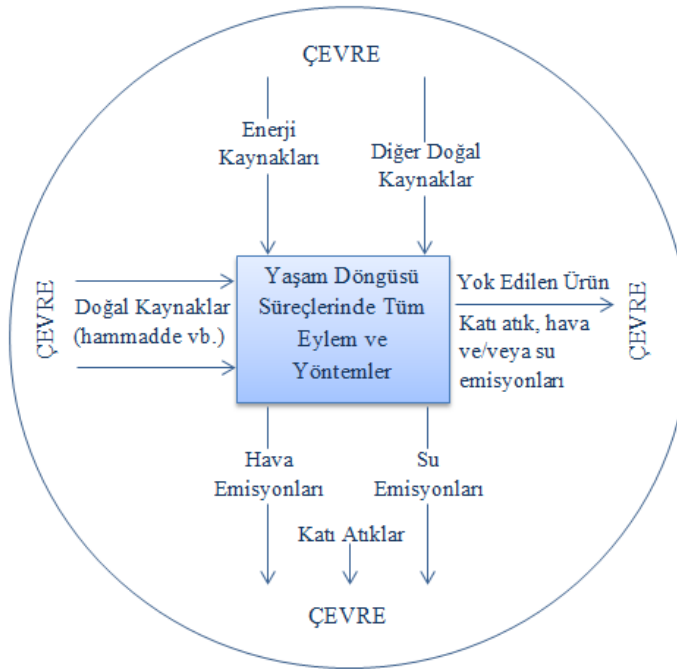
LCA çalışmasının ilk aşaması, çalışmanın neden yapıldığı, hangi karar süreçlerini destekleyeceğinin belirlenmesidir. Amaç tanımı, LCA çalışmasının içeriğini belirler ve kapsamın çerçevesinin temelini oluşturur. Çalışmanın amacı belirlendikten sonra kapsamının net bir şekilde tanımlanması gerekir. Kapsam tanımı, hangi ürün sistemlerinin değerlendirileceğini ve bu değerlendirmenin nasıl yapılması gerektiğini belirler. Bu aşamada sistem sınırları belirlenir. Örneğin, çalışmanın “beşikten mezara” mı (ham madde çıkarımından bertarafa kadar) yoksa “beşikten kapıya” mı (üretim sürecine kadar) yapılacağı tanımlanır. Daha sonrasında fonksiyonel birim belirlenir. Fonksiyonel birim, ürün veya hizmetin performansını ölçmek için kullanılan bir referans noktasıdır (örneğin, 1 kg ürün veya 1 km taşıma). Çalışmada kullanılan verilerin kaynakları, belirsizlikler ve yapılan kabuller açıklanır.

2.13.2. Envanter analizi

Yaşam döngüsü envanteri, bir ürünün ömrü boyunca sistem sınırları içerisindeki tüm süreçler için sistem girdi ve çıktılarına ait kaynaklar, enerji, malzeme ve veri akışlarının ölçümlerinin belirtildiği envanterinin derlemesini içerir. Envanter analizi aşamasında, ürünün yaşam döngüsü boyunca tüketilen kaynaklar (enerji, su, hammaddeler) ve oluşan çıktılar (CO₂, atık su, katı atık, yan ürünler vb.) detaylı bir şekilde hesaplanır. Bu süreçte sistem sınırları doğrultusunda belirlenen süreç aşamaları için spesifik verilerin toplanması ve analiz edilmesi gerekmektedir. Toplanan veriler, ürünün her bir aşamadaki girdi ve çıktılarını detaylı bir şekilde ortaya koyar. Envanter analizi, LCA'nın en zaman alıcı ve veriye dayalı aşamasıdır, çünkü doğru ve güvenilir veriler olmadan etki değerlendirmesi gerçekçi ve sağlıklı sonuçlar çıkarmaz.

Envanter analizi sonucu mutlak bir gerçek değil, sistemin akışlarının modellenmiş bir temsildir ve veri mevcudiyeti, kalitesi ve uygulayıcı tarafından yapılan modelleme kararlarından etkilenir. Bu yönlerle ilgili şeffaflık, YDEA'nın sınırlılıklarını anlamak için kritik öneme sahiptir.

Envanter analizi esnasında yapılacak ilk işlem girdi ve çıktıların belirlenerek verilerinin incelenmesidir. Yaşam döngüsü süreçlerinde girdi ve çıktıları gösteren örnekleme Şekil 2.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Bir ürünün yaşam döngüsüne ait girdi ve çıktıları.

2.13.3. Etki değerlendirmesi

Etki değerlendirmesi aşamasında, envanter analizinden elde edilen tüm girdi ve çıktı veri sonuçlarının potansiyel çevresel etki kategorilerine dönüştürüldüğü aşamadır. Bu evresel etki kategorileri arasında küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon, ötrofikasyon, su tüketimi ve enerji kullanımı gibi faktörler yer alır. Her bir etki kategorisi, belirli metodolojiler kullanılarak hesaplanır ve sonuçlar, ürünün çevresel etkilerini nicel olarak ifade eder. Bu aşama, ürün veya süreçlerin çevresel performansını değerlendirerek ilgili kaynağın potansiyel çevresel etkisinde iyileştirme fırsatları sunmaktır.

Çevresel etki kategorileri belirlenmesi aşamasında ISO 14044'e göre zorunlu adımlar şunlardır;

- **Etki kategorileri, göstergeler ve karakterizasyon modellerinin seçimi:** Amaç ve kapsama dayalı olarak ilgili çevresel konuların (rneğin, iklim değişikliği, asitlenme, ötrofikasyon, toksisite, kaynak tükenmesi) seçilmesi.
- **Sınıflandırma:** YDEA sonuçlarının (temel akışlar) seçilen etki kategorilerine atanması.
- **Karakterizasyon:** Farklı YDEA sonuçlarını ortak birimlere dönüştürmek için karakterizasyon faktörleri (rneğin, iklim değişikliği için GWP faktörleri) kullanarak her kategori için potansiyel etkilerin büyüklüğünün hesaplanması.

2.13.4. Yorumlama

Yorumlama aşaması, LCA'nın en son aşaması olup elde edilen bulguların özetlendiği, değerlendirildiği ve tartışıldığı, çalışmanın amaç ve kapsamına uygun olarak sonuçlar doğrultusunda önerilerde bulunduğu son aşamadır. Kullanılan verilerin doğruluğu ve güvenilirliği açısından kullanılan analiz metodu ile desteklenir. Yapılan sonuçlar üzerine çevresel iyileştirme yapılabilecek öneriler sunulur. Özellikle endüstriyel kuruluşlar açısından bu kısım ilerleyen süreçlerde yapılması planlanan proses aşamaları üzerinde yol gösterici olmaktadır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, plastik atıkların geri kazanımı alanında faaliyet gösteren “Şam Yapı A.Ş. Sakarya Şubesi” unvanlı tesis üzerinden, geri kazanım sürecinin yaşam döngüsü analizi yöntemi ile çevresel etkilerin değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın temel amacı, söz konusu tesisin plastik geri kazanım faaliyetlerinin çevresel etkilerinin nicel olarak ortaya konulmasıdır.

3.2. Çalışmanın İş Akış Proses Şemaları

Tez çalışmasının yürütüldüğü “Şam Yapı A.Ş. Sakarya Şubesi” unvanlı tesisin hammadde ihtiyacı; üretim faaliyeti gösteren sanayi kuruluşlarından, lisanslı toplama-ayırma tesislerinden ve çoğunlukla atık ithalatı kapsamında yurt dışından temin edilen plastik atıklardan karşılanmaktadır.

Tehlikesiz atık plastik geri kazanım faaliyeti gerçekleştirmek üzere kabulü yapılan tehlikesiz plastik atıklara ait resim Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kabulü yapılan plastik atıklar.

Toplama ve ayırma faaliyeti gösteren firmalardan temin edilen plastik ambalaj atıkları ile üretim tesislerinden elde edilen tehlikesiz plastik atıklar, türlerine göre (PE, PP,

PET, PVC vb.) manuel yöntemler ve optik ayırıcı sistemler kullanılarak ayrıştırılmaktadır.

Ayrıştırma işlemi sonrasında, PE ve PP türündeki plastik atıklar kırma makinelerinde işlenerek çapak (flake) haline getirilir. Bu çapağın temizlenmesi amacıyla yıkama havuzlarında yıkama işlemi gerçekleştirilir. Yıkanan plastikler, kurutma ünitelerinde kurutulduktan sonra agromel makinelerinde nemden arındırılır.

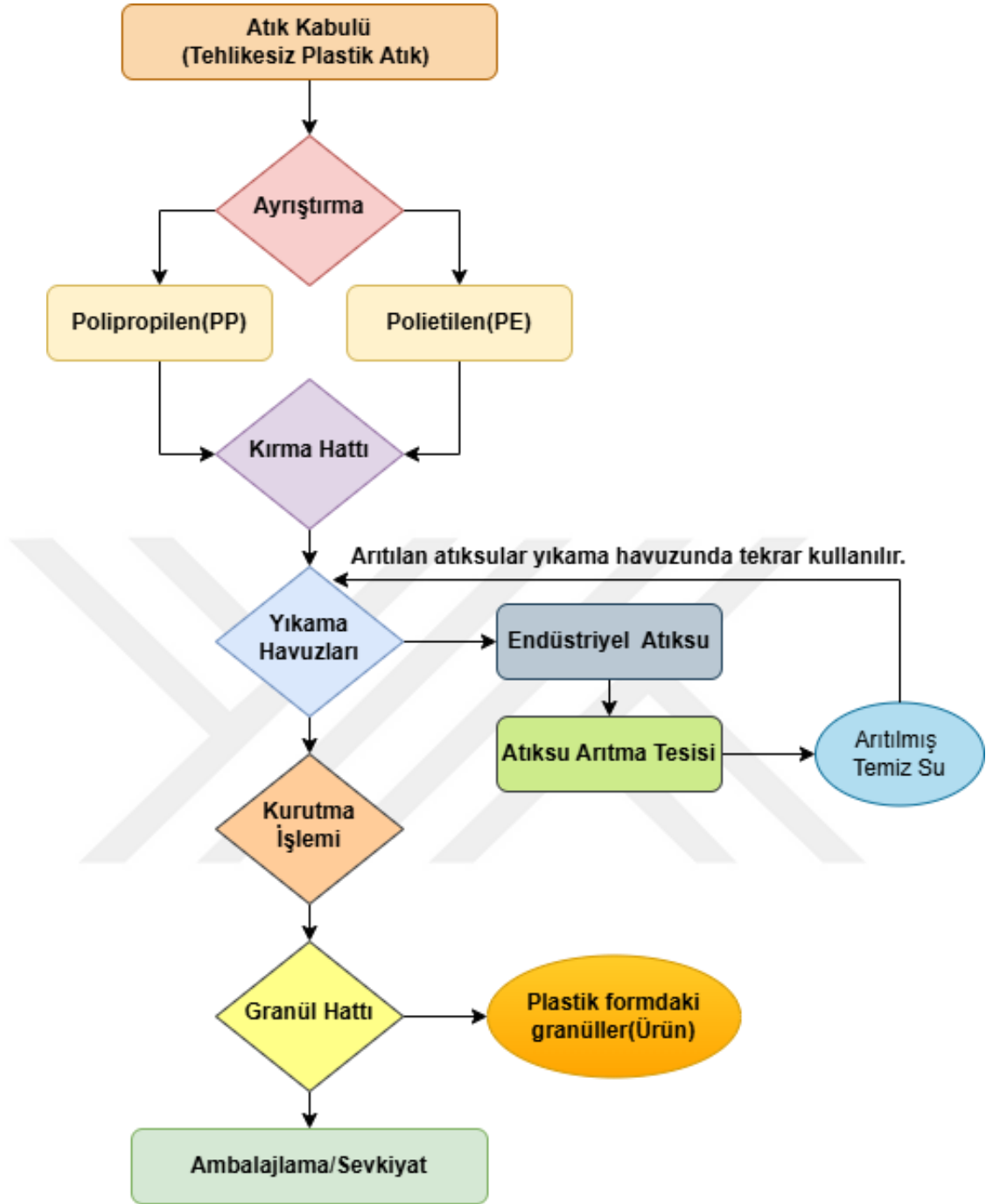
Son aşamada, kurutulan malzeme granül üretim hattına alınarak ekstrüzyon işlemine tabi tutulur ve plastik granül haline getirilir. Üretilen granüller ambalajlanarak satışa hazır hale getirilir. Elde edilen granül formundaki plastik hammaddelere ait resim Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Geri kazanım işlemi yapılmış granül formunda ki plastikler.

3.2.1. Plastik Atık Geri Kazanım Metodu

Tez çalışmasının yürütüldüğü “Şam Yapı A.Ş Sakarya Şubesi” unvanlı tesisin tehlikesiz atık plastik geri kazanım aşamalarını gösteren iş akış şeması Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Plastik atık geri kazanım faaliyeti iş akış şeması.

3.3. Yaşam Döngüsü Analizi

3.3.1. Amaç ve kapsamın belirlenmesi (LCA)

Bu çalışma, Şam Yapı A.Ş. Sakarya Şubesi tesisinde yürütülen "Tehlikesiz Plastik Atıkların Geri Kazanımı" faaliyetinin yaşam döngüsü analizini kapsamaktadır. Çalışmanın fonksiyonel birimi "1 kg LDPE granül üretiminin geri kazanımı" olarak

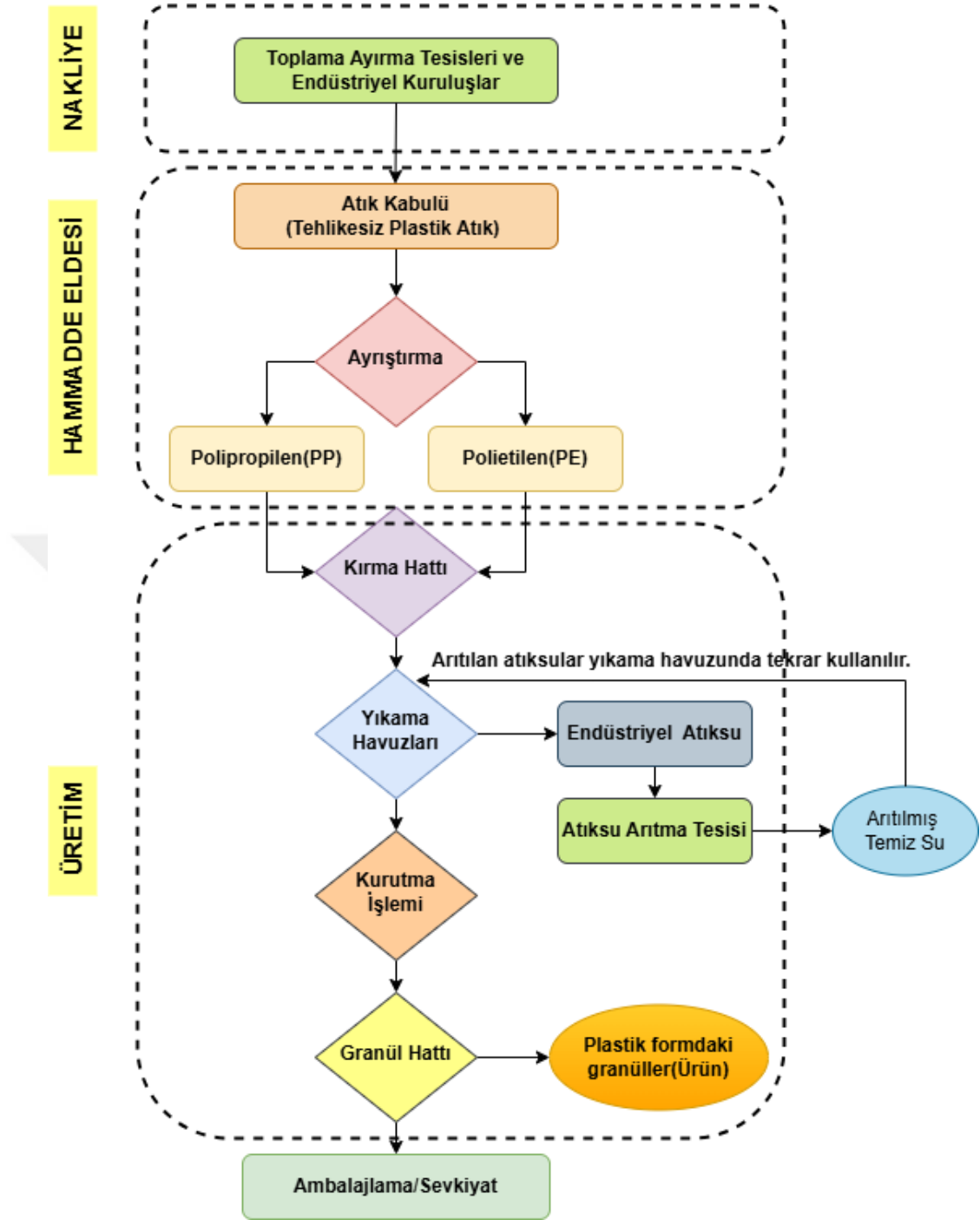
belirlenmiştir. Belirlenen bu fonksiyonel birim tez çalışmasının bundan sonraki kısımlarında daha kolay olması amacıyla “1 kg rLDPE” olarak kullanılacaktır.

Çalışmanın sistem sınırları, "beşikten-kapıya" yaklaşımıyla ele alınmış olup, sürecin tüm aşamaları atık kabulünden geri kazanılmış ürün eldesine kadar incelenmiştir.

Çalışmada aşağıdaki parametreler değerlendirilmiştir:

- Enerji tüketimi (kullanılan kaynaklar ve miktarları),
- Çevresel emisyonlar (salınan gazlar, partiküller vb.),
- Atıkların çevresel etkileri (toprak, su, hava üzerindeki potansiyel etkiler).

Bu analizler, geri kazanım sürecinin çevresel etkilerinin belirlenmesi ve çevresel ayak izinin minimize edilmesine yönelik öneriler geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında, PRè Consultants adlı bir Hollanda firmasının ürünü olan SimaPro 9.5.0.2 PhD lisanslı yazılımı kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışılan sistemin sınırları atık kabulü, ayrıştırma, kırma, yıkama, granül üretimi, ambalajlama ve sevkiyat işlemi olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sistem sınırları Şekil 3.4’de belirtilmiştir.



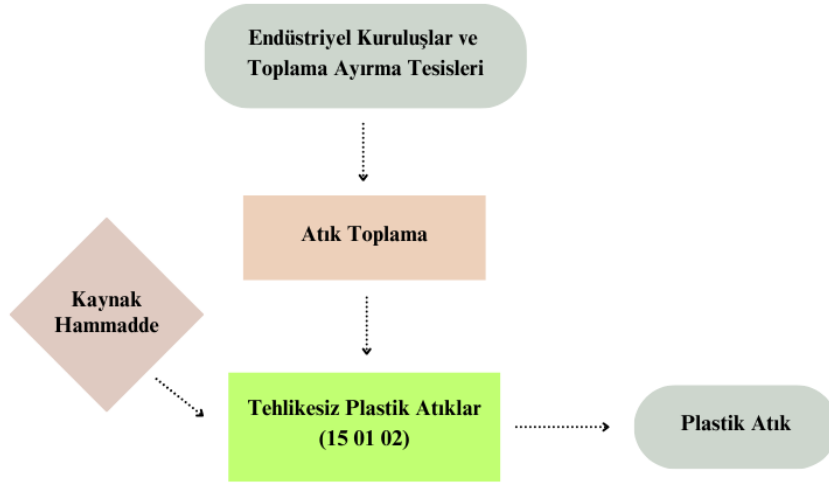
Şekil 3.4. Granül üretimi için sistem sınırları.

Tehlikesiz plastik atıklardan granül malzemesi üretimi için belirlenen yaşam döngüsü temel olarak üç aşama şeklinde ele alınmış olup bu basamaklar aşağıda açıklanmıştır.

- **Nakliye aşaması:** Atıkların tesise kara yolu ve deniz yolu ile nakliye süreçlerini kapsamaktadır.
- **Ham madde eldesi aşaması:** Tesise kabulü yapılan atıklar ve bu atıklara uygulanan ön işlem süreçlerini içermektedir.

- **Üretim aşaması:** Kırma, yıkama, ekstrüzyon ısıl işlem ile granül üretimi, ambalajlama ve sevkiyat süreçlerini kapsamaktadır.

Geri kazanım faaliyetinin proses aşamaları detaylı şekilde incelenmiş ve her aşamanın iş akış şemaları ayrı ayrı hazırlanmıştır. Prosesin ilk aşaması atık kabul işlemiyle başlamaktadır. Atık kabulüne ait iş akış şeması Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Atık kabulü iş akış şeması.

Geri kazanım sürecinin ikinci aşaması atıkların ayrıştırılması işlemidir. Proses girdisi, karışık haldeki toplanmış plastik atıklardan meydana gelmektedir. Süreç, bu atıkların işlenmesiyle başlamaktadır.

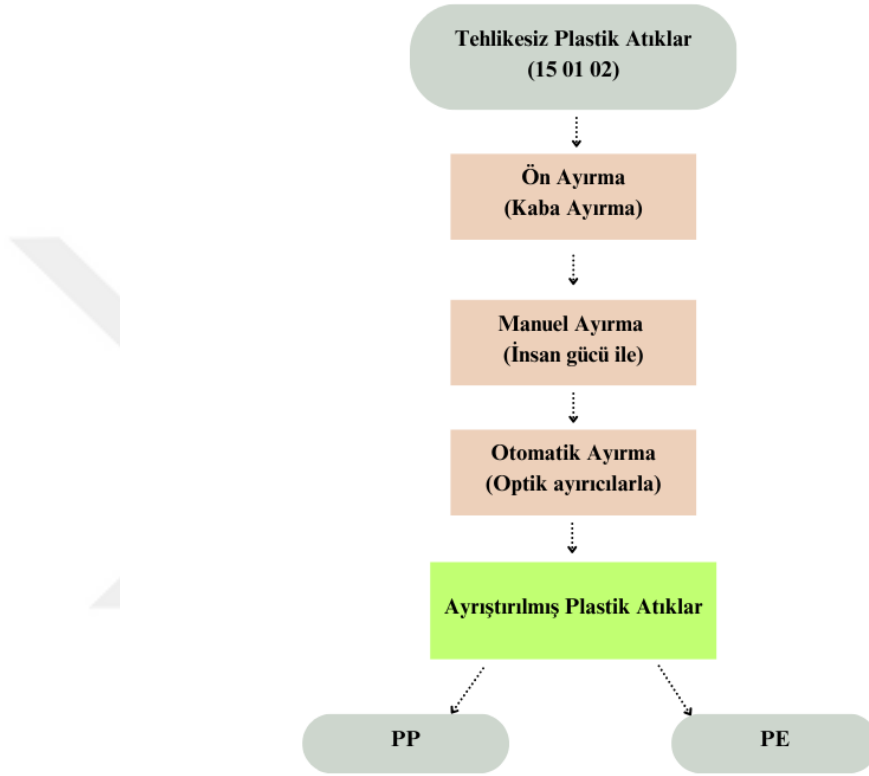
İlk işlem olan ön ayırma (kaba ayırma) aşamasında, atıklar boyutlarına göre (büyük ve küçük parçalar şeklinde) veya bariz kirliliklerine göre (ambalajından ayrılmış büyük karton parçaları gibi) gruplandırılmaktadır. Bu ön eleme işlemi, sonraki daha hassas ayırma süreçlerinin verimliliğini artırmaktadır.

Ardından manuel ayırma aşaması gelmektedir. Bu adımda, operatörler tarafından plastikler; türlerine (görsel inceleme veya üzerindeki kodlara göre), renklerine ve büyük yabancı maddelere (metal, cam vb.) göre el ile ayrılmaktadır. Bu işlem, özellikle farklı polimer türlerinin yüksek saflıkta sınıflandırılması için kritik öneme sahiptir.

Sürecin bir sonraki aşamasında optik ayırıcılar devreye girmektedir. Bu sistemler, farklı plastik türlerinin ışığı farklı şekillerde yansıtma özelliğinden yararlanarak çalışmaktadır. Kameralar ve sensörler aracılığıyla otomatik olarak tanınan plastik türleri, hava jetleri yardımıyla birbirinden ayrılmaktadır.

Ayırma süreçleri sonucunda geri dönüştürülemeyen veya yüksek oranda kirlenmiş atıklar "reddedilen atıklar" akışına yönlendirilmektedir. Bu atıklar genellikle bertaraf edilmekte veya enerji geri kazanım süreçlerinde değerlendirilmektedir.

Sürecin sonunda elde edilen PE ve PP plastiklerden oluşmaktadır. Bu ayrıştırılmış plastik malzemeler, sonraki geri dönüşüm aşamaları için girdi olarak kullanılmaktadır. Ayrıştırma işlemine ait iş akış şeması Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Ayrıştırma işlemi iş akış şeması.

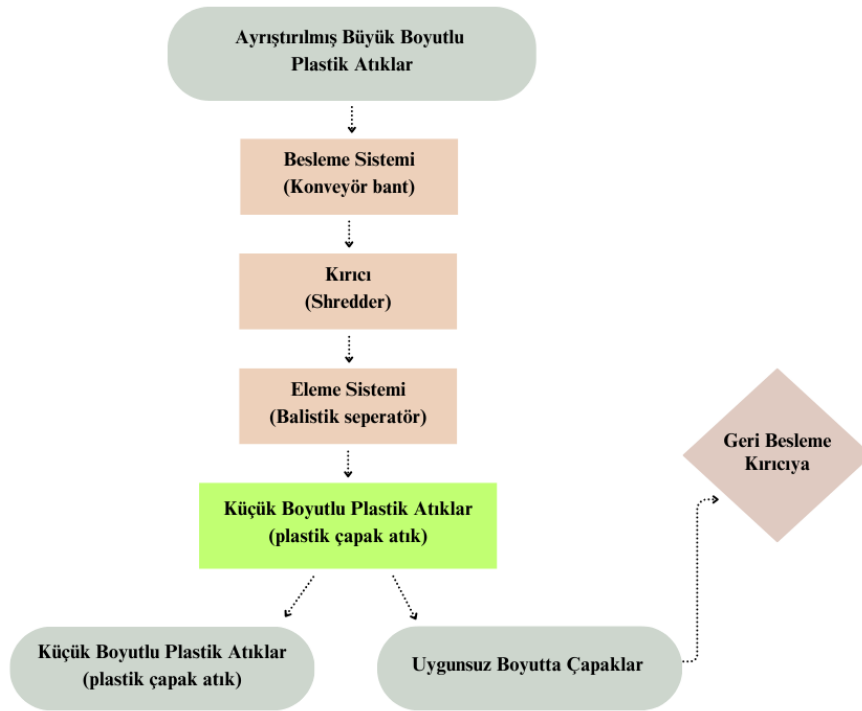
Ayrıştırma işlemi yapıldıktan sonra PE ve PP plastikler kırma işleminin başlangıç noktasını oluşturan girdi, genellikle önceki ayrıştırma aşamasından elde edilen ve hala büyük boyutlu olan plastik parçalardır. Bu malzemeler balya halinde sıkıştırılmış olarak veya dökme halde kırma hattına beslenebilmektedir.

Sürecin ilk aşamasını besleme sistemi oluşturmaktadır. Bu sistemde, plastik parçalar konveyör bantlar veya vibrasyonlu besleyiciler aracılığıyla düzenli bir şekilde kırıcı makineye iletilmektedir. Bu mekanizma, işlem sürecinin kesintisiz ve verimli şekilde ilerlemesini sağlamaktadır.

Kırma hattının temel bileşeni olan kırıcı, plastik parçaları istenilen küçük boyutlarda çapalara dönüştürmektedir. Bu makine, malzemeyi homojen bir boyuta indirgeyerek sonraki işlemler için uygun hale getirmektedir. Kırma işleminin ardından eleme

sistemi devreye girmektedir. Bu aşamada balistik separatör kullanılarak kırılmış plastik çapaklarının boyut kontrolü yapılmaktadır. Sistem, istenilen boyuttaki çapakları ayırırken, büyük boyutlu parçaları geri besleme yoluyla tekrar kırıcıya göndermektedir.

Sürecin birincil çıktısı olan istenilen boyutta kırılmış plastik çapakları yıkama, eritme ve granülleştirme gibi sonraki geri dönüşüm aşamaları için ideal girdi malzemesini oluşturmaktadır. İkincil çıktı olarak nitelendirilen büyük boyutlu parçalar ise geri besleme sistemi sayesinde sürece tekrar dahil edilerek verimlilik maksimize edilmektedir. Bu kapalı döngü sistemi, atık oluşumunu minimize ederken kaynak kullanımını optimize etmektedir. Kırma işlemine ait iş akış şeması Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Kırma işlemi iş akış şeması.

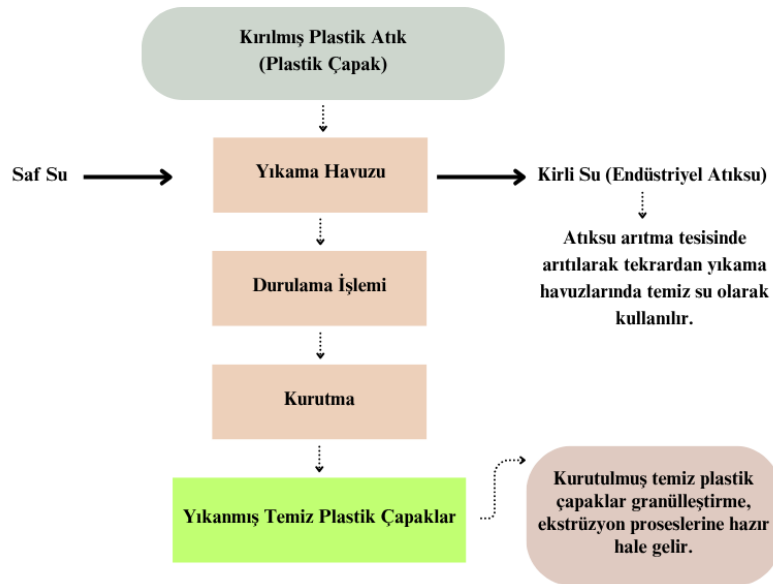
Kırma işleminden geçen plastik atıklar, temizlenme aşaması için özel yıkama havuzlarına alınır. Bu aşamada, plastik çapakların üzerindeki kir ve yabancı maddeler saf su kullanılarak temizlenir. Dikkat çekici bir şekilde, bu yıkama işleminde herhangi bir kimyasal madde kullanılmaz, tamamen fiziksel bir temizleme yöntemi uygulanır.

Yıkama işlemi tamamlandığında, içerisinde çeşitli kirleticiler bulunan su sistemden uzaklaştırılır. Bu kirli su, çevre dostu bir yaklaşımla fiziksel-kimyasal atıksu arıtma

tesisine yönlendirilir. Arıtılan su, sürdürülebilir bir şekilde tekrar yıkama havuzlarında kullanılmak üzere sisteme geri kazandırılır.

Nemli plastik çapaklar, kurutma işlemi için dry sıkma makinesine aktarılır. Bu makinede, mekanik basınç yöntemiyle plastiklerin üzerindeki suyun büyük bir kısmı uzaklaştırılır. Ardından, agromel kazanında gerçekleştirilen ileri kurutma işlemiyle plastikler üzerindeki nem tamamen alınır ve malzeme ideal kuruluk seviyesine ulaşır.

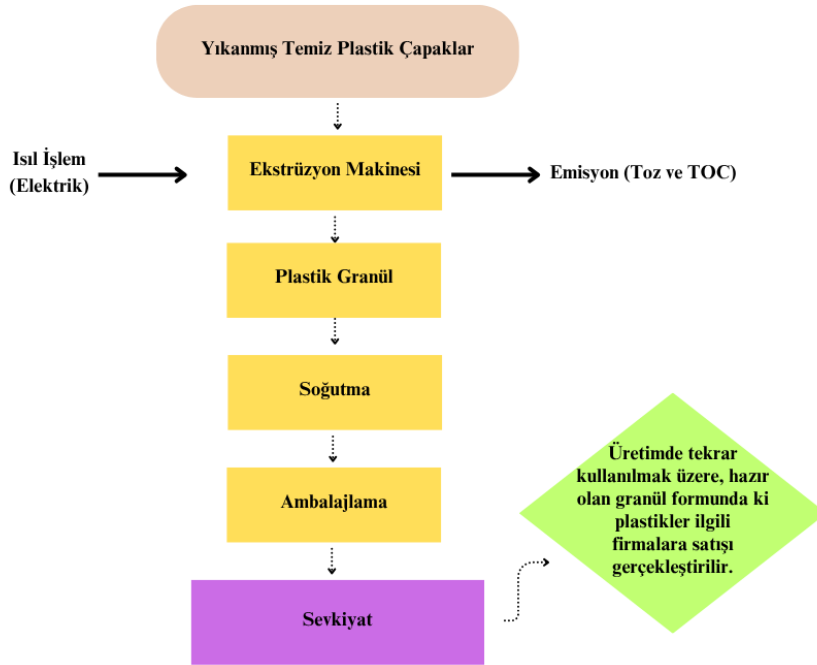
Son aşamada, tamamen kurutulmuş ve temizlenmiş plastik çapaklar, granül üretim sürecinde kullanılmak üzere ısıl işlem hattına gönderilir. Bu titiz temizlik ve kurutma süreci, son ürün kalitesinin garanti altına alınmasında kritik bir rol oynar. Yıkama ve kurutma işlemine ait iş akış şeması Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Yıkama ve kurutma işlemi iş akış şeması.

Plastik çapaklar yıkandıktan sonra ısıl işlem uygulanmak üzere ekstrüzyon makinelerine gönderilir. Plastik çapaklar ekstruderin ısıtma zonlarında kontrollü bir sıcaklık profiline maruz bırakılarak ergitilir ve homojen bir eriyik fazı oluşturulur. Bu aşamada ekstruder hattında davlumbaz sisteminde emisyon çekişli havalandırma bacaları mevcuttur. Proses gereği Toz ve TOC emisyon parametrelerinin ölçümü gerçekleştirilmektedir. Sonrasında makineden sıcak granüller, kristalizasyonu kontrol etmek ve deformasyonu önlemek için su soğutma kanalından geçirilir. Sonrasında uygun hale gelen granül formunda ki plastik granüller, geri dönüştürülmüş plastik atıkların yeniden değerlendirilerek endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir

hammaddeye dönüştürülmüş olur. Isıl işlem ve mekanik şekillendirme prensiplerinin entegre edildiği bu süreç, döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşılması açısından önem arz etmektedir. Granül üretim hattına ait iş akış şeması Şekil.13’de gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Granül hattı iş akış şeması.

Atıksu arıtma tesisi çalışma prensibi:

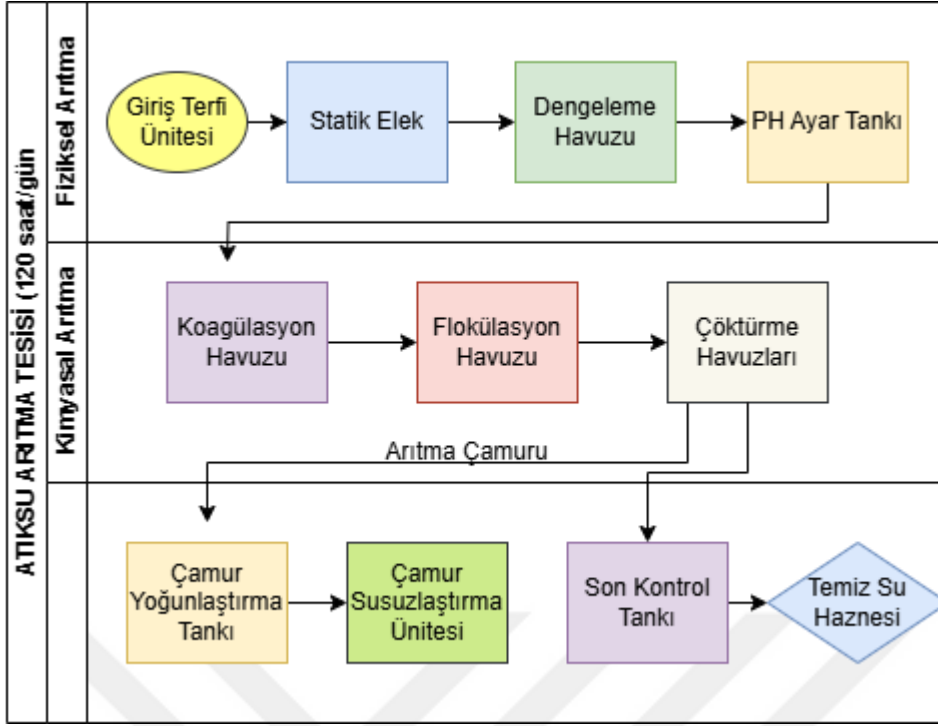
Arıtma tesisinin çalışma prensiplerine göre, proseste oluşacak endüstriyel nitelikli atıksular, üretim hattındaki kanallar aracılığı fiziksel arıtmanın bir parçası olan kaba ızgaradan geçerek terfi kuyusunda toplanır. Terfi kuyusunda mevcut olan terfi pompası ile atık su fiziksel arıtmanın devamı niteliğindeki ince ızgara görevi gören statik elekten geçerek dengeleme havuzuna alınır. Dengeleme havuzunda debi salınımları ve kirlilik yüklerinin homojen olması sağlandıktan sonra, atık su kimyasal arıtma ünitelerine alınır. Yağ sıyrıcı tankı ile başlayan arıtma sonrasında, pH ayar tankına alınır. Otomatik pH ölçümü yapılan pH ayar tankında ihtiyaç halinde dozaj yapılır ve atık suyun istenilen pH değerine getirilmesi hedeflenir. Koagülasyon tankında, atıksuda bulunan ve kendiliğinden çökemeyen ağır metallerin uygun pH koşullarında koagülant madde ilave edilerek reaksiyona girmesi haline getirmesi hedeflenir. Burada oluşan floklar yavaş karıştırma tankı olan flokülasyon tankına alınır ve anyonik polielektrolit dozlaması ile flokların daha büyük yumaklar haline gelerek çöktürme havuzu öncesi hazırlığı yapılır. Bu işlemten sonra atık su çöktürme

tanklarına alınır ve yer çekimi etkisi ile kirliliğin çökmesi sağlanır. Savaklanan atıksu otomatik pH ölçümü yapılan son kontrol tankına geçer ihtiyaç halinde dozaj yapılır ve atık suyun istenilen pH değerine getirilmesi hedeflenir. Lamelli çöktürme tanklarına geçen suda yoğun olan katı maddelerin yer çekimi etkisiyle çöktürülmesi suretiyle sudan ayrılmasını sağlar ve arıtılan su temiz su havuzuna alınır. Çöken çamur, çamur yoğunlaştırma tankına alınarak susuzlaştırma öncesi çamurun birikmesi sağlanır. Biriken arıtma çamurları filtrepresler kullanılarak susuzlaştırılır ve oluşan çamur keki lisanslı firmaya ile bertarafa gönderilir. Filtrepreslerden çıkan süzüntü suları su arıtma prosesine geri aktarılır. Arıtılmış su ise temiz su havuzunda biriktirilerek pompa aracılığı ile üretim prosesinde bulunan yıkama havuzlarına gönderilir ve böylelikle su devir daim yaparak proseste kullanılır. Bu sistem sayesinde alıcı ortama veya atıksu alt yapı kanalizasyon sistemine herhangi bir deşarjın bulunmadığından ve atık suyun bu kullanım şeklinin işletmenin mevcut üretimini ve çevresel etkileri açısından zararı bulunmamaktadır.

Bununla birlikte tesiste herhangi bir öngörülemeyen acil durum olması halinde, atık sular lisanslı geri kazanım/bertaraf firmasına gönderilerek yönetmeliklere uygun bertarafı sağlanabilmektedir. Böylece herhangi bir acil durum kapsamında da olsa atık suların doğal çevreye ve alıcı ortama zarar vermesinin önüne geçilmektedir.

Arıtılmış atıksuların tesiste yeniden kullanımı, tesisin maliyeti ve sınıfının bir fonksiyonudur. Temizliği yapılan plastik kökenli tehlikesiz atıkların yüksek kaliteli bir su ile temizlenmesi gerekmemektedir. Suda bulunan KOİ iyonları ve renkli kirleticiler gibi safsızlıklar üretim kalitesini etkilememektedir. Geri dönüşüm endüstrisi için su kalite gereklilikleri üretime göre değişiklik göstermektedir. Genel olarak nötral pH aralığında olan, kısmen yumuşak, düşük bulanıklığa sahip sular gerekmektedir.

Tehlikesiz nitelikteki plastik kökenli atıkların temizlenmesinde kullanılan suların leke bırakmaması, dolayısıyla düşük bulanıklık, renk ve biraz parlaklığın sağlanması gerekmektedir. Yapılan bu işlemin asıl amacı plastik kökenli atıkların yüzeyindeki toz ve kirliliği arındırmaktır. Atıksu arıtma tesisine ait iş akış şeması Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Atıksu arıtma tesisi akış şeması.

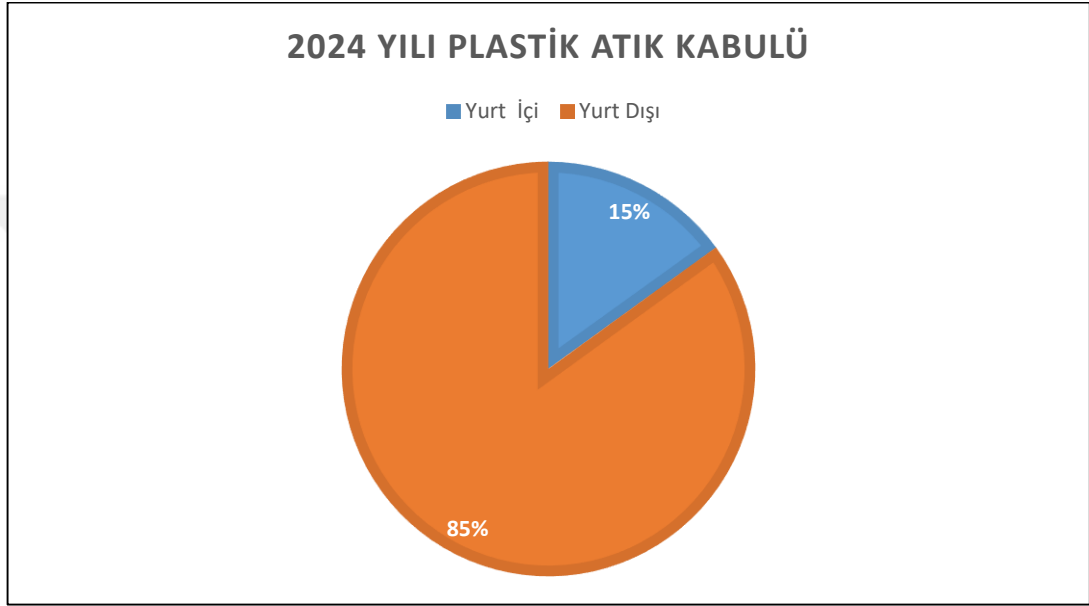
3.3.2. Yaşam döngüsü envanter analizi

Bu tez çalışması için yaşam döngüsü envanter analizi bölümü verilerin toplanması ve hesaplanması işlemlerinden oluşmaktadır. Ürün bazında yapılan çalışmanın yaşam döngüsü analizinde envanter verileri, “Şam Yapı A.Ş Sakarya Şubesi” unvanlı firma tarafından 2024 yılı içerisinde gerçekleştirilen “1 kg rLDPE” granül üretim faaliyetine ilişkin bilgiler üzerinden oluşturulmuştur. Bu araştırmada, firma tarafından plastik atıkların geri kazanımı yapılarak plastik hammadde olan granül üretimi için 2024 yılına ait atık kabulü, geri kazanımı ve sevkiyat verileri alınarak çalışma gerçekleştirilmiş olup, SimaPro versiyon 9.5.0.2 PhD lisanslı yaşam döngüsü analizi programı ile Ecoinvent 3.4 veri tabanlarından sağlanmıştır. Kullanılan veri tabanlarındaki seçimlerde tesisin verdiği verilere uygun olan veri setlerinin seçilmesine dikkat edilmiştir.

Envanter analizi, plastik atıkların geri kazanımı sürecinde ki yaşam döngüsü boyunca kullanılan kaynakları (hammadde(atık), su, enerji vb.) ve ortaya çıkan çıktıları (ürün, emisyon, atık vb.) sistematik olarak ortaya koyulduğu bölümdür. Envanter analizine eklenen veriler, çalışma kapsamında belirlenen sistem sınırları içindeki tüm geri kazanım proses aşamaları ayrı ayrı incelenerek veriler toplanmıştır. Toplanan bu veriler, süreçlerin girdi ve çıktılarının hesaplanmasında temel alınmıştır.

Plastik atıkların geri kazanımı sonucunda elde edilen granül üretimi için atıklar tesise ulaşımı kara yolu ve deniz yolu ile sağlanmaktadır. Ülkemizde ki tehlikesiz plastik atıkların karışık ve çok kirli olması sebebiyle çoğunlukla yurt dışından atık temin edilmektedir. Yurtdışından gelen atıklar atık ithalatçı kayıt belgesi kapsamında ithal edilmekte ve hem kara yolu hem de deniz yolu taşımacılığı kullanılmaktadır.

2024 yılını kapsayan yurt içi ve yurt dışından kabulü yapılan plastik atıkların miktar dağılımı Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Atık kabulü miktar dağılımı.

Yurt içinden kabulü yapılan atıklar 16-32 tonluk kara yolu tır taşımacılığıyla tedarik edilmektedir. Granül üretiminde kullanılmakta olan tesise kabulü yapılan atıklara ait ulaştırma ile ilgili veriler Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Atık kabulüne ait ulaşım verileri.

Temin Edilen Atık Türü	Yurt İçi/Yurt Dışı	Ulaşım Türü	Taşıma Türü	Mesafe (km)
PE Plastik Atık	Yurt içi	Kara yolu	Tır-Kamyon	6.757
PE Plastik Atık	Yurt dışı	Kara yolu	Tır-Kamyon	5.893
PE Plastik Atık	Yurt dışı	Deniz yolu	Gemi	54.610
PP Plastik Atık	Yurt dışı	Kara yolu	Tır-Kamyon	2.640

Geri kazanım işlemi sonucu elde edilen granüller yurt içi ve yurt dışına satışı yapılmaktadır. Ürün sevkiyatına ait ulaşım verileri Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Ürün sevkiyatına ait ulaşım verileri.

Ürün Sevkiyatı	Yurt İçi/Yurt Dışı	Ulaşım Türü	Taşıma Türü	Mesafe (km)
rLDPE Granül	Yurt içi	Kara yolu	Tır-Kamyon	36.260
	Yurt dışı	Kara yolu	Tır-Kamyon	3.888
	Yurt dışı	Deniz yolu	Gemi	10.969

Geri kazanım prosesine ait her bir proses ayrı ayrı ele alınmış olup proses girdi ve çıktıları detaylandırılarak veri envanteri oluşturulmuştur. Proses girdi ve çıktılarına ait veri envanteri Tablo 3.3’de gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Proses girdi ve çıktılarına ait veri envanteri tablosu.

Aşama	Proses	Girdi	Miktar	Birim	Çıktılar (Emisyon/Atık)	Miktar	Birim
1	Plastik	PP Plastik atık (İthalat)	297.360	kg			
	Atık	LDPE plastik atık (Yurt içi)	771.706	kg			
	Kabulü	LDPE plastik atık (İthalat)	4.067.535	kg			
2	Ayrıştırma	Plastik atık girdisi	4.532.660	kg	Ayrıştırılmış plastik LDPE	4.505.703	kg
		Elektrik (Şebeke)	850.716	kWh	Toz vb. fireler	3.361	kg
		Elektrik (GES)	130.206	kWh	Demir tel atığı (Balya teli)	12.730	kg
					Tehlikeli atıklar (15 02 02)	640	kg
					Diğer plastik atıklar	10.226	kg
3	Kırma Hattı	Ayrıştırılmış plastik LDPE	4.505.703	kg	Plastik çapak (Flake)	4.500.101	kg
		Elektrik (Şebeke)	188.211	kWh	Toz vb. fireler	5.602	kg
		Elektrik (GES)	28.807	kWh			

Tablo 3.3. (Devamı) Proses girdi ve çıktılarına ait veri envanteri tablosu.

Aşama	Proses	Girdi	Miktar	Birim	Çıktılar (Emisyon/Atık)	Miktar	Birim
4	Yıkama Hattı	Plastik flake	4.500.101	kg	Yıkanmış plastik flake	4.213.901	
		Elektrik (Şebeke)	937.293	kWh	Havuz altı atıklar	386.200	kg
		Elektrik (GES)	143.457	kWh	Endüstriyel atıksu	164.203	m ³
		Su Tüketimi (Şebeke)	1.048	m ³			
		Arıtmadan gelen su	164.203	m ³			
5	Atıksu Arıtma Tesisi	Elektrik (Şebeke)	259.732	kWh	Arıtılmış su	164.203	m ³
		Elektrik (GES)	39.753	kWh	Çamur atıkları	86.240	kg
		Endüstriyel atıksu	164.203	m ³	Tehlikeli ambalaj atıkları	980	kg
		Kimyasal kullanımı CFS	6.841	kg			
		Kimyasal kullanımı Klor	1.810	kg			
		Kimyasal kullanımı Koagülant	1.270	kg			

Tablo 3.3. (Devamı) Proses girdi ve çıktılarına ait veri envanteri tablosu.

Aşama	Proses	Girdi	Miktar	Birim	Çıktılar (Emisyon/Atık)	Miktar	Birim
6	Granül Hattı	Elektrik (Şebeke)	1.283.602	kWh	Geri dönüştürülmüş granül (rLDPE)	3.185.500	kg
		Elektrik (GES)	196.462	kWh	Satış yapılan granül miktarı	3.214.623	kg
		Yıkanmış plastik flake	4.213.901	kg	Hava kirletici emisyon (Toz)	19,188	kg/yıl
					Hava kirletici emisyon (TOC)	79,212	kg/yıl
					Toz nem vb. fireler	215.097	kg
					Plastik takoz atıkları	108.660	kg
7	Ambalajlama	Elektrik (Şebeke)	7.528	kWh	Big bag çuvalı	15.350	kg
		Elektrik (GES)	1.152	kWh			

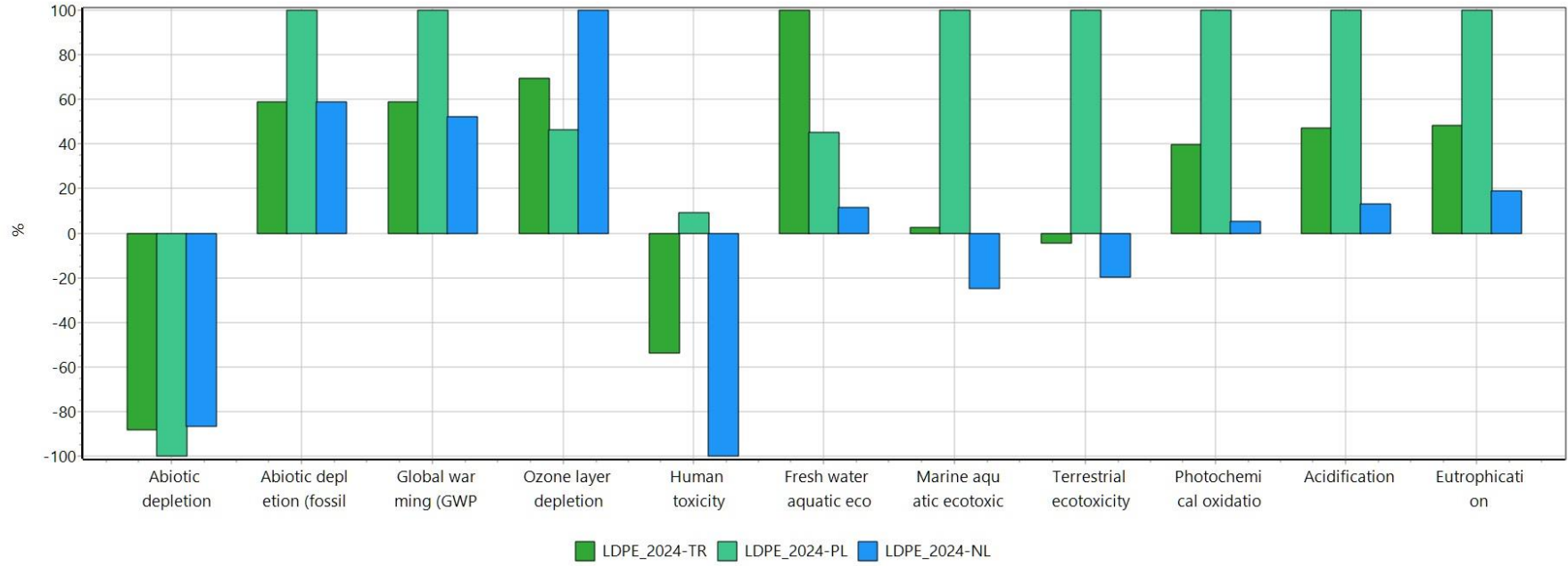
etkilerin en fazla geldiği kaynaklar bulunmuştur. Çalışmaya ait bulgular Bölüm 4’de sunulmuştur.

İkinci hassasiyet analizi ise Türkiye, Hollanda ve Polonya ülkeleri için 2024 yılı elektrik üretim karışımlarının yaşam döngüsü analizi sonuçlarına olan etkisi üzerine bir değerlendirme yapılmıştır. Analizler, bu ülkelerdeki enerji kaynaklarının farklı dağılımlarının rLDPE üretim süreçlerinin çevresel performansını nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. 2024 yılı için bu üç ülkeye ait ortalama elektrik karışım değerleri Tablo 3.4’de gösterilmiştir.

Tablo 3.4. 2024 yılı elektrik karışım değerleri (Türkiye, Polonya, Hollanda).

Ülke	Kömür (%)	Doğalgaz (%)	Rüzgâr (%)	Güneş (%)	Hidro (%)	Nükleer/ Diğer (%)	Toplam CO ₂ (kg/kWh)
Türkiye	28	42	12	8	6	4 (jeotermal)	0,48
Hollanda	10	38	29	18	0.5	4,5 (biyokütle)	0,32
Polonya	65	19	9	2	1	4 (biyokütle)	0,92

Plastik granül (rLDPE) üretiminde, farklı ülkeler üzerinden elektrik kaynaklarının değerleri baz alınarakdan “temiz” elektrik kullanımı çevresel etkilerini gösteren bir hassasiyet analizi yapılmıştır. Hassasiyet analizi CML-IA metodu kullanarak yapılmıştır. Türkiye (TR), Polonya (PL) ve Hollanda (NL) için LDPE üretim süreçlerinin çeşitli çevresel etki kategorilerindeki performansını karşılaştırmaktadır. Belirtilen ülkelere göre çevresel etkileri Şekil 3.12’de yer alan grafikte gösterilmiştir.



Method: CML-IA baseline V3.05 / EU25 / Characterization / Excluding infrastructure processes / Excluding long-term emissions
 Comparing 1 p 'LDPE_2024-TR', 1 p 'LDPE_2024-PL' and 1 p 'LDPE_2024-NL';

Şekil 3.12. Elektrik kullanımından kaynaklı çevresel etkiler (Türkiye, Polonya, Hollanda).

Elektrik kaynağı hassasiyet analizi sonucuna göre, temiz elektrik kullanımı açısından ülkeler arasında belirgin farklar gözlemlenmiştir. Polonya, elektrik üretiminde kömür ağırlıklı enerji karışımına sahip olduğundan, küresel ısınma potansiyeli (GWP), asidifikasyon, ötrofikasyon ve ekotoksisite gibi birçok kategoride en yüksek çevresel etkiyi göstermiştir. Bu durum, Polonya'nın söz konusu kategorilerde çevresel açıdan en dezavantajlı ülke olduğunu ortaya koymaktadır. Türkiye ise özellikle insan toksisitesi ve karasal ekotoksisite kategorilerinde negatif değerler elde ederek bu alanlarda çevresel fayda sağlamış, ayrıca tatlı su ve deniz suyu ekotoksisitesi kategorilerinde Polonya'ya kıyasla çok daha düşük etki göstermiştir. Bu bulgular, Türkiye'nin enerji karışımının bazı çevresel etki kategorilerinde görece daha temiz bir profil sunduğunu göstermektedir. Hollanda ise genel olarak düşük çevresel etkilere sahip olmakla birlikte, ozon tabakasının incilmesi kategorisinde en yüksek etkiye sahiptir. Bununla birlikte, Hollanda insan toksisitesi ve deniz ekotoksisite kategorilerinde negatif değerler göstermekte olup, bu yönüyle çevresel fayda sağladığını göstermektedir. Bu farklılıklar, ülkelerin elektrik üretiminde kullandığı kaynak türleri ve enerji karışımının bileşimiyle doğrudan ilişkilidir. Özetle;

- **Hollanda:** Genel olarak düşük çevresel etkilere sahip olmakla birlikte, özellikle ozon tabakasının incilmesi kategorisinde en yüksek etkiye sahiptir. Bu durum, Hollanda'nın enerji karışımında kullanılan bazı özel teknolojilerin ozon tabakasına olumsuz etkileriyle açıklanabilir.
- **Polonya:** Kömür ağırlıklı enerji karışımı nedeniyle küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon, ötrofikasyon ve ekotoksisite kategorilerinde en yüksek etkilere sahip olup, çevresel açıdan en olumsuz sonucu göstermektedir.
- **Türkiye:** Özellikle insan toksisitesi ve karasal ekotoksisite kategorilerinde negatif değerler göstermiştir. Bu sonuç, kullanılan elektrik karışımının insan sağlığına ve karasal ekosistemlere yönelik etkilerde çevresel fayda sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, sucul ekotoksisite kategorilerinde Polonya'ya kıyasla çok daha düşük etkiler göstermesi, Türkiye'nin enerji karışımının çevresel açıdan daha dengeli olduğunu göstermektedir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, plastik geri kazanım sektöründe faaliyet gösteren “Şam Yapı A.Ş Sakarya Şubesi” unvalı tesisin yaşam döngüsü analizi ile çevresel etkileri belirlenmiştir. “1 kg rLDPE” granül eldesi için oluşturulan çevresel etki analizi modelinin yaşam döngüsü basamaklar 2024 yılını kapsayan plastik geri kazanım prosesine ait iş akış şeması dikkate alınarak hazırlanmıştır. Plastik geri kazanım faaliyeti kapsamında kabulü yapılan plastik atıkların tesise ulaşımı deniz yolu ve kara yolu kullanılarak ulaş sağlanmakta olup üretim prosesi ile birlikte değerlendirme yapılmıştır.

4.1. Yaşam Döngüsü Analizi CML-IA Metodu Etki Analizi Sonuçları

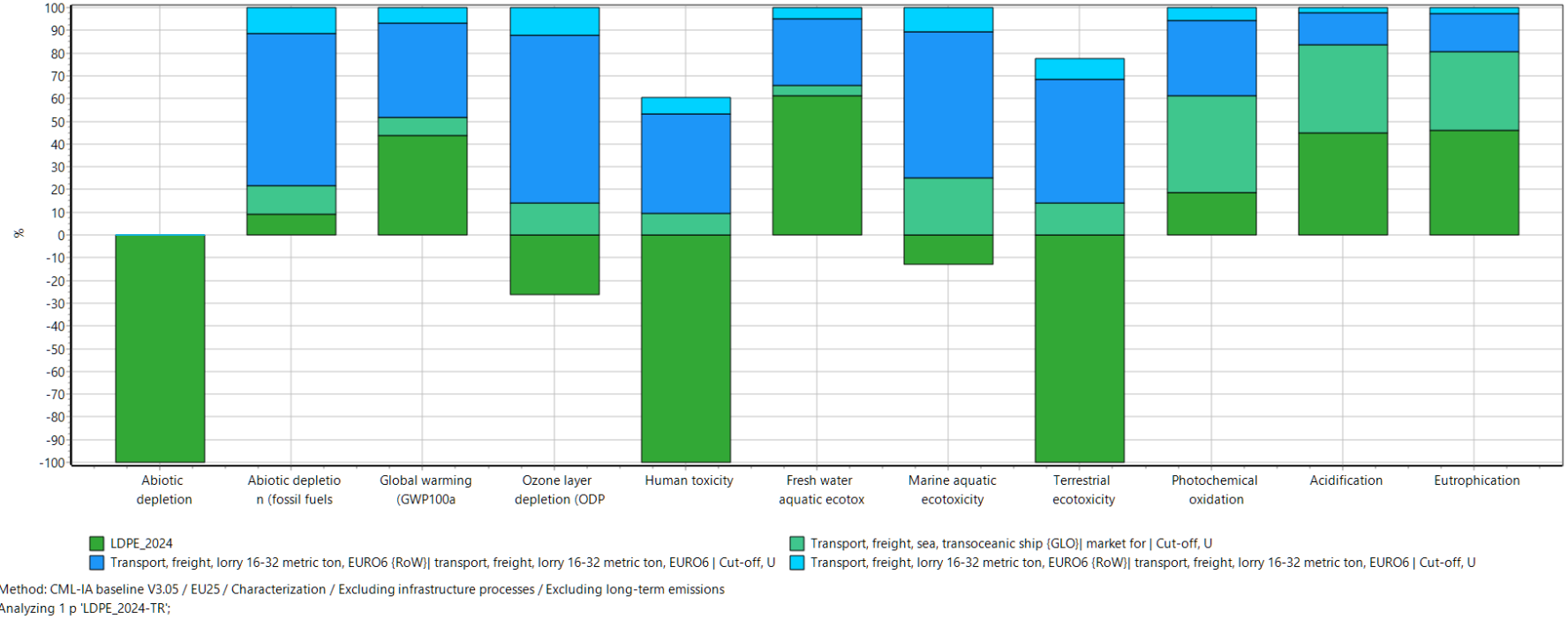
Bu çalışmanın envanter verileri, CML-IA yöntemiyle analiz edildiğinde etki parametrelerine göre üretim ve ulaşım kaynaklı toplu karakterizasyon sonuçları Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. “1 kg rLDPE” CML-IA toplu karakterizasyon sonuçları.

Etki Kategorisi	Birim	Toplam	Üretim (rLDPE)	Deniz yolu ulaşım	Kara yolu ulaşım
Abiyotik kaynak tükenmesi	kg Sb eq	-3,41E-07	-3,41E-07	6,89E-11	-3,41E-07
Fosil yakıt katnak tükenmesi	MJ	3,76E+00	3,42E-01	4,75E-01	8,17E-01
Küresel ısınma potansiyeli	kg CO2 eq	4,23E-01	1,85E-01	3,26E-02	2,18E-01
Ozon tabakası İncelmesi	kg CFC-11 eq	3,24E-08	-1,16E-08	6,11E-09	-5,45E-09
İnsan toksisitesi	kg 1,4-DB eq	-4,09E-02	-1,04E-01	9,69E-03	-9,42E-02
Tatlı su ekotoksistesi	kg 1,4-DB eq	5,78E-03	3,55E-03	2,50E-04	3,80E-03
Deniz ekotoksistesi	kg 1,4-DB eq	1,36E+01	-2,05E+00	3,90E+00	1,86E+00
Kara ekotoksistesi	kg 1,4-DB eq	-5,43E-05	-2,44E-04	3,46E-05	-2,09E-04
Fotokimyasal oksidasyon	(kg C ₂ H ₄ eq)	6,12E-05	1,14E-05	2,61E-05	3,75E-05
Asitleşme potansiyeli	kg SO ₂ eq)	2,15E-03	9,64E-04	8,29E-04	1,79E-03
Ötrafikasyon	kg PO ₄ ³⁻ eq)	2,04E-04	9,40E-05	7,04E-05	1,64E-04

Plastik geri kazanım faaliyeti kapsamında “1 kg rLDPE” granül hammadde elde edilmesi işlemi CML-IA yöntemiyle analiz edildiğinde, üretim ve her iki ulaşım türünün etki kategorilerine göre toplu karakterizasyon grafiğı Şekil 4.1’de verilmiştir.

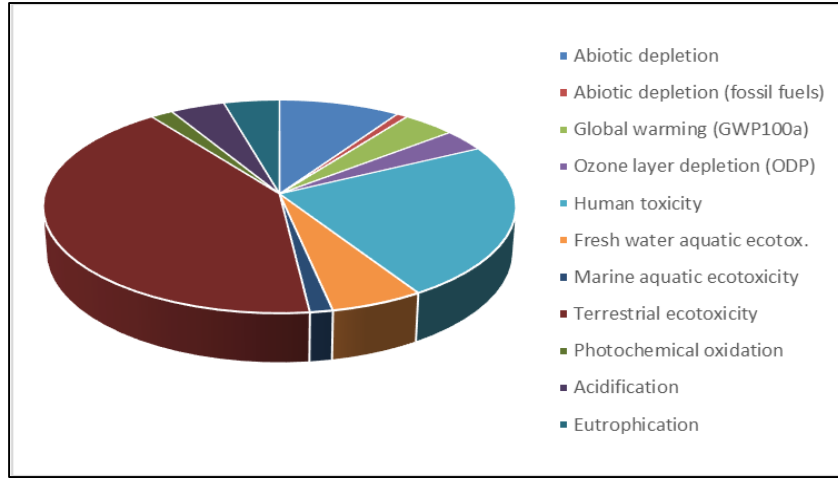




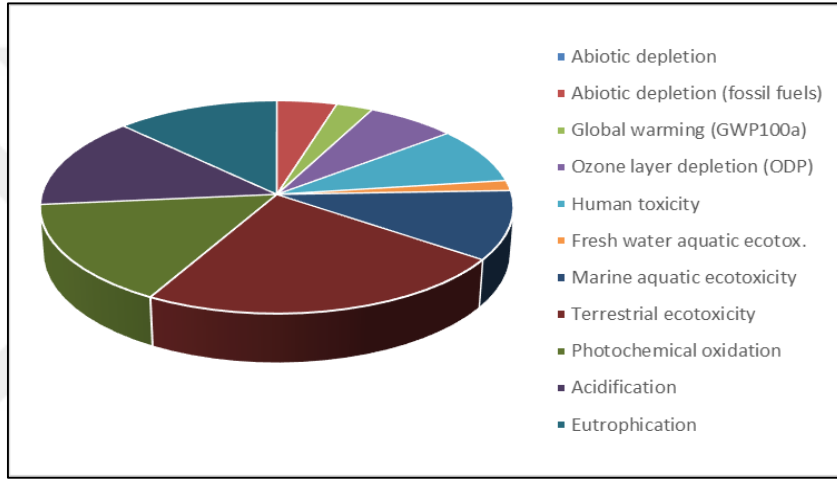
Şekil 4.1. “1 kg rLDPE” yaşam döngüsü CML-IA karakterizasyon analiz sonuçları.

Üretim prosesi, deniz yolu ve kara yolu ulaşımından kaynaklı analiz sonuçları çevresel etkileri açısından değerlendirilme yapıldığında, *küresel ısınma potansiyeli* %44'ü rLDPE üretim prosesinden, %7'si deniz yolu ulaşımından ve %48'i kara yolu ulaşımından kaynaklanmaktadır. *Abiyotik kullanım potansiyeli* çevresel etki analizine göre, rLDPE üretimi %100,15 oranında azaltarak sistemin net negatif çıkmasını sağlamıştır. %0,02'si deniz yolu ulaşımından ve %0,13'ü kara yolu ulaşımından kaynaklanmaktadır. Ulaşımından kaynaklı etki oran değerleri çok düşük olduğundan ihmal edilebilir düzeydedir. Bu durum, rLDPE'nin kaynak tüketimini dengeleyerek ekosistemi koruyan bir geri kazanım sürecine sahip olduğunu göstermektedir. *Ozon tabakası deplasyon potansiyeli* rLDPE üretimi, ozon tabakasına %35,72 oranında fayda sağlarken, deniz yolu ulaşım %18 ve kara yolu ulaşımı %116 zarara neden olmuştur. İnsan toksisitesi açısından değerlendirildiğinde, rLDPE üretim sürecinin %254 oranında olağanüstü bir fayda sağlaması, tesisin aynı zamanda geri dönüşüm faaliyeti yürütmesiyle açıklanabilir. Bu veriler, geri dönüşüm tesislerinin sadece çevresel değil, aynı zamanda insan sağlığı açısından da önemli faydalar sağladığını hatta net pozitif bir etki yarattığını göstermektedir. *Asitleşme potansiyeli* kategorisinde rLDPE üretim süreci toplam çevresel etkinin %45'ini oluştururken, deniz yolu ulaşımı %38'i ve kara yolu ulaşımı %16 oranında katkı sağlamaktadır. *Ötrofikasyon* etkisinde ise rLDPE üretimi %46 oranında en yüksek katkıya sahipken, deniz yolu ulaşımı %34 ve kara yolu ulaşımı %20 oranında etkide bulunmaktadır. Bu durum, her iki etki kategorisinde de üretim sürecinin çevresel etkiler açısından belirleyici unsur olduğunu göstermektedir. Ancak özellikle deniz yolu taşımacılığının ötrofikasyon üzerindeki önemli payı, taşımacılık kaynaklı besin elementi salımlarının dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

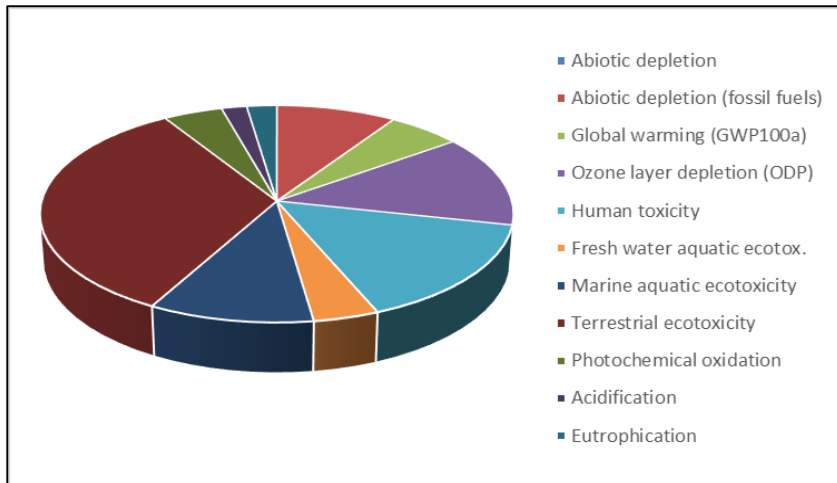
CML-IA yöntemiyle gerçekleştirilen karakterizasyon etki analizi sonuçları kapsamında üretim, deniz yolu ve kara yolu taşımacılığına ilişkin etkiler, yüzde oranları esas alınarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuş ve verilerin görsel olarak daha açık bir şekilde ifade edilebilmesi amacıyla pasta grafiklerle gösterilmiştir. İlgili sonuçların yer aldığı pasta grafikleri Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Üretim kaynaklı etki oranları (CML-IA metodu).



Şekil 4.3. Deniz yolu ulaşım kaynaklı etki oranları (CML-IA metodu).



Şekil 4.4. Kara yolu ulaşım kaynaklı etki oranları (CML-IA metodu).

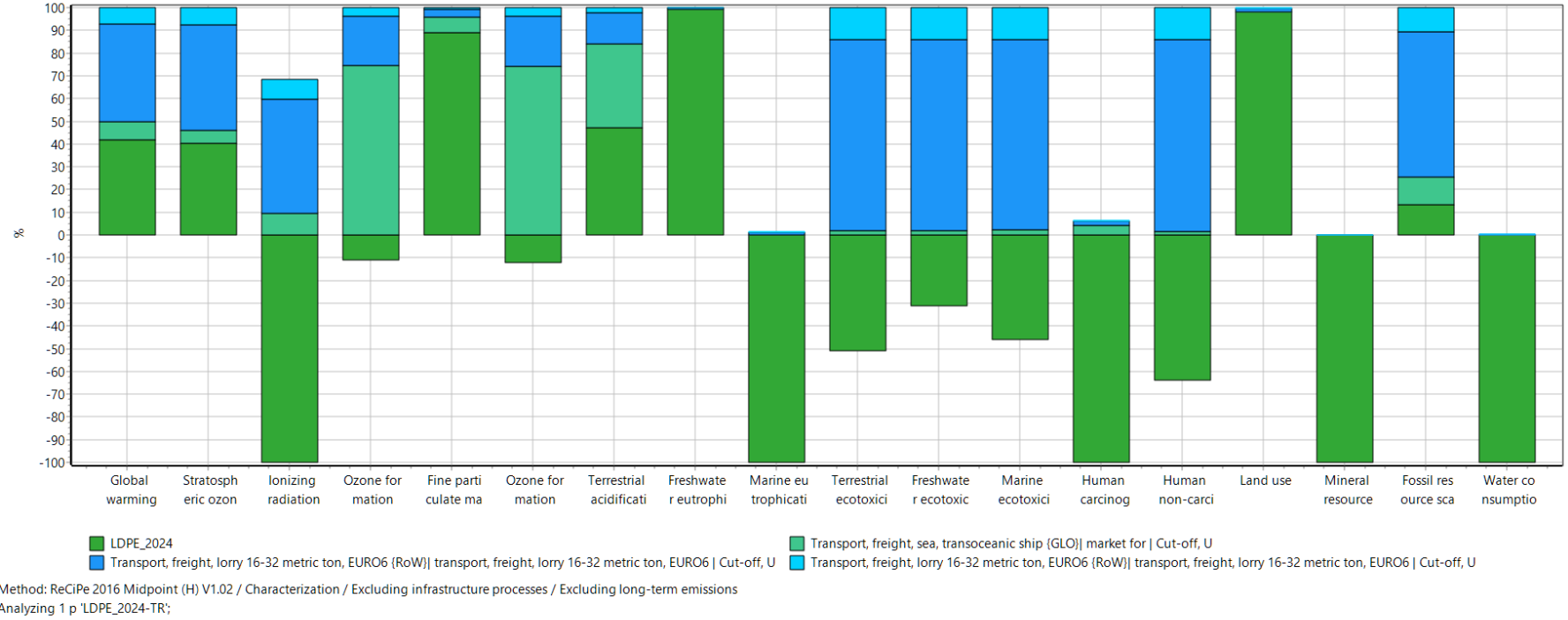
4.2. Yaşam Döngüsü Analizi ReCiPe Metodu Etki Analizi Sonuçları

Yukarıda yapılan etki değerlendirmeleri bu sefer ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.02 metodu ile analiz edilerek karşılaştırma açısından isteğe bağlı yapılmıştır. Tablo 4.2’de üretim ve ulaşım kaynaklı toplu karakterizasyon sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.2. “1 kg rLDPE” toplu karakterizasyon sonuçları.

Etki Kategorisi	Birim	Toplam	Üretim (rLDPE)	Deniz yolu ulaşım	Kara yolu ulaşım
Küresel ısınma	kg CO2 eq	4,11E-01	1,73E-01	3,28E-02	2,05E-01
Stratosferik ozon tabakası incilmesi	kg CFC11 eq	2,78E-07	1,12E-07	1,59E-08	1,28E-07
İyonlaştırıcı radyasyon	kBq Co-60 eq	-8,11E-04	-2,56E-03	2,43E-04	-2,32E-03
Ozon oluşumu (İnsan sağlığı)	kg NOx eq	6,16E-04	-7,73E-05	5,17E-04	4,40E-04
İnce partikül madde oluşumu	kg PM2.5 eq	3,12E-03	2,78E-03	2,09E-04	2,99E-03
Ozon oluşumu (Karasal ekosistemler)	kg NOx eq	6,19E-04	-8,57E-05	5,21E-04	4,35E-04
Karasal asitleşme	kg SO2 eq	1,79E-03	8,43E-04	6,64E-04	1,51E-03
Tatlı su ötrofikasyonu	kg P eq	3,25E-05	3,22E-05	3,68E-08	3,22E-05
Deniz ötrofikasyonu	kg N eq	-1,96E-05	-1,99E-05	2,60E-08	-1,99E-05
Karasal ekotoksosite	kg 1,4-DCB	1,57E+00	-1,64E+00	6,69E-02	-1,57E+00
Tatlı su ekotoksitesitesi	kg 1,4-DCB	3,66E-04	-1,67E-04	1,01E-05	-1,57E-04
Deniz ekotoksitesitesi	kg 1,4-DCB	1,16E-03	-9,86E-04	5,11E-05	-9,34E-04
İnsan karsinojenik toksisitesi	kg 1,4-DCB	-2,48E-03	-2,65E-03	1,06E-04	-2,55E-03
İnsan non-karsinojenik toksisitesi	kg 1,4-DCB	1,45E-02	-2,59E-02	6,19E-04	-2,52E-02
Arazi kullanımı	m2a crop eq	4,91E-03	4,81E-03	1,13E-05	4,82E-03
Mineral kaynak kıtlığı	kg Cu eq	-1,05E-03	-1,05E-03	1,91E-07	-1,05E-03
Fosil kaynak kıtlığı	kg oil eq	9,15E-02	1,23E-02	1,10E-02	2,33E-02
Su tüketimi	m ³	-6,14E-02	-6,18E-02	4,81E-05	-6,17E-02

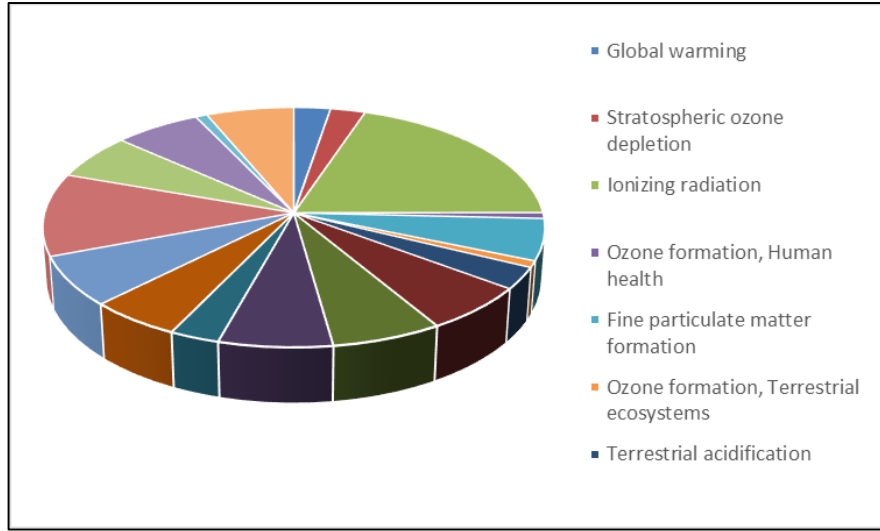
Plastik geri kazanım faaliyeti kapsamında “1 kg rLDPE” granül hammadde elde edilmesi işlemi, ReCiPe metoduyla analiz edildiğinde, üretim ve her iki ulaşım türünün etki kategorilerine göre toplu karakterizasyon grafiği Şekil 4.5’de sunulmuştur.



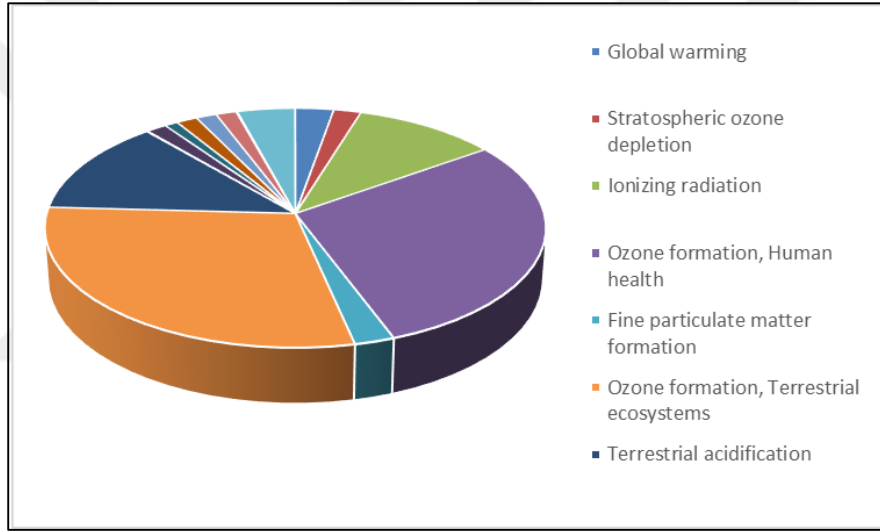
Şekil 4.5. “1 kg rLDPE” yaşam döngüsü ReCiPe karakterizasyon analiz sonuçları.

ReCiPe metodu karakterizasyon sonuçları grafikte görüldüğü üzere, *küresel ısınma potansiyeli* en çok kara yolu ulaşımı sürecinden kaynaklanmakta olup, toplam etkiye %50'ye yakın bir katkı sağlamaktadır. %42'si üretim prosesinden ve %7'si deniz yolu ulaşımı en düşük katkıya sahiptir. Bu durum, kara taşımacılığının fosil yakıt tüketimine bağlı olarak iklim değişikliğine etkisinin daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. *İyonlaştırıcı radyasyon* etkisine %185 oranında en yüksek katkı kara yolu ulaşımından gelmektedir. Bunu %30 oranında deniz yolu ulaşımı takip etmektedir. Buna karşın, geri dönüştürülmüş LDPE (rLDPE) üretim süreci, toplam değeri ciddi oranda azaltarak %-315 oranında negatif etki göstermiştir. Bu negatif değer, üretim sürecinden kaynaklı bir çevresel fayda olduğunu göstermektedir. Genel tabloya bakıldığında, ulaştırma faaliyetleri iyonlaştırıcı radyasyon etkisini artırırken, üretim süreci bu etkiyi azaltıcı yönde rol oynamaktadır. *Su tüketimi etkisi* incelendiğinde, toplam değer negatif çıkmıştır ($-0,0614 \text{ m}^3$), bu da proses genelinde su tüketimini azaltıcı bir fayda olduğunu göstermektedir. Bu azaltıcı etkinin ana kaynağı, geri dönüştürülmüş LDPE üretim süreci olup toplam etkiye %-100,56 oranında azaltıcı yönde katkı sağlamaktadır. Buna karşılık, deniz yolu ulaşımı %0,08 ve kara yolu ulaşımı %0,48 oranında katkı sunmuştur. Bu da taşıma süreçlerinin az da olsa su tüketimine neden olduğunu göstermektedir. Genel değerlendirmede, üretim aşamasının sağladığı çevresel fayda, ulaştırma kaynaklı etkileri baskılamaktadır. *Deniz ekotoksitesi* etki kategorisine etkisi toplamda 0,00116 kg 1,4-DCB eq olarak hesaplanmıştır. Bu etkiye en büyük katkıyı kara yolu ulaşımı sağlamış olup, toplam etkinin %180'inini oluşturmuştur. Deniz yolu ulaşımı ise %4 oranında katkı sunmuştur. Buna karşılık, rLDPE üretim süreci bu kategoriye %-85 oranında negatif etki göstermiştir. Bu durum, üretim sürecinin deniz toksisiteye azaltıcı yönde çevresel bir katkı sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, taşıma faaliyetleri bu etki kategorisinde baskın çevresel yük oluştururken, üretim aşaması dengeleyici bir fayda sağlamaktadır.

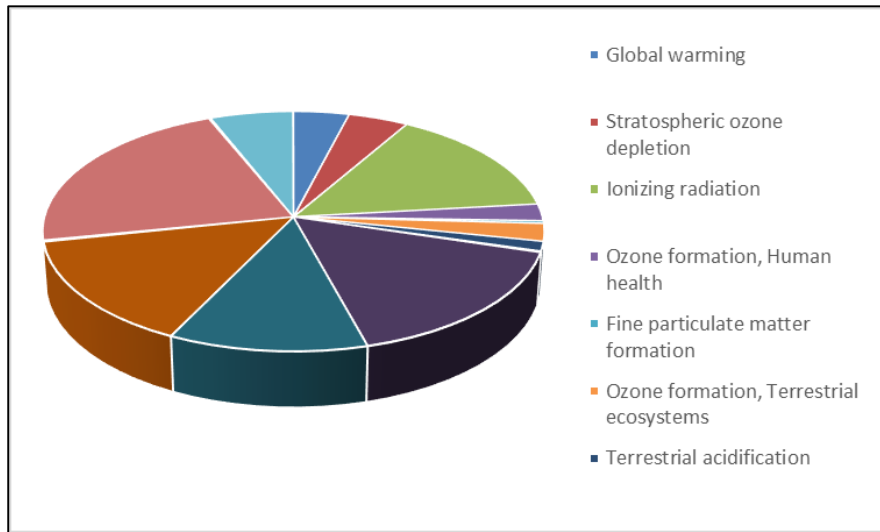
ReCiPe yöntemiyle gerçekleştirilen karakterizasyon etki analizi sonuçları kapsamında üretim, deniz yolu ve kara yolu taşımacılığına ilişkin etkiler, yüzde oranları esas alınarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuş ve verilerin görsel olarak daha açık bir şekilde ifade edilebilmesi amacıyla pasta grafiklerle gösterilmiştir. İlgili sonuçların yer aldığı pasta grafikleri Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Üretim kaynaklı etki oranları (ReCiPe metodu).



Şekil 4.7. Deniz yolu ulaşım kaynaklı etki oranları (ReCiPe metodu).



Şekil 4.8. Kara yolu ulaşım kaynaklı etki oranları (ReCiPe metodu).

4.3. Yaşam Döngüsü Analizi IMPACT Metodu Etki Analizi Sonuçları

Yukarıda yapılan etki değerlendirmeleri bir diğer yaşam döngüsü analiz metodu olan “IMPACT 2002+” yöntemiyle hem karakterizasyon hemde normalizasyon ile analiz edilmiştir.

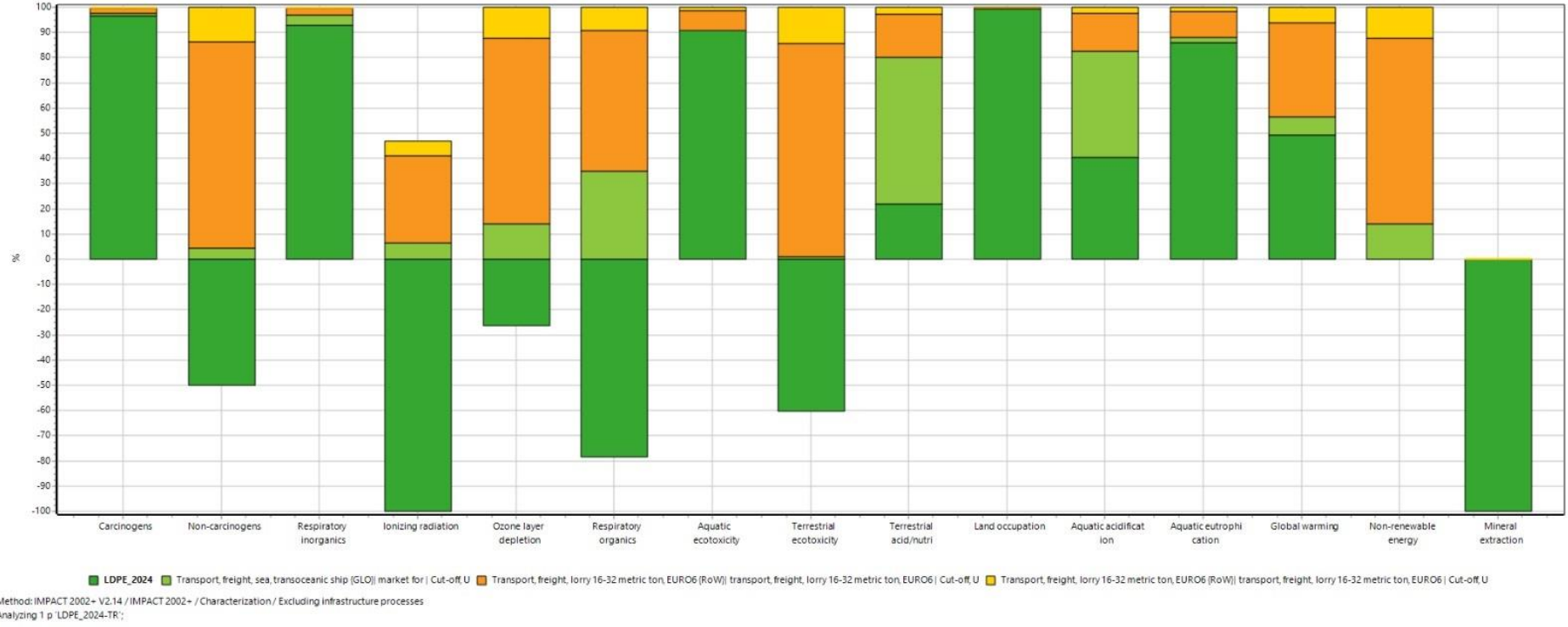
4.3.1. IMPACT karakterizasyon metodu etki analizi sonuçları

Üretim ve her iki ulaşım türünün etki kategorilerine göre toplu karakterizasyon sonuçları Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. “1 kg rLDPE” üretim ve ulaşım kaynaklı IMPACT toplu karakterizasyon sonuçları.

Etki Kategorisi	Birim	Toplam	Üretim (rLDPE)	Deniz yolu ulaşım	Kara yolu ulaşım
Kanserojenler	kg C2H3Cl eq	1,39E-02	1,35E-02	1,33E-04	1,36E-02
Kanserojen olmayanlar	kg C2H3Cl eq	1,91E-03	-1,86E-03	1,74E-04	-1,69E-03
Solunabilir inorganikler	kg PM2.5 eq	2,82E-03	2,61E-03	1,17E-04	2,73E-03
İyonlaştırıcı radyasyon	Bq C-14 eq	-1,83E-01	-1,69E+0	2,09E-01	-1,48E+0
Ozon tabakası incilmesi	kg CFC-11 eq	3,24E-08	-1,16E-08	6,11E-09	-5,45E-09
Solunabilir organikler	kg C2H4 eq	1,26E-05	-4,54E-05	2,02E-05	-2,52E-05
Sucul ekotoksosite	kg TEG water	1,52E+02	1,38E+02	2,28E-01	1,38E+02
Karasal ekotoksosite	kg TEG soil	6,72E+00	-1,00E+0	1,47E-01	-9,88E+0
Toprak asidifikasyonu/besin yükü	kg SO2 eq	5,75E-03	1,27E-03	3,34E-03	4,61E-03
Arazi kullanımı	m2org.arable	6,17E-03	6,12E-03	5,83E-06	6,13E-03
Sucul asidifikasyon	kg SO2 eq	1,99E-03	8,10E-04	8,39E-04	1,65E-03
Sucul ötrofikasyon	kg PO4 P-lim	1,26E-04	1,08E-04	2,41E-06	1,10E-04
Küresel ısınma	kg CO2 eq	4,64E-01	2,30E-01	3,24E-02	2,62E-01
Yenilenemeyen enerji kullanımı	MJ primary	3,64E+00	-3,01E-03	5,05E-01	5,02E-01
Mineral çıkarımı	MJ surplus	-9,12E-03	-9,13E-03	2,14E-06	-9,13E-03

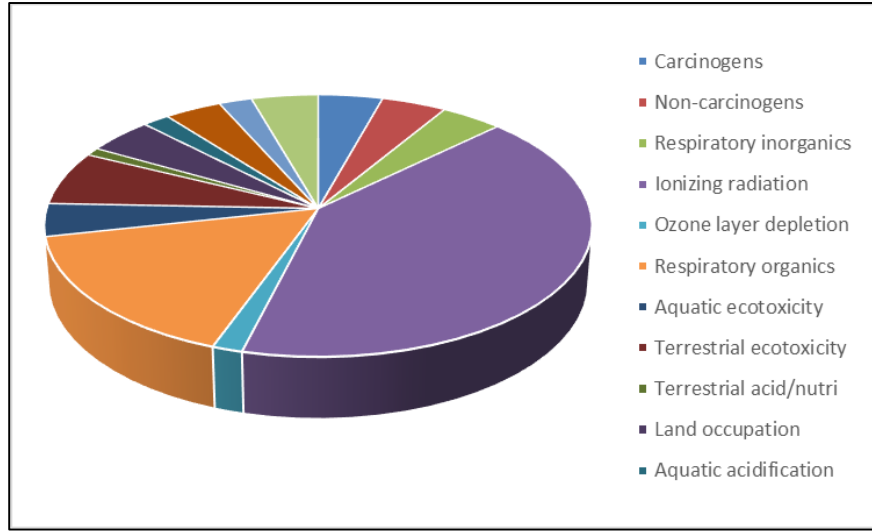
Plastik geri kazanım faaliyeti kapsamında “1 kg rLDPE” granül hammadde elde edilmesi işlemi, IMPACT 2002+ metoduyla analiz edildiğinde, üretim ve her iki ulaşım türünün etki kategorilerine göre toplu karakterizasyon grafiği Şekil 4.9’da verilmiştir.



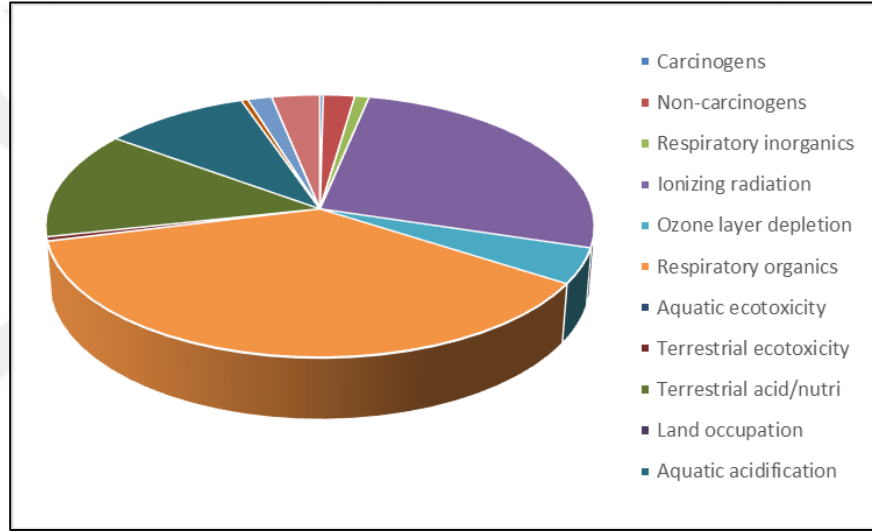
Şekil 4.9. “1 kg rLDPE” yaşam döngüsü IMPACT karakterizasyon analiz sonuçları.

IMPACT 2002+ metodu karakterizasyon sonuçları grafikte görüldüğü üzere, *küresel ısınma etkisi* toplamda 0,4644 kg CO₂ eq olarak hesaplanmıştır. Bu etki kategorisine en yüksek katkı, rLDPE üretim süreci tarafından sağlanmış olup, %49 oranında katkı göstermektedir. Kara yolu ulaşımı, toplam sera gazı salımının %43'ünü oluşturarak önemli bir ikinci kaynak olarak öne çıkmaktadır. Deniz yolu ulaşımı ise daha düşük bir etkiye sahip olup %7 oranında katkıda bulunmaktadır. Bu sonuçlar, hem üretim hem de kara yolu taşımacılığının küresel ısınma potansiyeli üzerinde baskın etkilere sahip olduğunu, deniz taşımacılığının ise bu kategoriye sınırlı düzeyde katkı sağladığını göstermektedir. *Solunabilir organikler* kategorisinde en yüksek etki kara yolu ulaşımı tarafından sağlanmış olup, toplam etkinin %299'unu oluşturmaktadır. Deniz yolu ulaşımı da dikkate değer bir katkı sunmuş ve %160 oranında etkili olmuştur. Buna karşılık, rLDPE üretim süreci, %-360 gibi yüksek oranda negatif etki göstermiştir. Bu durum, üretim aşamasının bu etki kategorisinde önemli bir çevresel fayda sağladığını ortaya koymaktadır. Genel değerlendirmede, taşıma süreçleri bu kategoriye güçlü etkiler yaparken, üretim aşamasının etkileri önemli ölçüde azaltıcı yöndedir. *Mineral çıkarımı* etkisi toplamda -0,00912 MJ surplus olarak hesaplanmıştır. Bu negatif değer, sistemin genelinde mineral kaynak kullanımı açısından çevresel bir fayda sağladığını göstermektedir. Bu faydanın neredeyse tamamı rLDPE üretim sürecinden kaynaklanmakta olup, bu süreç toplam etkiye %-100 oranında azaltıcı yönde katkı sağlamaktadır. Buna karşılık, deniz yolu ulaşımı %0,02 ve kara yolu ulaşımı %0,16 oranında etkiler göstermiştir. Genel olarak, üretim süreci bu kategoriye baskın şekilde olumlu katkı sağlarken, ulaştırma süreçlerinin etkisi oldukça etkilidir.

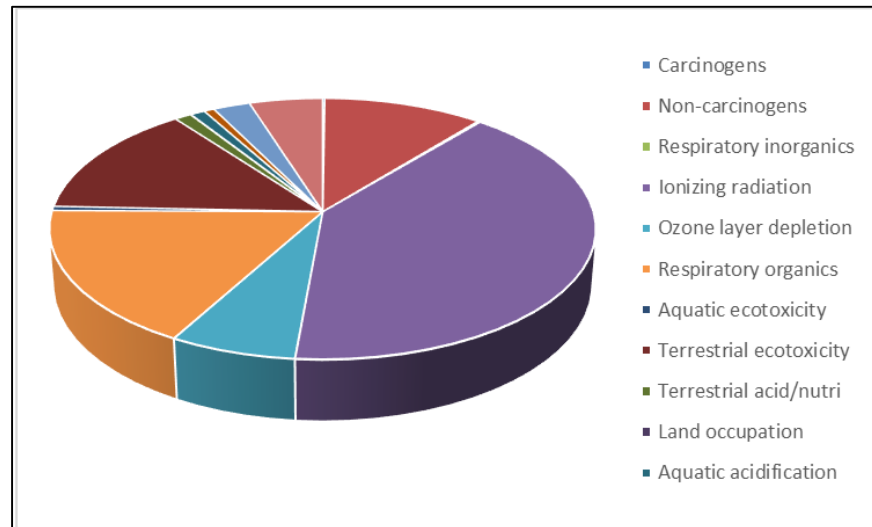
IMPACT yöntemiyle gerçekleştirilen karakterizasyon etki analizi sonuçları kapsamında üretim, deniz yolu ve kara yolu taşımacılığına ilişkin etkiler, yüzde oranları esas alınarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuş ve verilerin görsel olarak daha açık bir şekilde ifade edilebilmesi amacıyla pasta grafiklerle gösterilmiştir. İlgili sonuçların yer aldığı pasta grafikleri Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Üretim kaynaklı etki oranları (IMPACT metodu).



Şekil 4.11. Deniz yolu ulaşımından kaynaklı etki oranları (IMPACT metodu).



Şekil 4.12. Kara yolu ulaşımından kaynaklı etki oranları (IMPACT metodu).

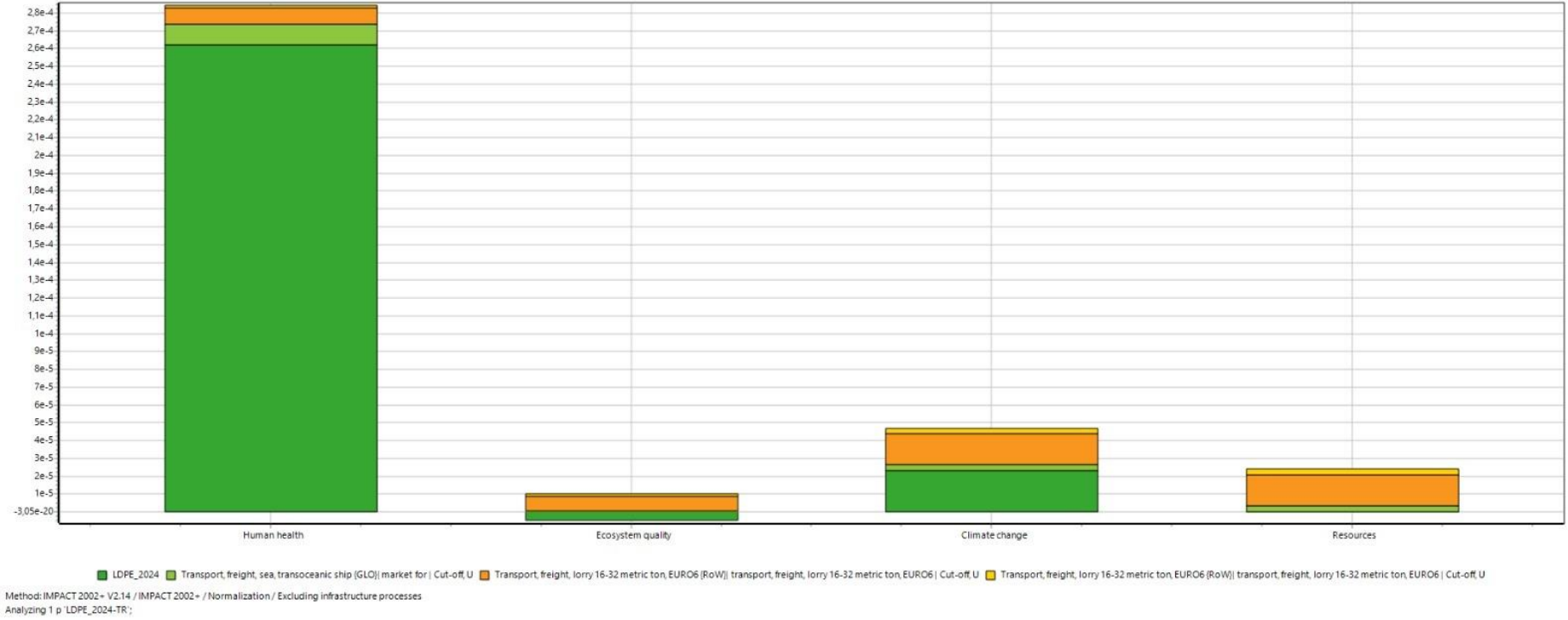
4.3.2. IMPACT normalizasyon metodu etki analizi sonuçları

Üretim ve her iki ulaşım türünün etki kategorilerine göre normalizasyon sonuçları Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4. “1 kg rLDPE” üretimi IMPACT normalizasyon sonuçları.

Etki Kategorisi	Toplam	Üretim (rLDPE)	Deniz yolu ulaşım	Kara yolu ulaşım
İnsan sağlığı	2,84E-04	2,62E-04	1,17E-05	1,05E-05
Ekosistem	5,33E-06	-4,73E-06	3,40E-07	9,73E-06
İklim değişimi	4,69E-05	2,32E-05	3,27E-06	2,04E-05
Kaynaklar	2,39E-05	-7,99E-08	3,33E-06	2,06E-05

Normalizasyon yönetimiyle insan sağlığı, ekosistem, iklim değişimi ve kaynaklar adı altındaki kategoriler normalizasyon ile analiz edilmiş olup program çıktısına ait grafik Şekil 4.13’de verilmiştir.

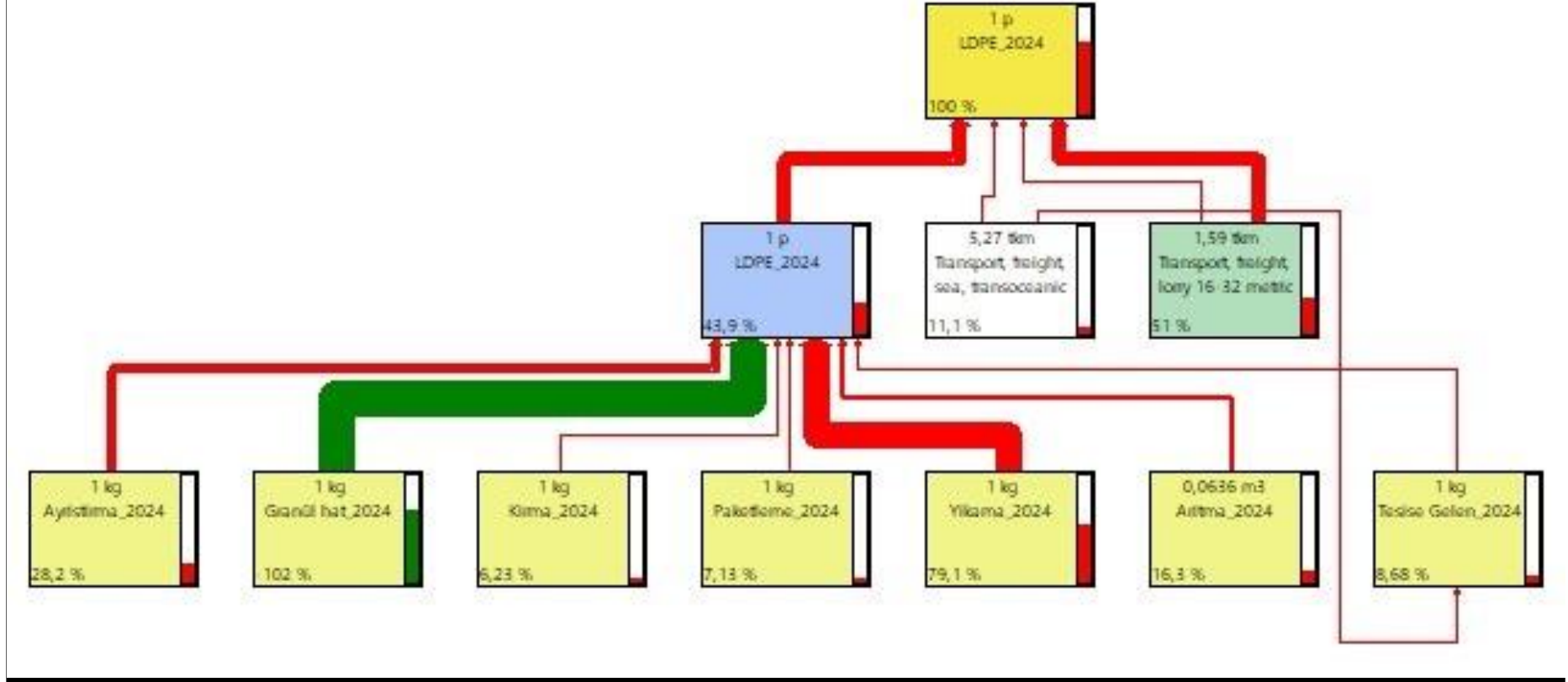


Şekil 4.13. IMPACT normalizasyon etki analiz sonuçları.

Yukarıda verilen grafik her bir kategori için toplam etkiyi ve bu toplam etkinin üretim, deniz yolu ve kara yolu süreçlerine göre karşılaştırılmıştır. Impact 2002+ metodolojisiyle hesaplamalar normalize edilmiş olup, dört ana hasar kategorisindeki (insan sağlığı, ekosistem kalitesi, iklim değişikliği, kaynak tüketimi) etki dağılımlarını yüzdesel olarak göstermektedir. “rLDPE” üretimi, insan sağlığı üzerinde %92 etki ile neredeyse toplam etkinin tamamından sorumludur. İklim değişikliği %49 üzerinde baskın rol oynarken; kara yolu taşımacılığı, ekosistem kalitesi %182 ve kaynak tüketimi %86 açısından kritik bir baskı unsuru olarak öne çıkmaktadır. Bu analiz, rLDPE yaşam döngüsündeki en kritik çevresel baskıların üretim ve kara yolu taşımacılığından kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Bu kategoriler arasında dikkat çekici olan üretim kaynaklı sürecin etkisi %-88,749 oranındadır. Bu durum, üretim sürecinin ekosistem kalitesi üzerinde olumlu yani etkiyi azaltıcı net bir etkisi olduğunu açıkça göstermektedir.

4.4. “1 kg rLDPE” Granül Üretimi İçin Yapılmış Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Bu tez çalışmasında ki tüm veriler firma özelindedir. Plastik geri kazanım faaliyeti üzerine “1 kg rLDPE” granül üretimi için yapılmış olup 2024 yılı üretim verileri ile Yaşam Döngüsü Envanteri (LCI) SimaPro akış şeması Şekil 4.14’de sunulmuştur.



Şekil 4.14. Yaşam döngüsü envanteri (LCI) SimaPro akış şeması.

Bu akış şeması, “Şam Yapı A.Ş Sakarya Şubesi” unvanlı plastik geri kazanım tesisinde “1 kg rLDPE” granül üretiminin SimaPro programı kullanılarak elde edilen yaşam döngüsü envanteri (LCI) akış şemasını göstermektedir. Bu şema, farklı proses aşamalarının ve taşıma faaliyetlerinin sistemin genel çevresel etkisine olan yüzdesel katkılarını detaylandırmaktadır. Oklar, malzeme ve enerji akışlarını temsil ederken, renkler (kırmızı ve yeşil) ve kalınlıklar akışların büyüklüğünü ve yönünü belirtmektedir. Kırmızı renk yüksek etkileri, yeşil ise geri dönüşüm veya faydalı akışları temsil etmektedir. Kutuların içindeki yüzdelere, ilgili prosesin bir önceki ana prosese olan katkısını göstermektedir. Şema hakkındaki çıkarımlar aşağıda açıklanmıştır.

Ana kutu ve çıkışlar:

- **1 p LDPE_2024 (En üstteki sarı kutu):** Tüm sistemin fonksiyonel birim olarak belirlediğim "1 kg rLDPE" yani ürünü temsil etmektedir. Buradan çıkan oklar, toplam etkinin ve sistemin ana proseslerini göstermektedir.
- **1 p LDPE_2024 (Mavi kutu, %43,9):** Bu, sistemin ana faaliyeti yani geri kazanım aşamasını temsil etmektedir.
- **Transport, freight, sea, transoceanic (Deniz yolu taşımacılığı, %11,1):** Sistemin toplam etkisinin %11,1'inin deniz yolu taşımacılığından geldiğini göstermektedir. Okun kalınlığı, bu katkının önemli olduğunu vurgulamaktadır.
- **Transport, freight, lorry 16-32 metric (Kara yolu taşımacılığı, %51):** Sistemin toplam etkisinin %51'inin kara yolu taşımacılığından geldiğini göstermektedir. Bu, taşıma süreçleri arasında en büyük paya sahip olanıdır ve kalın kırmızı okla belirtilmiştir.

Mavi Kutu (Ana proses) ve çıkışlar:

Şemada “1 p LDPE_2024” şeklinde belirtilen kutu ana proses altındaki detayları göstermektedir. Bu kısım “1 kg rLDPE” granül üretimi için gerçekleştirilen çeşitli işlemleri ve bunların etkiye katkılarını göstermektedir;

1 kg Ayırıştırma_2024 (%28,2): Geri kazanım sürecinin ilk adımlarından biri olan ayırıştırma işleminin toplam etkiye %28,2 oranında katkıda bulunduğunu göstermektedir. Ayırıştırma hattı, sisteme dahil edilen malzemelerin türlerine göre ayrılması, kontaminasyonun azaltılması ve sonraki işlemlere uygun hammadde elde

edilmesi amacıyla kullanılan bir süreçtir. Bu aşama, özellikle mekanik ekipmanların enerji tüketimi ve ayrıştırma sırasında ortaya çıkan atık fraksiyonları nedeniyle çevresel yük oluşturmaktadır. Elektrik tüketimine bağlı olarak küresel ısınma potansiyeli (GWP) ve fosil kaynak kullanımı kategorilerinde etkiler gözlenirken, yanlış ayrıştırılan veya reddedilen fraksiyonların bertaraf edilmesi de atık yönetimiyle ilişkili ek çevresel yükler yaratmaktadır. Bununla birlikte, ayrıştırma hattı sayesinde geri kazanılabilir malzeme miktarı artmakta ve daha sonraki süreçlerde (örneğin yıkama ve yeniden işleme) enerji ve kaynak tüketimi azalabilmektedir. Bu yönüyle ayrıştırma hattı, kısa vadede belirli bir çevresel etkiye sahip olsa da uzun vadede sistemin genel çevresel yükünü azaltıcı bir işlev üstlenmektedir.

1 kg Granül hat_2024 (%102): Üretim prosesinin detaylarına inildiğinde, “Granül hat_2024” prosesinin %102 gibi oldukça yüksek bir oranda katkı sağladığını vurgulamak gerekir. Bu bulgu, tesisin temel geri kazanım faaliyeti olan plastik atıklardan granül üretimi sürecinin, sistemin toplam çevresel yükündeki baskın rolünü açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle ekstrüzyon ve eritme gibi enerji yoğun aşamaları barındıran bu granül üretim hattı, ana enerji tüketim noktasını temsil etmektedir.

Bu prosesin katkısının %100'ü aşması, dikkatle incelenmesi gereken bir noktadır. Genel LCA uygulamalarında, bir prosesin %100'ün üzerinde bir katkı göstermesi, genellikle o prosesin tek başına yarattığı çevresel etkinin tüm sistemin net etkisinden daha büyük olduğunu, sistemdeki diğer bazı süreçlerin çevresel faydalar (negatif etkiler veya krediler sağlayarak toplam etkiyi düşürdüğünü gösterir. Örneğin, önceki hesaplanan etki analizi Tablo.10'da ekosistem kalitesi ve kaynaklar etki kategorilerindeki üretim prosesinden gelen negatif yüzdeler, bu tür kredi mekanizmalarının varlığına işaret etmektedir. Bu bağlamda, granül hattı prosesinin yüksek enerji kullanımı ve çevresel yüküne rağmen, atıkların geri kazanılmasıyla elde edilen ikincil malzemenin (granül) doğal kaynaklardan yeni malzeme üretimine göre sağladığı potansiyel çevresel faydalar, sistemin genel dengesinde bir tolerans yani kredi etkisi göstermektedir.

Tesisin üretimde ana yakıt olarak elektrik kullanması, bu etkinin elektrik üretiminin çevresel ayak izine de bağlı olduğunu göstermektedir. Bu noktada, işletmenin çevresel performansını olumlu yönde etkileyen kritik uygulamaları vurgulamak gerekmektedir. İşletmede yıkama hattından oluşan atıksuların arıtma yapılarak tekrar yıkama hattında kullanılması (devir daimli arıtma), su tüketimi ve atıksu deşarjının çevresel etkilerini

önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, tesisin elektrik ihtiyacının bir kısmını kendi bünyesindeki güneş enerjisi panellerinden karşılaması, şebeke elektriğine olan bağımlılığı ve dolayısıyla ilişkili çevresel etkileri düşürerek genel sisteme bir çevresel kredi sağlamaktadır. Dolayısıyla, bu yüksek yüzde oranı, granül hattının mutlak etkisini vurgularken, aynı zamanda geri kazanım faaliyetinin bütüncül çevresel faydasını ve tesisin sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlarını da dolaylı olarak işaret etmektedir.

1 kg Kırma_2024 (%6,23): Kırma prosesi, sistemin toplam çevresel etkilerine %6,23 oranında katkı sağlamaktadır. Bu katkının temel nedeni, prosesin yüksek elektrik tüketimi olup, kullanılan elektrik karışımına bağlı olarak küresel ısınma potansiyeli ve fosil kaynak tüketimi üzerinde belirgin etkiler yaratmaktadır. Bu bulgular, kırma prosesinin orta düzeyde çevresel yüke sahip olduğunu, ancak enerji verimliliği önlemleri ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanan elektrik kullanımı ile bu etkinin azaltılabileceğini göstermektedir.

1 kg Paketleme_2024 (%7,13): Granüllerin paketleme aşamasının %7,13 katkıda bulunduğunu göstermektedir.

1 kg Yıkama_2024 (%79,1): Yıkama_2024 prosesi, %79,1'lik yüksek katkısıyla ve şemada ki kalın kırmızı ok ile belirtildiği üzere, çevresel etkiye önemli bir yük getirmektedir. Bu yüksek yüzde, yıkama işlemi sırasında harcanan enerji, bu süreçten kaynaklanan atıksuyun ilk oluşumundaki çevresel etkisini yansıtmaktadır. Ancak, tesisin bu prosesin çevresel yükünü minimize etme adına önemli katkı olarak, yıkama hattından oluşan atıksular arıtılarak tekrar yıkama hattında devir daim yöntemiyle kapalı döngüde kullanılması önemli ölçüde hafifletmekte ve tatlı su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltmaktadır. Bu uygulama, yıkama prosesinin ilk etapta yarattığı yüksek çevresel etkiyi su tüketimi ve atıksu deşarjı açısından etki olarak hesaplamıştır. Dolayısıyla, şemadaki yüksek yüzde, prosesin enerji ve kaynak talebini gösterse de, tesisin uyguladığı bu devir daimli arıtma sistemi sayesinde yıkama faaliyetinin genel sistem üzerindeki net çevresel ayak izi proaktif bir şekilde yönetilmekte ve düşürülmektedir. Bu durum, döngüsel ekonomi prensiplerinin tesiste etkin bir şekilde uygulandığını ve çevresel etkilerin yönetiminde bütüncül bir yaklaşım sergilendiğini ortaya koymaktadır.

0.0636 m³ Arıtma_2024 (%16,3): Atık su arıtma sürecinin %16,3 oranında katkıda bulunduğunu gösterir. Bu oran, atıksu arıtma sürecinin kendisinin enerji tüketimi,

gerekli kimyasallar ve arıtma çamuru yönetimi gibi faktörler nedeniyle bir çevresel yük oluşturduğunu göstermektedir. Ancak, daha önce belirtildiği üzere, işletmede yıkama hattından oluşan atıksuların arıtma tesisinde işlenerek tekrar yıkama hattına yönlendirilmesi (devir daimli arıtma) prensibi benimsenmiştir. Bu durum, arıtılan suyun tekrar kullanılmasıyla şebeke suyu ihtiyacını önemli ölçüde azalttığını ve böylece genel su ayak izini düşürdüğünü göstermektedir.

1 kg Tesise Gelen_2024, Nakliye (%8.68): Sistemin başlangıç aşamasında, “1 kg Tesise Gelen_2024” prosesi toplam etkiye %8,68 oranında katkıda bulunmaktadır. Bu yüzde, geri kazanım tesisine ulaşan hammadde (atık plastik) tedarik zincirinden kaynaklanan çevresel yükü temsil etmektedir. Bu bağlamda, tesisin hammadde temin stratejisinin çevresel etkiler üzerinde önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir. Geri kazanım için gelen atıkların çoğunluğu yurt dışından ithal edildiği ve bu atıkların tesise ulaşımında hem deniz yolu hem de kara yolu taşımacılığının kullanıldığı göz önüne alındığında, %8,68'lik bu katkının büyük ölçüde uzun mesafeli taşıma faaliyetlerinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Bu durum, atık toplama ve taşıma ağının global ölçekte olmasının getirdiği bir çevresel maliyet olup, taşıma modlarının ve mesafelerinin optimize edilmesinin gelecekteki çevresel iyileştirmeler için potansiyel bir alan olduğunu işaret etmektedir.

4.5. Birincil ve Geri Dönüştürülmüş Plastik Hammaddelerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Kullanım ömrü sonu plastik yönetimi için çeşitli seçeneklerin göreceli çevresel etkileri üzerine çok sayıda yaşam döngüsü değerlendirmesi (Life Cycle Assessment - LCA) yapılmıştır. Bu çalışmalar, plastik geri dönüşümün plastik yakma veya depolamaya göre önemli ölçüde daha küçük sera gazı ayak izine sahip olduğu sonucuna varmaktadır. Türkiye'de bir yılda yaklaşık 9,6 milyon ton plastik üretilmektedir ve bunun geri kazanılan miktarı sadece 500 bin ton'dur [41].

Avrupa Yeşil Anlaşması'nın merkezinde yer alan; 2050 yılına kadar iklim nötr olma hedefine ulaşmak için sera gazı emisyonları önemli ölçüde azaltılmalı ve sürdürülebilir ekonomik modeller desteklenmelidir. Yeşil Mutabakat'ın temel taşlarından biri, geri dönüşümü artırarak, atık oluşumunu ve hammaddelerin çıkarılmasını indirgemeyi, böylece doğal kaynakların sürdürülebilir ve etkin kullanımını teşvik etmeyi amaçlayan dögösel ekonomi (DE) stratejisidir [42].

Atıkların yeniden kullanılmasını, geri dönüştürülmesini ve hammaddeye dönüştürülmesini teşvik eden döngüsel ekonomi, sürdürülebilir bir dünyaya ulaşmak için gerekli hale gelmiştir. Geri dönüşüm, plastik atıkları malzeme yaşam döngülerine yeniden entegre ederken ekolojik etkisini en aza indirmenin en etkili yaklaşımı olarak giderek daha fazla kabul görmektedir [43].

Geri dönüşüm faaliyetleri, uzun vadeli perspektifte değerlendirildiğinde, etkin ve sürdürülebilir bir ekonomik yatırım stratejisi olarak öne çıkmaktadır. Birincil hammaddelere olan talebin artışı ile doğal kaynakların azalması, kaynak kıtlığı ve fiyat istikrarsızlığı gibi ciddi makroekonomik sorunları beraberinde getirmektedir. Geri dönüşüm ise, bu sorunlara yönelik önemli bir çözüm sunarak, hammadde temininde dışa bağımlılığı azaltmakta, enerji verimliliği sağlamak ve dolayısıyla ekonomik sistemi olumlu yönde desteklemektedir. Ayrıca, atık malzemelerin ikincil hammadde olarak üretim süreçlerine yeniden kazandırılması, atık bertaraf maliyetlerini düşürmenin yanı sıra, çevresel kirliliğin ve ekolojik ayak izinin önlenmesi açısından da kritik bir rol oynamaktadır.

4.5.1. Çalışma bulgularının literatür ile doğrulanması

Literatürde, geri dönüştürülmüş plastik malzemelerin yeniden kullanımının, birincil polimer üretimine kıyasla önemli çevresel faydalar sağladığını ortaya koyan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Literatürdeki bu bulgular, geri dönüştürülmüş hammaddelerin çevresel sürdürülebilirlik açısından önemini doğrulamaktadır.

- Örneğin; Geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ile saf HDPE karışımından 1 kg polietilen (PE) boru sınıfı reçine üretimine ilişkin yaşam döngüsü analizinde, “1 kg saf HDPE'nin 2,40 kg CO₂ eşdeğeri, 1 kg geri dönüştürülmüş HDPE'nin ise 0,86 kg CO₂ eşdeğeri ile 0,23 kg CO₂ eşdeğeri” arasında emisyon salımına sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Bu oranlar geri dönüştürülmüş HDPE plastik kullanımının birincil hammaddeye kıyasla iklim değişikliği etki kategorisine daha az kirletici etkisi olduğunu göstermektedir. Asitleşme etki kategorisine etkisi de yine aynı şekilde iklim değişikliğindeki sonuca benzerdir. Fosil kaynak kullanımına etkisi “1 kg saf HDPE 76 MJ fosil kaynağının tükenmesine yol açarken, 1 kg geri dönüştürülmüş HDPE'nin yaklaşık 3,97 MJ ve 4,14” tükenmesine yol açmaktadır. Bu doğrultuda sonuçlar yine iklim değişikliği ve asitleşmede gözlemlenen eğilimi yansıtmaktadır [44].

Literatürdeki sektör LCA çalışmalarında elde edilen potansiyel çevresel etkiler, bu tez çalışmasında ki bulgular ile paralellik göstermektedir. Bu tez çalışmasında elde edilen rLDPE sonuçları da benzer şekilde, geri dönüştürülmüş hammaddenin kullanımının çevresel etkiyi azalttığını göstermektedir. Bu bulgular, geri dönüştürülmüş plastiklerin polimer üretiminde çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaj sağladığını doğrulamaktadır.

4.6. Plastik Malzemelerin Yaşam Döngüsü ve Geri Dönüşüm Yaklaşımları

Polimer malzemelerin yaşam döngüsü, çeşitli ürün ve bileşenlere dönüştürülen hammaddelerle başlar. Kullanım ömürlerinin sonunda ürünler, atık bertaraf şirketleri tarafından ayrı olarak veya genel atıklarla birlikte toplanan plastik atık olarak atılır. Plastik atıkları azaltmak için etkili bir seçenek, bu ürünleri geri dönüştürmek ve yeniden değerlendirmektir. Geri dönüşüm, kapalı devre bir sistem aracılığıyla hammadde kullanımını ve atıkları azaltabilir. Yeniden değerlendirme, daha yüksek değere sahip bir ürün elde etmek için plastik atıklara değer katmaktır [45].

Petrokimyasal polimerler, ozon tabakasının incelmesine, iklim değişikliğine ve küresel ısınmaya neden olduğu için, çöp depolama veya yakma yerine geri dönüşüme tercih edilmektedir [46].



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, veri analizi sonrasında elde edilen bulgular doğrultusunda, çevresel etki değerlendirmesi CML-IA baseline V3.05, ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.02 ve IMPACT 2002+ V2.14 metodolojileri kullanılarak gerçekleştirilmiş; yapılan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) sonucunda, tehlikesiz atık plastik geri kazanım tesisinde “1 kg rLDPE” granül üretim sürecine ait çevresel etkiler detaylı şekilde analiz edilmiştir.

Elde edilen bulgular, tesisin mevcut çevresel performansını ortaya koyarken, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için odaklanması gereken kritik stratejik alanları da açıkça belirlemiştir. Ayrıca plastik malzemelerin geri kazanım sonucu tekrardan ikincil hammadde olarak kullanılmasının önemi de ortaya konulmuş olup, birincil polimer bazlı plastik üretimine kıyasla daha az çevresel etki oluşturmaktadır. İkincil hammaddelerin kullanımının çevresel faydaları, yaşam döngüsü analizleri ile net bir şekilde desteklenmektedir. Geri dönüştürülmüş plastiklerin üretimi, ham petrolden başlayan birincil üretim yoluna kıyasla, sera gazı emisyonlarını ve enerji tüketimini önemli ölçüde azaltarak, daha sürdürülebilir bir üretim modeli sunmaktadır.

Geri dönüşüm, Avrupa ekonomisinin önemli bir ayağı haline gelmiştir ve ekolojik mevzuat nedeniyle yüksek büyüme potansiyeline sahiptir [47]. Bir petrokimyasal polimer, bertaraf senaryosu sırasında çevresel etkiyi artırma potansiyeline sahiptir ve iklim değişikliğine ve insan toksisitesine neden olur. Plastiklerin geri dönüşümü ve enerji geri kazanımı, saf plastik üretimine kıyasla daha az etki yaratır [46].

Çalışmanın analiz sonuçları, özellikle insan sağlığı üzerindeki etkinin büyük ölçüde üretim proseslerinden kaynaklandığını gösterirken, iklim değişikliği, ekosistem kalitesi ve kaynak tüketimi gibi diğer kategorilerde lojistik süreçlerin, bilhassa kara yolu taşımacılığının önemli bir paya sahip olduğunu belirlemiştir. Geri kazanım için gelen atıkların çoğunluğu yurt dışından ithal edilmesi ve deniz/kara yolu ile taşınması, tedarik zincirindeki lojistik etkilerin önemini pekiştirmektedir.

Tesis içi operasyonlara odaklanıldığında, granül hattı ve yıkama prosesleri, enerji yoğunlukları nedeniyle toplam çevresel yüke en yüksek katkıyı sağlayan kilit alanlar olarak öne çıkmaktadır. Granül prosesinin %100'ü aşan katkısı, mutlak enerji talebinin yüksekliğini vurgularken, aynı zamanda geri kazanım faaliyetinin sağladığı genel çevresel faydaların sistemin dengelemesindeki rolüne işaret etmektedir. Bu yüksek etkilere rağmen, tesisin sürdürülebilirliğe yönelik proaktif yaklaşımları dikkat çekicidir. Özellikle yıkama hattından çıkan atıksuların arıtılarak kapalı döngüde tekrar kullanılması ve elektrik ihtiyacının bir kısmının güneş enerjisi panellerinden karşılanması, tesisin su ve enerji verimliliği konusundaki kararlılığını ve döngüsel ekonomi prensiplerini benimseme çabasını açıkça göstermektedir. Bu uygulamalar, proseslerden kaynaklanan çevresel yükleri önemli ölçüde hafifleterek, tesisin genel çevresel ayak izini düşürmektedir.

Elde edilen bulgular ışığında, tesisin çevresel performansını daha da geliştirmek adına stratejik iyileştirme alanları belirlenmiştir. Öncelikle, granül hattı ve yıkama hattı proseslerinde enerji verimliliğini artıracak yeni teknolojilerin araştırılması veya var olan güneş panellerinin kapasitesinin artırılması ve su geri kazanım sistemlerinin optimizasyonu hayati öneme sahiptir. Ayrıca, lojistik zincirinde daha düşük emisyonlu taşıma modlarına geçiş ve taşıma mesafelerini kısaltmaya yönelik rota optimizasyonları çevresel etkiyi önemli ölçüde azaltma potansiyeli taşımaktadır. Yenilenebilir enerji kullanım payının artırılması ve mümkün olduğunca yurt içi atık tedarik firmalarıyla iş birliği yaparak ithalat oranını düşürme ve buna bağlı taşıma etkilerini azaltma stratejilerinin geliştirilmesi, firmanın çevresel sürdürülebilirliğine değerli katkılar sağlayacaktır.

Bu önerilerin hayata geçirilmesiyle, “Şam Yapı A.Ş Sakarya Şubesi” unvanlı tesisin hem operasyonel verimliliğini artıracak hem de çevresel sorumluluklarını en üst düzeyde yerine getirerek sektöründe öncü bir konum sergilemeye devam edecektir. Bu LCA çalışması, çevresel iyileştirme çabaları için bilimsel bir temel sağlamakta ve gelecekteki stratejik kararlar için önemli bir referans noktası oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Kıralp, S., Özkoç, G., Erdoğan, S., Çamurlu, P., Baydemir, T., & Doğan, M. (2006). *Plastikler*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Toplum ve Bilim Merkezi.
- [2] Lintsen, H., Hollestelle, M., & Hölsgens, R. (2017). The plastics revolution: How the Netherlands became a global player in plastics. Stichting Historie der Techniek.
- [3] Plastik Kirliliğin Çevresel Zararları ve Çözüm Önerileri. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 22(2), 403-427.
- [4] Yakışık, H. (2023). *PLASTİK ATIKLAR VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK: TÜRKİYE'DE PLASTİK ATIK YÖNETİMİ*. Giresun Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi, 9(2), 36-55. <https://doi.org/10.46849/guiibd.1403473>
- [5] Andrady, A. L. (2003). *Plastics and the environment*. John Wiley & Sons.
- [6] Ray, S. (2024). Plastikler ve Sürdürülebilirlik Paradoksu. In: Goel, M., Tripathi, N. G. (editörler). *Plastik Kirliliği*. Springer, Singapur. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5528-8_12
- [7] PAGEV. (2023). *Türkiye plastik sektörü izleme raporu 2023*. Plastik Sanayicileri Derneği. <https://pagev.org/upload/files/Plastik%20%20Sekt%C3%B6r%20Raporu%202023.pdf>
- [8] Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24-58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- [9] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering* (11th ed.). Wiley.
- [10] Alhazmi, H., Almansour, F. H., & Aldhafeeri, Z. (2021). Plastik Atık Yönetimi: Mevcut Yaşam Döngüsü Değerlendirme Çalışmalarının İncelenmesi. *Sürdürülebilirlik*, 13(10), 5340. <https://doi.org/10.3390/su13105340>
- [11] Osswald, T. A., & Menges, G. (2012). *Materials science of polymers for engineers* (3rd ed.). Hanser Publishers.
- [12] Dodiuk, H., & Goodman, S. H. (2014). Introduction. In *Handbook of thermoset plastics* (3rd ed., pp. 1-12). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3107-7.00001-4>
- [13] Cantor, K. M., & Watts, P. (2011). Plastics materials. In M. Kutz (Ed.), *Applied plastics engineering handbook: Processing and materials* (pp. 3-5). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10001-7>

- [14] Evode, N., Qamar, S. A., Bilal, M., Barceló, D., & Iqbal, H. M. N. (2021). Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100142>
- [15] Alsabri, A., & Al-Ghamdi, S. G. (2020). Carbon footprint and embodied energy of PVC, PE, and PP piping: Perspective on environmental performance. *Energy Reports*, 6(Suppl. 8), 364-370. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.173>
- [16] Ciner, M. N., Elmaslar Özbaş, E., Özcan, H. K., Öngen, A. (2023). Plastik Atık ve Plastik Ayak İzi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 6(2), 86-92. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3226565>
- [17] Kayan, A., & Küçük, A. (2020). Plastik Kirliliğin Çevresel Zararları ve Çözüm Önerileri. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(2), 403-427. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ahbvuibfd/issue/56396/659700>
- [18] Çağlar, S. (2024). *Otomotiv yan sanayi plastik parça üretiminden ve plastik geri dönüşümünden kaynaklanan emisyonların belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi].
- [19] Yakışık, H. (2023). Plastik Atıklar Ve Sürdürülebilirlik: Türkiye'de Plastik Atık Yönetimi. *Giresun Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi*, 9(2), 36-55. <https://doi.org/10.46849/guiibd.1403473>
- [20] Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). *Global plastics outlook II: Policy action to curb plastic pollution*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/6e1e10c9-en>
- [21] Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). *Global plastics outlook: Economic drivers, environmental impacts and policy options*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>
- [22] Statista. (2023). *Global plastic market value by sector 2023*. <https://www.statista.com>
- [23] United Nations Environment Programme. (2022). *Plastics waste trade: A new colonialist form of pollution?*. UNEP. <https://www.unep.org/resources/report/plastics-waste-trade>
- [24] Vatan, C. (2002). *Plastik malzemenin geri dönüşümü: otomotiv endüstrisinden örnekler* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- [25] İskender, Ö., & Arslan, S. (2024). Plastik Atıkların Granül ve Elyaf Olarak Geri Dönüşümü. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 7(1), 31-35.
- [26] Pilapitiya, N. T., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, 11, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>
- [27] Avrupa Birliği Yayın Ofisi. (2024, Kasım 6). Atık hiyerarşisi [Mevzuat özeti]. EUR-Lex. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=LEGISSUM:waste_hierarchy
- [28] T.C. Resmî Gazete. (1983, 9 Ağustos). 2872 sayılı Çevre Kanunu. <https://www.resmigazete.gov.tr>

- [29] European Parliament. (2008). Directive 2008/98/EC on waste. *Official Journal of the European Union*, L 312, 3-30. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>
- [30] Hunt, R. G., & Franklin, W. E. (1996). LCA—How it came about: Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(1), 4-7. <https://doi.org/10.1007/BF02978624>
- [31] Guinée, J. B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., ... & van Duin, R. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers.
- [32] Curran, M. A. (Ed.). (2012). *Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products*. Wiley-Scrivener.
- [33] Klöpffer, W. (2006). The role of SETAC in the development of LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(S1), 116-122. <https://doi.org/10.1065/lca2006.04.016>
- [34] ISO. (2006). *ISO 14040:2006 Environmental management: Life cycle assessment, Principles and framework*. International Organization for Standardization.
- [35] Guinée, J. B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., ... & van Duin, R. (2002). *Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards*. Kluwer Academic Publishers.
- [36] Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J. B., Heijungs, R., Hellweg, S., ... & Suh, S. (2009). Yaşam döngüsü değerlendirmesindeki son gelişmeler. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- [37] Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., ... & Pennington, D. W. (2004). Yaşam döngüsü değerlendirmesi: Bölüm 1: Çerçeve, hedef ve kapsam tanımı, envanter analizi ve uygulamalar. *Environment International*, 30(5), 701-720. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>
- [38] Liu, M., Zhu, G., & Tian, Y. (2024). Yaşam döngüsü değerlendirmesinin tarihsel evrimi ve araştırma eğilimleri. *Green Carbon*, 2(4), 425-437. <https://doi.org/10.1016/j.greenca.2024.08.003>
- [39] Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., ... & Rydberg, T. (2011). Yaşam döngüsü değerlendirmesi: Geçmiş, bugün ve gelecek. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 90-96. <https://doi.org/10.1021/es101316v>
- [40] Türk Standardları Enstitüsü. (2007). *TS EN ISO 14040:2007 Çevre yöngüsü değerlendirmesi — İlkeler ve çerçeve (ISO 14040:2006)*.
- [41] Ciner, M. N., Elmaslar Özbaş, E., Özcan, H. K., & Öngen, A. (2023). Plastik atık ve plastik ayak izi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 6(2), 86-92.
- [42] Altın, S. (2025). Yaşam döngüsü analizi ve döngüsel ekonomi yaklaşımları ile sürdürülebilir biyoatık yönetimi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 7(2), 55-68.

- [43] Hu, A. H., Ting, C.-Y., Ouattara, A., Chen, W.-T., & Kuo, C.-H. (2025). Polyethylene terephthalate (PET) recycling life cycle assessment: A comparative case study in Taiwan. *Recycling*, 10(3), 98. <https://doi.org/10.3390/recycling10030098>
- [44] Istrate, I.-R., Juan, R., Martin-Gamboa, M., Domínguez, C., García-Muñoz, R. A., & Dufour, J. (2021). Environmental life cycle assessment of the incorporation of recycled high-density polyethylene to polyethylene pipe grade resins. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128580. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128580>
- [45] Jung, H., Shin, G., Kwak, H., Hao, L. T., Jegal, J., Kim, H. J., Jeon, H., Park, J., & Oh, D. X. (2023). Review of polymer technologies for improving the recycling and upcycling efficiency of plastic waste. *Chemosphere*, 320, 138089. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138089>
- [46] Ramesh, P., & Vinodh, S. (2020). State-of-the-art review on life cycle assessment of polymers. *International Journal of Sustainable Engineering*, *13*(6), 411–422. <https://doi.org/10.1080/19397038.2020.1802623>
- [47] Yadav, P., Silvenius, F., Katajajuuri, J.-M., & Leinonen, I. (2024). Life cycle assessment of reusable plastic food packaging. *Journal of Cleaner Production*, 448, 141529. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141529>

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Özlem BİLALOĞLU

ÖĞRENİM DURUMU:

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü/Çevre Mühendisliği	Devam Ediyor
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Sağlık Bilimleri Enstitüsü / İş Sağlığı ve Güvenliği (Tezsiz)	2021
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi/Çevre Mühendisliği	2019
Lise	Pamukova Anadolu Lisesi	2015

MESLEKİ DENEYİM:

Yıl	Yer	Görev
2021-2025	Mora Çevre ve Orman Mühendislik Ltd.Şti	Çevre Danışmanı
2020-2021	Temçev Osgb Müh.Dan.San ve Tic.Ltd.Şti	Çevre Danışmanı
2020-2021	TEMADR Tehlikeli Madde Güv.Dan.San.Tic.Ltd.Şti	Tehlikeli Madde Güvenlik Danışmanı

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Bilaloğlu, Ö. (2025, Nisan 24-25). “Evaluation of environmental impacts using life cycle assessment in a plastic recycling facility” (Sözlü sunum). 3rd International Thales Congress on Life, Engineering, Architecture, and Mathematics, Kahire, Mısır.

DİĞER ESERLER:

- Bilaloğlu, Ö., & Erses Yay, A. S. (2025). “Evaluation of environmental impacts using life cycle assessment in a plastic recycling facility”. In “Proceedings of the 3rd International Thales Congress on Life, Engineering, Architecture, and Mathematics” (pp. 54). ISBN: 978-9852-8558-7-6. <https://doi.org/10.306546/1B0231978-9952-8558-7-6.2025.10894>

