



**OTOMOTİV YAN SANAYİ PLASTİK PARÇA
ÜRETİMİNDEN VE PLASTİK GERİ DÖNÜŞÜMÜNDEN
KAYNAKLANAN EMİSYONLARIN BELİRLENMESİ**

Simge ÇAĞLAR



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV YAN SANAYİ PLASTİK PARÇA ÜRETİMİNDEN VE PLASTİK
GERİ DÖNÜŞÜMÜNDEN KAYNAKLANAN EMİSYONLARIN
BELİRLENMESİ**

Simge ÇAĞLAR
0009-0002-7912-5297

Prof. Dr. Güray SALİHOĞLU
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OTOMOTİV YAN SANAYİ PLASTİK PARÇA ÜRETİMİNDEN VE PLASTİK GERİ DÖNÜŞÜMÜNDEN KAYNAKLANAN EMİSYONLARIN BELİRLENMESİ

Simge ÇAĞLAR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Güray SALİHOĞLU

Plastik kullanımındaki artış, atık miktarının hızla yükselmesine ve çevre ile sağlık üzerinde ciddi olumsuz etkilere yol açmaktadır. Plastik atıklar genellikle depolama, yakma ve geri dönüşüm yöntemleriyle bertaraf edilmektedir. Mekanik geri dönüşüm, yaygın bir plastik atık bertaraf yöntemi olsa da çeşitli emisyonlara sebep olmaktadır. Otomotiv yan sanayi, plastiklerin yoğun olarak kullanıldığı ve uçucu organik bileşik (UOB) ile koku emisyonlarının önemli ölçüde olduğu bir sektördür. Bu çalışmada, Bursa'da bulunan dört otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisi ile dört plastik geri dönüşüm tesisinin UOB ve koku emisyonları incelenmiştir. Bu tesislerde kullanılan polimer türleri, proses akışları, ham madde ve üretim miktarları incelenmiş; toz, hız ve nem gibi parametrelerle ilişkisi değerlendirilmiştir. İncelenen otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesislerinde UOB emisyonlarının 9,24-1111,32 kg/yıl aralığında, plastik geri dönüşüm tesislerinde ise 57,12-1034,88 kg/yıl arasında değiştiği görülmüştür. Boyahane prosesi bulunan tesisin yıllık 1111,32 kg ile en yüksek UOB emisyonuna neden olduğu görülmüştür. Bu proseste kullanılan boya ve yardımcı malzemeler UOB emisyonu salımlarıyla ilişkilendirilmiştir. Plastik geri dönüşüm tesislerinde incelenen koku emisyonları arasında en yüksek değer 820,8 KB/m³ olarak belirlenmiştir. Baca gazı hızı ile koku emisyonları arasında ters bir ilişki olduğu görülmüştür. Akış diyagramları benzerlik gösteren plastik geri dönüşüm tesislerindeki UOB emisyon aralığındaki farklılığın işletme koşulları, giren ham madde kompozisyonu, bacada filtre bulunup bulunmaması gibi faktörlerin farklılığından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bu çalışma, plastik sektöründe emisyonların azaltılmasına yönelik sürdürülebilir yönetim stratejilerinin geliştirilmesi için yol gösterici olacaktır. Gelecekte, plastik teknolojilerinde yapılacak yenilikler ve çevre dostu malzeme kullanımıyla plastik sektörünün sürdürülebilirliğinin artırılabilmesi ve çevresel etkilerinin minimize edilebileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Plastik, otomotiv yan sanayi, plastik geri dönüşümü, uçucu organik bileşik, koku emisyonu
2024, vii + 78 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

DETERMINATION OF EMISSIONS FROM AUTOMOTIVE SUB-INDUSTRY PLASTIC PARTS PRODUCTION AND PLASTIC RECYCLING

Simge ÇAĞLAR

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Güray SALİHOĞLU

The increase in plastic use leads to a rapid increase in the amount of waste and serious negative effects on the environment and health. Plastic waste is generally disposed of by landfill, incineration and recycling methods. Although mechanical recycling is a common plastic waste disposal method, it causes various emissions. The automotive sub-industry is a sector where plastics are used extensively and volatile organic compound (VOC) and odor emissions occur significantly. In this study, VOC and odor emissions of four automotive sub-industry plastic parts production facilities and four plastic recycling facilities in Bursa were examined. The polymer types, process flows, raw materials and production quantities used in these facilities were examined; its relationship with parameters such as dust, speed and humidity was evaluated. It was observed that VOC emissions varied between 9.24-1111.32 kg/year in the examined automotive sub-industry plastic parts production facilities, and between 57.12-1034.88 kg/year in plastic recycling facilities. It was observed that the facility with the dyehouse process caused the highest VOC emission with 1111.32 kg annually. The dye and auxiliary materials used in this process have been associated with the release of VOC emissions. The highest value among the odor emissions examined in plastic recycling facilities was determined as 820.8 KB/m³. It has been observed that there is an inverse relationship between flue gas velocity and odor emissions. It is thought that the difference in the VOC emission range in plastic recycling facilities with similar flow diagrams may be due to differences in factors such as operating conditions, composition of the raw material entering, and whether there is a filter in the chimney or not. This study will provide guidance for the development of sustainable management strategies to reduce emissions in the plastics industry. It is thought that in the future, the sustainability of the plastic industry can be increased and its environmental impacts can be minimized through innovations in plastic technologies and the use of environmentally friendly materials.

Key Words: Plastic, automotive sub-industry, plastic recycling, volatile organic compound, odor emission

2024, vii + 78 pages.

TEŞEKKÜR

Tezimin her aşamasında bana sunduğu derin bilgi birikimi ve tecrübesi ile akademik gelişimimde önemli adımlar atmamı sağladığı, bilimsel ilgimin derinleşmesine öncülük ettiği, her an sağladığı desteği, rehberliği ve anlayışıyla motive edici yaklaşımı sayesinde her türlü zorluğun üstesinden gelmemi sağladığı, yönlendirici tavsiyeleriyle çalışmamın bu noktaya gelmesinde kilit rol oynadığı ve akademik alanda bana rol model olduğu için danışmanım Prof. Dr. Güray SALİHOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında sunduğu yol gösterici öneriler, değerli katkılar ve rehberliğiyle akademik gelişimime büyük katkıda bulunduğu ve araştırma yetkinliğimi geliştirmemi sağladığı için Prof. Dr. Nezih Kâmil SALİHOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreç boyunca bana gösterdiği sınırsız sevgi, anlayış ve destek için, akademik yolculuğumda her zaman yanımda olduğu ve bana güç verdiği için sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Simge ÇAĞLAR
27/06/2024

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1. Plastik Tanımı ve Tarihi	4
2.2. Plastik Türleri	4
2.3. Plastik Üretimi	7
2.3.1. Plastik üretim süreçleri	9
2.4. Hayatımızdaki Plastikler	11
2.5. Otomotiv Endüstrisinde Plastik Parça Üretimi.....	11
2.6. Plastik Atık Bertaraf Yöntemleri	19
2.7. Plastiklerin Geri Dönüşümü	25
2.7.1. Plastiklerin Mekanik Geri Dönüşümü	27
2.8. Plastiklerin Çevre ve Sağlık Üzerinde Etkileri	32
2.8.1. Karasal ve denizel ortamlarda plastikler	33
2.8.2. Atmosferdeki Plastikler	33
2.8.3. Plastik döküntülerinin biyoçeşitlilik üzerindeki etkileri	34
2.8.4. Plastik döküntülerin halk sağlığı üzerindeki etkisi	35
3. MATERYAL ve YÖNTEM	37
3.1. Örneklem Alanı.....	37
3.2. Yöntem	39
3.2.1 UOB ölçüm yöntemi	39
3.2.2 Koku ölçüm yöntemi	41
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	44
4.1. Otomotiv Yan Sanayi Plastik Üretim Tesisleri Emisyon Sonuçları	44
4.1.1. UOB sonuçlarının değerlendirilmesi.....	49
4.2. Plastik Geri Dönüşüm Tesisleri Emisyon Sonuçları.....	55
4.2.1. UOB sonuçlarının değerlendirilmesi.....	59
4.2.2. Koku sonuçlarının değerlendirilmesi	64
5. SONUÇ.....	68
KAYNAKLAR.....	72
ÖZGEÇMİŞ.....	78

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
%	Yüzde
<	Küçüktür
°C	Santigrat Derece
CO ₂	Karbondioksit
g/km	Gram Bölü Kilometre
kg	Kilogram
kg/yıl	Kilogram Bölü Yıl
MPa	Megapaskal
Mt	Megaton
lt/dk	Litre Bölü Dakika
µm	Mikrometre

Kısaltmalar	Açıklama
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
BFR	Bromlu Alev Geciktiriciler
BPA	Bisphenol A
CEN	Avrupa Standartlar Komitesi
CFRP	Karbon Elyaf Takviyeli Plastik
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
EPA	Çevre Koruma Ajansı
UOB	Uçucu Organik Bileşik
KB	Koku Birimi
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü
GC-MS	Gaz Kromatografisi Küte Spektrometresi
GFRP	Cam Elyaf Takviyeli Plastik
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
LDPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İş Birliği Örgütü
PA	Poliamid
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen
PEMRG	Plastik Avrupa Pazar Araştırma Grubu
PET	Polietilen Tereftalat
POM	Polioksimetilen
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
PUR	Poliüretan
PVC	Polivinilklorür
TPE	Termoplastik Elastomer
UV	Ultraviyole

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	1950-2022 yılları arası dünya çapında yıllık plastik üretimi.... 7
Şekil 2.2.	Avrupa plastik üretiminin kütleli olarak yüzde dağılımı..... 8
Şekil 2.3.	Etilenin polimerizasyonu..... 10
Şekil 2.4.	Türkiye plastik kullanımı sektör bazında yüzdesel dağılımı... 12
Şekil 2.5.	Bir otomobilin sahip olduğu plastik parçalar..... 13
Şekil 2.6.	Bir otomobilin parçalarının ağırlıkça yüzdesel dağılımı..... 14
Şekil 2.7.	Ekstrüder makinesi..... 17
Şekil 2.8.	Basınç altındaki enjeksiyon odası..... 18
Şekil 2.9.	Sanayi sonrası ve tüketici sonrası plastik atıkların şematik gösterimi..... 20
Şekil 2.10.	Plastiklerin bertaraf yöntemleri..... 21
Şekil 2.11.	1950'den 2017'ye kadar tüm plastiklerin kümülatif üretimi, kullanımı ve kaderi..... 23
Şekil 2.12.	Plastiklerin üretimi, kullanımı ve bertarafı..... 24
Şekil 2.13.	Atık plastiğin mekanik bir yöntemle geri dönüştürülmesi teknolojisi: ayırma işlemi, boyut küçültme, kurutma işlemi ve erimiş plastik..... 28
Şekil 2.14.	Plastik eritme işleminde kullanılan ekstrüder makinesi..... 31
Şekil 2.15.	Tipik bir plastik geri dönüşüm tesisinin akış diyagramı..... 32
Şekil 2.16.	Atmosferdeki plastikler ve halk sağlığına etkileri..... 34
Şekil 2.17.	Plastiklerin insan vücuduna giriş yöntemleri ve insan sağlığına etkileri..... 36
Şekil 3.1.	Koku analizi TO8 olfaktometre cihazı..... 42
Şekil 4.1.	O1 otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisi akış diyagramı..... 45
Şekil 4.2.	O2 otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisi akış diyagramı..... 46
Şekil 4.3.	O3 otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisi akış diyagramı..... 47
Şekil 4.4.	O4 otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisi akış diyagramı..... 49
Şekil 4.5.	Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri UOB analiz sonuçları..... 50
Şekil 4.6.	Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri toz emisyon analiz sonuçları..... 53
Şekil 4.7.	Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri nem analiz sonuçları..... 54
Şekil 4.8.	G1 plastik geri dönüşüm tesisi akış diyagramı..... 56
Şekil 4.9.	G2 plastik geri dönüşüm tesisi akış diyagramı..... 57
Şekil 4.10.	G3 plastik geri dönüşüm tesisi akış diyagramı..... 58

Şekil 4.11.	G4 plastik geri dönüşüm tesisi akış diyagramı.....	59
Şekil 4.12.	Plastik geri dönüşüm tesisleri UOB analiz sonuçları.....	60
Şekil 4.13.	Plastik geri dönüşüm tesisleri toz emisyon analiz sonuçları...	62
Şekil 4.14.	Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim ve plastik geri dönüşüm tesisleri UOB analiz sonuçları.....	63
Şekil 4.15.	Plastik geri dönüşüm tesisleri koku emisyonu sonuçları.....	64
Şekil 4.16.	Plastik geri dönüşüm tesisleri nem analiz sonuçları	65
Şekil 4.17.	Plastik geri dönüşüm tesisleri hız analiz sonuçları.....	66



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Plastik türleri, açıklamaları ve örnek kullanımları.....	6
Çizelge 2.2. Plastik atıkların geri dönüştürülmesi ile ilgili yöntemlerin sınıflandırılması.....	25
Çizelge 3.1. Otomotiv yan sanayi parça üretim tesisleri ve plastik geri dönüşüm tesisleri ham madde ve üretim bilgileri.....	37
Çizelge 3.2. Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri ve plastik geri dönüşüm tesisleri analiz edilen parametreler ve örnek alma noktaları.....	38
Çizelge 3.3. Otomotiv yan sanayi plastik parça üreten ve plastik geri dönüşüm tesisleri emisyon analizlerinde kullanılan metotlar ve cihazlar	40
Çizelge 3.4. Plastik geri dönüşüm tesisleri koku analizlerinde kullanılan metotlar ve cihazlar.....	42
Çizelge 4.1. O2 otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisi UOB emisyonu türleri.....	51
Çizelge 4.2. G4 plastik geri dönüşüm tesisi UOB emisyonu türleri.....	62

1. GİRİŞ

Plastikler, modern endüstrinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir ve birçok farklı sektörde geniş kullanımı mevcuttur. Çok yönlülükleri, hafiflikleri, sızdırmazlıkları ve üretim kolaylıkları sayesinde polimerler metal, cam, ahşap ve kâğıt gibi geleneksel malzemelerin yerini almıştır (Cabanes vd., 2020). Son yıllarda plastiklerin kullanımı önemli ölçüde artmıştır, çünkü dayanıklılıkları, esneklikleri ve düşük maliyetleri üreticilere ve tüketicilere avantaj sağlamaktadır. Ancak, bu artış çevre ve sağlık risklerini de beraberinde getirmektedir (Paterson, 2019).

Plastiklerin üretimi, genellikle ham petrolün işlenmesiyle gerçekleştirilir. Monomerlerin hazırlanması ve bunların birleştirilmesi süreçlerinden oluşmaktadır. Plastiklerin ham maddeleri arasında polimerler, parlaticılar veya UV stabilizatörleri, plastikleştiriciler, yağlar, yangın geciktiriciler, pigmentler (renklendirici maddeler), antistatik ajanlar, selüloz, furfural ve çeşitli petrokimyasallar bulunur. Bu bileşenler, plastiklerin dayanıklılığını arttırmak, çeşitli kimyasal ve fiziksel bozulmalara karşı koruma sağlamak amacıyla kullanılır (Alhazmi vd., 2021).

Hayatımızdaki plastikler, günlük yaşamın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Gıda ambalajlarından tıbbi cihazlara, elektronik eşyalardan otomotiv parçalarına kadar pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Ugoeze vd., 2021). Bu çeşitlilik, PE (polietilen), PET (polietilentereftalat), PP (polipropilen), PS (polistiren), PVC (polivinil klorür), gibi farklı plastik türlerinin geniş bir yelpazede kullanılmasına olanak tanımaktadır (Ghaffar vd., 2022).

Otomotiv endüstrisi, plastik malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı bir sektördür. Özellikle otomotiv yan sanayi, plastik parça üretiminde büyük bir rol oynamaktadır. Plastik parçaların hafifliği, karmaşık tasarımların kolayca üretilebilmesi ve maliyet etkinliği, bu parçaların endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesini sağlamaktadır. İç mekân trimleri, dış kaplamalar, teknik parçalar ve gövde bileşenleri gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadırlar (Behera, 2019).

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 (Ghaffar vd., 2022). Plastik atıkların, atıldıklarında çöp sahalarında birikecekleri için, döngüsel olarak ham maddelerin geri kazanılması ve farklı formlarda ham plastik malzemelerin üretime tekrar girmesi oldukça önemlidir (Pilapitiya & Ratnayake, 2024). Plastikler biyolojik olarak parçalanamadıkları için, atık olarak bırakıldıklarında topraklarda ve okyanuslarda birikirler, canlılar tarafından tüketilirler ve doğal yaşamımızı tehdit eden zararlı etkiler yaratırlar (Alhazmi vd., 2021).

Plastikler yavaş bozunur ve yakma işlemi toksik emisyonlar ve dip külü üretebilmektedir (Raghav & Kumar, 2020). Geri dönüşüm, birçok ülkede plastik atıkların işlenmesi için birincil politika haline gelmiştir. Plastik atıkların geri dönüşümü genellikle dört işlem yöntemini içerir: malzeme geri dönüşümü, ham madde geri dönüşümü (piroliz, hidrojenasyon), kimyasal geri dönüşüm (de-polimerizasyon) ve enerji geri kazanımı (yakma) (Chonga vd., 2015).

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 (Shen vd., 2020). Ayrıca, plastiklerin geri dönüşümü sırasında ortaya çıkan emisyonlar da dikkate alınmalıdır. Geri dönüşüm tesislerindeki işlemler, özellikle uzun süreli termal maruziyet ve polimerlerin zamanla bozunması gibi faktörler nedeniyle uçucu organik bileşikler ve koku emisyonlarına yol açabilmektedir (Tsai vd., 2009). Bu emisyonlar, çevresel yönetim stratejileri açısından önemli bir sorun teşkil eder ve plastik geri dönüşüm tesislerindeki teknolojik yeniliklerin ve yöntemlerin sürekli olarak iyileştirilmesini gerektirmektedir (Li vd., 2022).

Bu çalışmada, otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri ve plastik geri dönüşüm tesislerinin bacalarından çıkan UOB ve koku emisyonlarının sonuçları kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Analiz kapsamında, bu tesislerdeki toz emisyon miktarı, nem

oranı ve gaz akış hızı gibi ek parametreler de dikkate alınmıştır. Çalışmanın temel amacı, otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri ve plastik geri dönüşüm tesislerinden kaynaklanan UOB ve koku emisyonlarının seviyelerini belirlemek; bu emisyonların kaynaklarını, oluşum nedenlerini tespit etmek ve emisyonları etkileyen parametrelerin analizini yapmaktır. Elde edilen sonuçların, bu tesislerin çevresel performanslarını iyileştirme yolunda etkin bir rehberlik sağlaması ve sürdürülebilir yönetim stratejilerinin geliştirilmesine katkıda bulunması hedeflenmektedir. Ayrıca, çalışma sonuçları, plastik üretim ve geri dönüşüm süreçlerinde emisyon kontrolüne yönelik iyileştirme potansiyelini ortaya koyarak, sanayi uygulamalarında çevreye duyarlı yaklaşımların benimsenmesine olanak tanıyacaktır. Bu sayede, plastik sektörünün çevresel etkilerinin minimize edilmesi ve sektördeki sürdürülebilirlik standartlarının yükseltilmesi öngörülmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Plastik Tanımı ve Tarihi

Plastiklerin icadı, insanın yaşam kalitesini iyileştiren önemli bir dönüm noktası olmuştur ve 1900'lerin başında ilk sentezlendiklerinden bu yana tüketici ürünlerinin üretiminde ahşap, metaller ve seramikler gibi birçok malzemenin yerini almıştır. Plastiklerin hafiflikleri, dayanıklılıkları, kimyasal korozyona karşı dirençleri, geniş uygulama çeşitliliği, işleme kolaylığı ve düşük maliyetleri, bu tercih edilme sebebini oluşturmaktadır (Pilapitiya & Ratnayake, 2024).

Plastik, polimer adı verilen uzun molekül zincirlerinden oluşan sentetik bir malzemedir. Genellikle petrokimyasal kökenli olan plastikler, ısı ve basınç altında şekillendirilebilen esnek ve dayanıklı yapılarıyla tanınırlar (Young & Lovell, 2011). İlk sentetik plastik olan bakalit, 1907 yılında Leo Baekeland tarafından icat edilmiştir (Lintsen vd., 2017). İlk modern plastik, 1920'lerde plastikliğini artırmak için katkı maddeleriyle karıştırılarak kullanılabilir hale getirilen polivinil klorürdür (Geyer, 2020). Plastiklerin veya sentetik organik polimerlerin büyük ölçekli üretimleri ve kullanımları sadece 1950'lere dayanmaktadır (Geyer vd., 2017).

2.2. Plastik Türleri

Plastiklerin çeşitliliği oldukça geniştir ve kullanım alanlarına göre farklı türleri bulunmaktadır (Andrady, 2003). Plastikler genellikle iki ana polimer ailesi altında sınıflandırılır: Termoplastikler ve termosetler. Termoplastikler, ısıtıldıklarında erir ve soğutulduklarında yeniden sertleşirler (Ragaert vd., 2017). Bu plastik türleri, ısı uygulanarak katılığın değiştirilebilmesi özelliklerine sahiptir ve bu da potansiyel olarak geri dönüştürülebilir olmalarını sağlamaktadır. Termoplastiklere örnek olarak PA, PE, PET, PP, PS ve PVC verilebilmektedir. Termosetler ise, ısıtıldıklarında geri dönüşü olmayan üç boyutlu bir ağ oluşturarak kimyasal bir değişime uğrarlar. Bu nedenle, yeniden eritilemez ve yeniden biçimlendirilemezler, bu durum geri dönüştürülebilirlik

açısından önemli bir engel olmaktadır. Poliüretanlar (PUR), doymamış polyester, silikon, epoksi, melamin, fenolik ve akrilik reçineler gibi termosetlere örnekler verilebilir. Termosetler ve termoplastikler, cam veya karbon elyaf takviyeli polimerler (GFRP veya CFRP) gibi elyaflarla birleştirilerek kompozit malzemeler oluşturulabilmektedir. (PlasticsEurope, 2018).

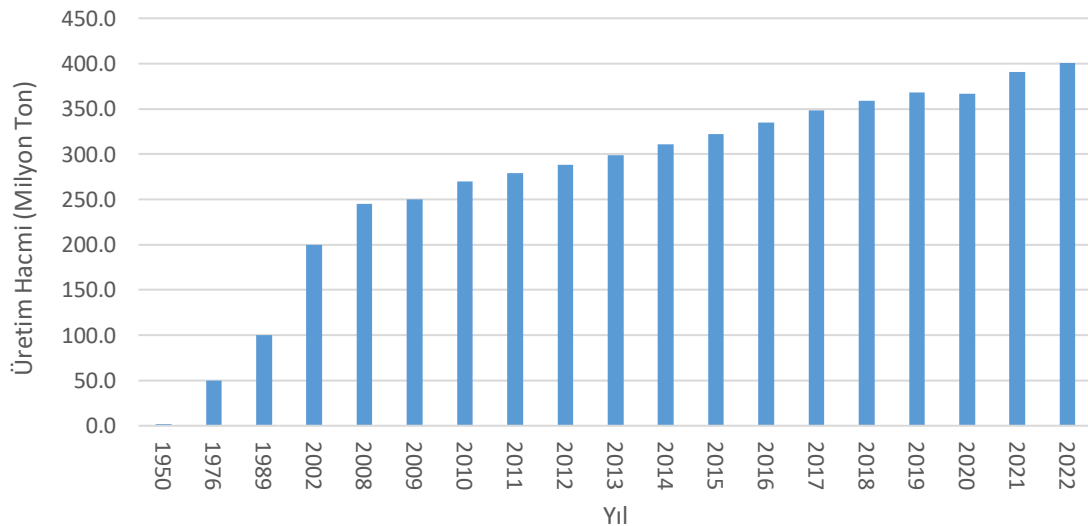


Çizelge 2.1. Plastik türleri, açıklamaları ve örnek kullanımları (Alhazmi vd., 2021)

Plastik Türleri	Kısaltma	Açıklama	Örnek Kullanım	Geri Dönüştürülebilirlik Potansiyeli
Polietilen Tereftalat	PET	Ekstrüde ve kalıplanmış polyester. Şeffaf, dayanıklı, sert ve hafif	Plastik şişeler (su, alkolsüz içecekler) ve diğer birçok tüketici ürünü için ambalaj olarak	Yüksek oranda geri dönüştürülebilir.
Yüksek Yoğunluklu Polietilen	HDPE	Yüksek sertlik, mukavemet, tokluk, kimyasallara ve neme karşı direnç, işleme kolaylığı	Süt sürahileri, su şişeleri, şampuan şişeleri, motor yağı kapları, bitki saksıları, kovalar, oyuncaklar	Yüksek oranda geri dönüştürülebilir.
Polivinil klorür	PVC	Güçlü, hafif. Plastikleştiriciler eklenerek daha esnek hale getirilebilir.	Tesisat boruları, kapılar, pencereler, kredi kartları, kablo kılıfları, bahçe hortumları, oyuncaklar	Geleneksel işlemlerle ayrılması kolaydır, ancak bazı katkı maddelerinin (örneğin klor, kadmiyum, kurşun) varlığı nedeniyle geri dönüşümü sınırlıdır
Düşük Yoğunluklu Polietilen	LDPE	Yüksek netlik ve orta derecede esneme. Mükemmel aşınma, kimyasal ve darbe direncine sahip	Plastik torbalar, sıkılabilir şişeler, gıda kapları, balonlu naylon, tek kullanımlık bardaklar, kâğıt kartonlar için kaplamalar	Hayır; Stres altında başarısız olması geri dönüştürülmesini zorlaştırır
Polipropilen	PP	Pürüzsüz yüzey ile dayanıklı, esnek, yumuşak, suya karşı geçirimsiz	Şişe kapakları, yoğurt ve margarin kapları, pipetler, sıcak yemek kapları, araba parçaları, tek kullanımlık çocuk bezleri	Yüksek oranda geri dönüştürülebilir, ancak toplama, kirlenme ve diğer maddelerle (örn. Renklendiriciler) karışımındaki zorlukları vardır.
Polistiren	PS	Belirli bir sertliğe sahip, ekonomik, berrak	Tek kullanımlık köpük bardaklar, paket yemek kapları, plastik çatal bıçak takımı, elbise askıları, köpük ambalajlar	Düşük yoğunluğu geleneksel geri dönüşüm süreçleriyle işlenmesini zorlaştırır.
Polikarbonat	PC	Şeffaf, yüksek darbe dayanımı	UV ışınlarına dayanıklı lensler, bariyerler, çitler	Hayır; malzeme çeşitliliği geri dönüşümün kirlenmesi riskini taşır.

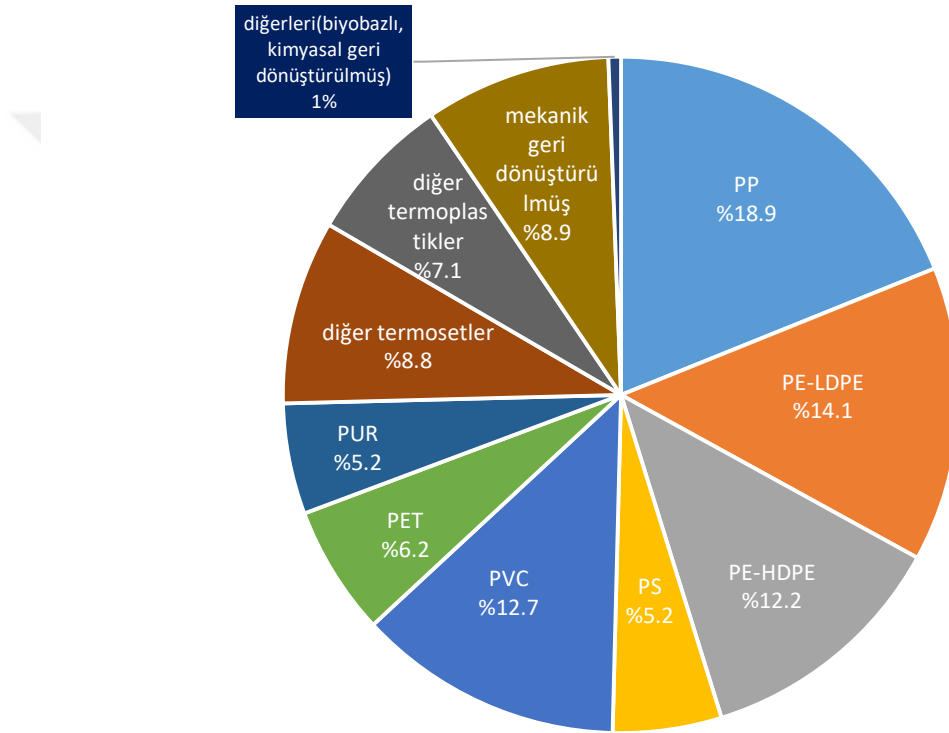
2.3. Plastik Üretimi

Dünya genelinde plastik üretimi ve tüketimi son yıllarda hızla artmıştır. 1950'lerden bu yana üretilen plastik miktarı, 8.3 milyar metrik tonu aşmıştır (Geyer vd., 2017). Bu artış, plastik atıkların yönetilmesinde ve geri dönüştürülmesinde önemli zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Geri dönüşüm süreçleri yetersiz kalmakta ve çoğu plastik atık ya depolama alanlarına ya da yakma tesislerine yönlendirilmekte, bu da ciddi sera gazı emisyonlarına ve toksik kimyasalların yayılmasına neden olmaktadır (Evode vd., 2021). Plastik Avrupa Pazar Araştırma Grubu (PEMRG) verilerine göre, küresel yıllık plastik üretimi, iki küresel petrol kriziyle aynı zamana denk gelen 1975, 1980 ve 2008 yılları istisnası dışında yıldan yıla artış göstermiştir (Agenda, 2016) (Şekil 2.1). Yıllık plastik üretimi 1950'lerde 1.7 milyon ton iken Dünya çapındaki plastik üretimi 2022 yılında 400,3 milyon tona ulaşmıştır (PlasticsEurope, 2023). Küresel plastik üretimindeki gelecek eğilimler önümüzdeki yıllarda üstel bir büyüme göstermekte ve 2050 yılına kadar 1,5 milyar tondan fazla küresel talep öngörülmektedir (Cabanes vd., 2020). Plastik üretiminin katlanarak büyümesi, plastik ürünlerin kullanımından sonra yönetilmesi konusunda endişelere yol açmaktadır. OECD'ye göre, dünya çapında plastik atıkların yalnızca %9'u başarıyla geri dönüştürülmektedir (Geyer vd., 2017).



Şekil 2.1. 1950-2022 yılları arası dünya çapında yıllık plastik üretimi

Şekil 2.2 1950'den 2022'ye kadar malzeme türüne göre küresel yıllık birincil plastik üretimini göstermektedir. Plastics Europe (2023) verilerine göre, 2022'de Dünya'da plastik üretiminin küresel olarak yüzde dağılımı aşağıdaki gibidir: PP %18.9, PE-LDPE %14.1, PE-HDPE %12.2, PS %5.2, PVC %12.7, PET %6.2, PUR %5.2, diğer termosetler %8.8, diğer termoplastikler %7.1, mekanik geri dönüştürülmüş plastikler %8.9 ve diğerleri %1. Plastik üretiminde, polietilen ve polipropilen reçineler toplam üretimin neredeyse yarısını oluşturmaktadır (PlasticsEurope, 2023).



Şekil 2.2. Avrupa plastik üretiminin küresel olarak yüzde dağılımı

Türkiye plastik sektöründe 2019 yılında 9,46 milyon tonluk üretim gerçekleşirken, 2021'de bu rakam 10,3 milyon tona yükselmiştir. Alt sektörlere bakıldığında, 2021'de toplam plastik mamul üretiminin 10,3 milyon tonunun yaklaşık 4,33 milyon tonu plastik ambalaj malzemelerinden oluşmaktadır ve bunu 2,06 milyon ton ile plastik inşaat malzemelerinin takip ettiği görülmektedir. Elektrik elektronik alanında ise yaklaşık 1 milyon tonluk üretim gerçekleşirken, otomotiv ve tekstilde sırasıyla 0,62 ve 0,72 milyon tonluk plastik mamul üretimi olduğu belirtilmektedir (Demirci, 2022).

2.3.1. Plastik üretim süreçleri

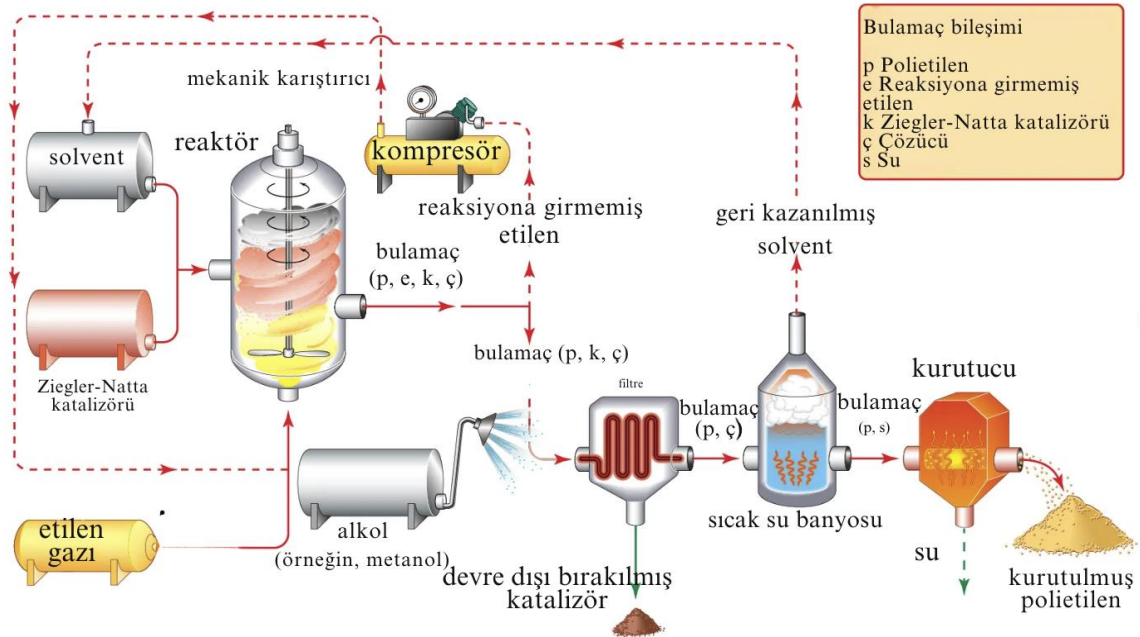
Polimer üretimi, monomer adı verilen küçük moleküllerin kimyasal olarak birleşerek çok büyük zincir veya ağ molekülleri oluşturmasıyla gerçekleşmektedir (Causin, 2015). Bu monomerler genellikle ham petrolden elde edilmektedir. Ham petrol, yer altı rezervlerinden sondaj yoluyla çıkarıldıktan sonra rafine edilmektedir. Rafine sürecinde, petrol bileşenleri farklı kaynama noktalarına göre ayrıştırılmakta ve bu aşamada etan ve propan gibi monomerler elde edilmektedir. Çatlama denilen bir işlemle bu monomerler etilen ve propilen gibi daha küçük ve değerli moleküllere dönüştürülmektedir (Zhu vd., 2017).

İlave polimerizasyon ve yoğunlaşma polimerizasyonu olarak iki ana polimerizasyon türü bulunmaktadır. İlave polimerizasyonda, monomerler katalizörler yardımıyla birleşerek polimer oluşturmakta ve yan ürün oluşmamaktadır. Etilen ve propilen gibi monomerler, bu yöntemle polietilen, polipropilen ve PVC gibi plastiklere dönüştürülmektedir (Ouellette & Rawn 2014). Yoğunlaşma polimerizasyonunda ise, her adımda bir yan ürün (genellikle su) oluşmakta ve iki farklı monomer birleşerek polimer oluşturmaktadır. Naylon ve polyester gibi plastikler bu yöntemle üretilmektedir (Stouten & Bernaerts 2022).

Polimer üretiminde kullanılan katalizörler, özellikle Ziegler-Natta katalizörleri, etilen ve propilen gibi olefinlerin polimerizasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Bu katalizörler, polimerin moleküler yapısını kontrol ederek yüksek performanslı plastiklerin üretilmesini sağlamaktadır. Örneğin, etilen gazı Ziegler-Natta katalizörü ile polimerize edilmekte ve polietilen elde edilmektedir (Şekil 2.3). Reaksiyon sonucunda, polimer, reaksiyona girmemiş etilen monomeri, katalizör ve çözücü içeren bir bulamaç oluşturmakta ve bu süreçte, reaksiyona girmemiş etilen geri kazanılmakta, katalizör alkol ile yıkanmakta, nötralize edilmekte ve filtrelenmektedir. Ayrıca, fazla çözücü geri kazanılmakta ve polietilen nihai toz formuna kadar kurutulmaktadır (Saleh & Gupta, 2016; Britannica, 2020).

Zincir benzeri moleküllerden oluşan lineer polimerler, viskoz sıvılar veya farklı derecelerde kristalliğe sahip katı maddeler olabilmekte; bazıları belirli sıvılarda çözünmekte ve ısıtıldığında yumuşamaktadır veya erimektedir. Moleküler yapısı bir ağ olan çapraz bağlı polimerler ise termoset reçineler olup, oluştuktan sonra yeniden ısıtıldığında erimez veya yumuşamazlar. Hem lineer hem de çapraz bağlı polimerler, ilave veya yoğunlaşma polimerizasyonu ile üretilebilmektedir (Britannica, 2020).

Polimerizasyon işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen plastik, plastik granüllere dönüştürülmektedir. Bu işlem, plastiğin şeritler halinde ekstrüde edilmesini, bu şeritlerin granüler halinde kesilmesini ve soğutulup kurutulmasını içermektedir. Plastik granülleri, üreticilere nakledilmekte ve çeşitli tekniklerle (enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, şişirme) nihai ürünlere dönüştürülmektedir. Şekillendirilen plastik ürünler soğutulmakta ve katılaştırılarak istenen özellikler kazandırılmaktadır (Britannica, 2020). Plastiklerin özelliklerini geliştirmek için polimerizasyon sırasında veya sonrasında çeşitli katkı maddeleri eklenmektedir. Bu katkı maddeleri, plastıklara renk, UV direnci, alev geciktirici özellikler, esneklik gibi istenen özellikler kazandırmaktadır (Wilkie & Morgan, 2009).



Şekil 2.3. Etilenin polimerizasyonu (Britannica 2020'den değiştirerek alınmıştır)

2.4. Hayatımızdaki Plastikler

Plastikler, modern yaşamın her alanında geniş kullanım alanına sahiptir. Ambalaj malzemeleri, gıda kapları, içecek şişeleri, oyuncaklar, elektronik cihazlar, otomotiv parçaları, tıbbi malzemeler, tekstil ürünleri ve yapı malzemeleri gibi birçok alanda plastikler yaygın olarak kullanılmaktadır (Harper, 2000). Bu malzemeler, ürünlerin hafifliğini, dayanıklılığını ve maliyet etkinliğini artırarak modern yaşamın birçok alanında önemli rol oynamaktadır. Tarımda seralar ve sulama sistemlerinde, sağlıkta tıbbi cihazlar ve ambalajlarda, inşaatta izolasyon ve boru sistemlerinde, tekstilde ise giysi ve aksesuar üretiminde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Kumar & Singh, 2011).

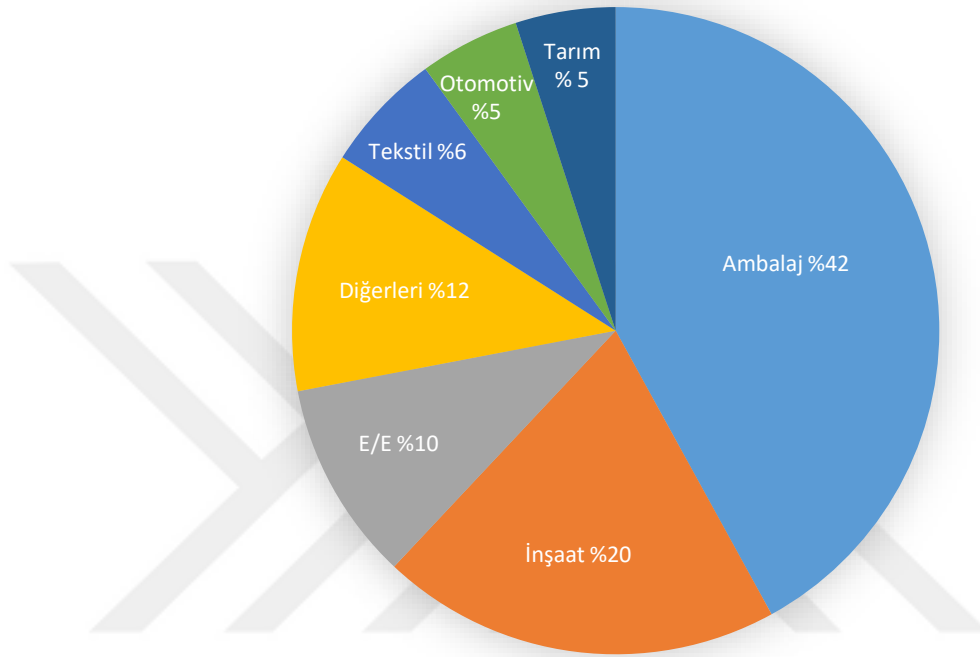
Plastikler, malların güvenliği, taşınması ve nakliyesi için kullanılan torba ve ambalaj yapımında kullanılmaktadır. Gıda endüstrisinde, şişe, kap, çatal bıçak, aksesuar ve tek kullanımlık tabaklar gibi ürünler de önemli bir rol oynamaktadır; örneğin, PET şişeler ve polistiren kaplar. Moda endüstrisi de polyester ve poliamid gibi sentetik elyaflar kullanılmaktadır. Yapı sektöründe ise izolasyon ve koruma malzemeleri, montaj ve kaplama malzemeleri, su temini ve kanalizasyon boruları, koruyucu borular ve yerden ısıtma borularında plastikler yaygın olarak kullanılmaktadır (PCC Group, 2023).

Bazı plastik ürünler, PET içecek şişeleri ve HDPE süt şişeleri gibi büyük ölçüde tek bir plastik türünden yapılmaktadır. Ancak, birçok uygulamada karışımlar, kompozitler veya çok katmanlı laminatlar halinde birden fazla plastik türü bir arada kullanılmaktadır (Moad & Solomon, 2021).

2.5. Otomotiv Endüstrisinde Plastik Parça Üretimi

Son yıllarda, otomotiv ve elektrik-elektronik ekipman sektörlerinde plastik kullanımı önemli ölçüde artmaktadır ve bu plastikler genellikle "mühendislik plastikleri" olarak adlandırılmaktadır. Bu sektörler, ambalaj ve inşaat uygulamalarının ardından en yaygın üçüncü kullanım alanına sahiptir (Şekil 2.4). Mühendislik plastikleri, aşınma direnci, kimyasal dayanıklılık, darbe direnci, elektriksel özellikler ve geniş çalışma sıcaklığı

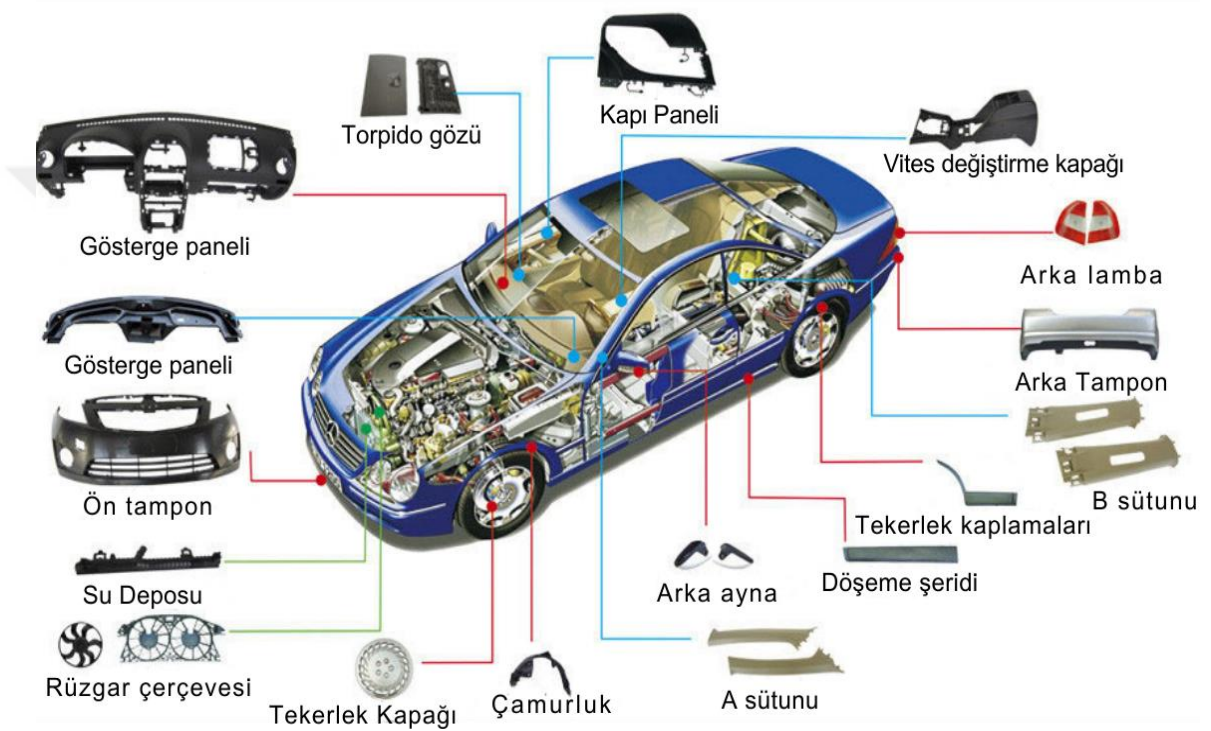
aralığı gibi gelişmiş özelliklere sahiptir. Bu özellikler, otomotiv ve elektronik endüstrilerinde yenilikçi çözümler geliştirilmesine önemli katkı sağlamaktadır (EuRIC AISBL, 2020). Şekil 2.4'te Türkiye'de plastik kullanımının sektör bazında yüzdesel dağılımı verilmektedir.



Şekil 2.4. Türkiye plastik kullanımı sektör bazında yüzdesel dağılımı

Modern otomobiller birçok plastik parça ve bileşen içermektedir. Plastik bileşenler, araçlarda hem iç hem de dış parçalarda kullanılmaktadır. Gövde panelleri gibi plastik dış parçalar, aracın yapısal bütünlüğünü sağlamaktadır. Contalar, jant kapakları ve hava izolasyonu gibi bileşenlerde kullanılan plastik, bu parçaların dayanıklılığını ve hava koşullarına dirençliliğini arttırmaktadır. Tamponlar ve çamurluklar, aracın dış darbelerden korunmasında kritik rol oynar ve genellikle plastikten üretilmektedirler. Hava barajları ve kaplamalar, plastik malzemenin esnekliği sayesinde aerodinamik özellikleri iyileştirir, böylece yakıt verimliliğine olumlu katkıda bulunmaktadır (E Avrupa Geri Dönüşüm Endüstrileri Konfederasyonu [EuRIC], 2020).

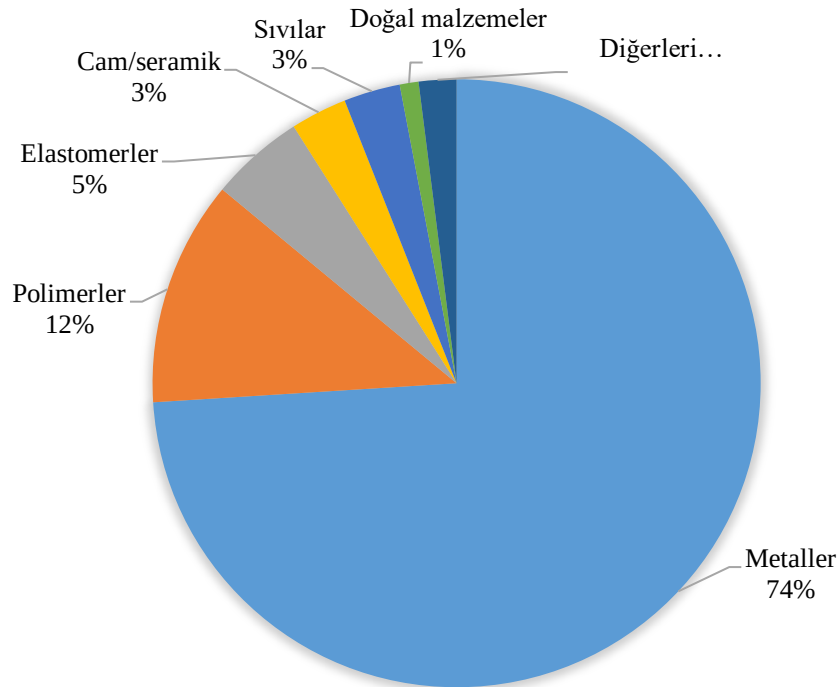
Aracın iç kısımlarında gösterge paneli ve ön panel, plastik malzemelerle üretilerek hem hafiflik hem de estetik görüntü sağlanmaktadır. Kapı panelleri, direksiyon simidi, genellikle plastik bileşenlerden oluşarak hem hafif hem de dayanıklı bir yapı sunar. Koltuk ve diğer oturma alanlarında kullanılan plastik, araç içi konforu optimize ederken tasarım esnekliği de sağlamaktadır (Adeniyi vd., 2016). Şekil 2.5'te, plastik parçaların bir otomobilin hangi kısımlarında bulunduğu gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Bir otomobilin sahip olduğu plastik parçalar (SensXpert 2022'den değiştirilerek alınmıştır)

Plastik, metallerden sonra otomobillerde en çok kullanılan ikinci malzemedir (EuRIC, 2020). Modern otomobillerin hacminin yaklaşık %50'si araç ağırlığının ise %12-17'si plastikten oluşmaktadır (Di Lorenzo vd., 2018). Şekil 2.6'da bir otomobilin ağırlıkça bileşenlerinin yüzdesel dağılımı gösterilmektedir. Araçlarda plastik malzemelerin kullanılması araçların hafifletilmesi ve yakıt verimliliğinin artırılması amacıyla tercih edilmektedir. Üçüncü sırada %5'lik bir oranla elastomerler bulunmaktadır ve bu malzemeler esneklik ile sızdırmazlık sağlamaktadır.

Cam ve seramik malzemeler, %3'lük bir oranla araçlarda kullanılırken, aynı oranda (%3) sıvılar da motor yağı, soğutucu ve diğer fonksiyonel sıvılar olarak bulunmaktadır. Doğal malzemeler %1 ve diğer malzemeler %2 oranında olup, genellikle iç döşeme, dekoratif amaçlar ve diğer bileşenler için kullanılmaktadır (Gallone & Zeni-Guido, 2019).



Şekil 2.6. Bir otomobilin parçalarının ağırlıkça yüzdesel dağılımı

Bir otomobilin yapımında kullanılan yaklaşık 39 farklı temel plastik ve polimer türü bulunmaktadır. En yaygın olanları (otomobillerde kullanılan plastiğin yaklaşık %74'ü) polipropilen (%35) (örn. tamponlar, kablo yalıtımı halı lifleri, vb.), poliüretan (%19) (örn. köpük koltuklar, yalıtım panelleri, süspansiyon burçları, yastıklar, elektrik bileşikleri, vb.), poliamidler (%11) (örn. akü muhafazaları, fren hortumları, yağ hazneleri, vb.) ve polivinil klorürdür (%9) (örn. gösterge panelleri, elektrik kabloları, borular, kapılar, vb.). Akrilonitril bütadien stiren, polistiren, polietilen, polioksimetilen, polikarbonat ve akrilik (PMMA) gibi plastikler de otomotiv parçalarında kullanılmaktadır (EuroRIC, 2020).

Poliüretan (PUR/PU) araç ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırırken, ses emici ve titreşim sönümleyici özellikleri ile sürüş konforunu artırmaktadır. ABS, kulp elemanları

gibi parçalarda kullanılan termoplastik bir malzemedir. Polikarbonatlar yüksek mukavemetleri ile optik bileşenlerde ve güvenlik ekranlarında tercih edilirken, poliamidler yüksek toklukları ve aşınma dirençleri ile teknik uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu malzemelerin kullanımı, otomotiv sektöründe hem estetik hem de fonksiyonel gereksinimlerin karşılanmasına yönelik çeşitlilik sunmaktadır (EuRIC, 2020).

Otomotiv plastik parçalarında en yaygın olarak kullanılan malzeme, iyi mekanik özelliklere, düşük yoğunluğa ve kolay işlenebilirliğe sahip olan polipropilendir. Mükemmel ısı direnci nedeniyle otomobil üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak üretim ve proses kullanımında PP malzemeleri kaçınılmaz olarak bazı monomerler, oligomerler ve diğer kirleticileri üretmektedir (Cheng vd., 2017).

Araç ağırlığının %10 oranında (yani yaklaşık 0,1 ton) azaltılması, yakıt verimliliğini %6-8 oranında artırmakta ve sera gazı emisyonlarını aracın ömrü boyunca 2,7 milyon galondan fazla benzinin yakılmasına eşdeğer oranda azaltmaktadır. Ayrıca, bir aracın toplam ağırlığının 10 kg azaltılması CO₂ emisyonlarını 1 g/km azaltabilmektedir (EuRIC AISBL, 2020). Ayrıca, plastik parçalar darbe dayanımı, ısı yalıtımı, gürültü azaltma ve korozyon direnci gibi çeşitli teknik özelliklere sahiptir ve bu da onları araçlarda kullanılmak için en uygun malzeme haline getirmektedir.

Otomotiv yan sanayi plastik parça üretimi enjeksiyon bölümü, kalıp hazırlama ve boyahane gibi bölümlerden oluşmaktadır. Her tesis kendi ihtiyacına göre proseslerini şekillendirmektedir. İlk adım, plastik ham maddelerin tedarik edilmesidir. Bu ham maddeler genellikle granül formunda sağlanmaktadır. Ham madde tedarik sürecinde, ham maddelerin kalitesi ve uygunluğu büyük önem taşımaktadır. Plastik ham maddelerin uygun şekilde saklanması, kalitelerini, tutarlılıklarını ve performanslarını korumak için çok önemlidir. Yakın mesafedeki malzemeler, komşu ürünlerin kirlenmesine yol açan bir ortam oluşturabilmektedir (Wypych, 2023). Granüllerin nem almasını önlemek için genellikle kapalı kaplarda saklanır ve uygun sıcaklık ve nem seviyeleri korunmalıdır. Plastik granüllerin uygun şekilde depolanması, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin zaman

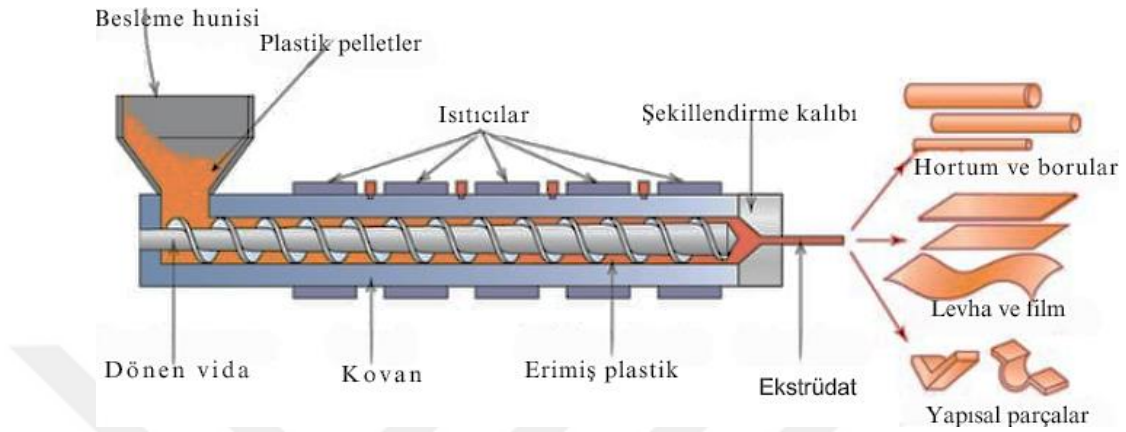
içinde korunması açısından kritik öneme sahiptir. Sıcaklık, nem, ışığa maruz kalma ve kirlenici maddelerle temas gibi faktörler, plastik granüllerin kalitesini ve üretim süreçlerine uygunluğunu etkileyebilmektedir. İdeal olarak, deformasyonu veya özellik kaybını önlemek için sıcaklıkları plastik reçinenin erime noktasının altında tutulmalıdır. Aşırı nem, plastik granüllerin topaklaşmasına veya hidrolizine yol açabileceğinden neme maruz kalmayı en aza indirmek önemlidir. Plastik granülleri doğrudan güneş ışığından veya UV'ye maruz kalmadan uzakta saklanmalıdır; çünkü ışığa uzun süre maruz kalmak polimerin renginin bozulmasına, oksidasyonuna veya bozulmasına neden olabilmektedir. Granülleri ışıktan korumak için opak kaplar veya kutular kullanılmalı ve kuru, iyi havalandırılmış bir ortamda saklanmalıdır. Plastik granülleri kapatmak ve toz, kir, böcekler veya diğer yabancı parçacıklardan kaynaklanan kirlenmeyi önlemek için hava geçirmez kaplar veya ambalajlar kullanılmalıdır. Plastik granüller, oda sıcaklığında (15-25°C), düşük nemli ortamlarda, doğrudan güneş ışığından ve kimyasal maddelerden uzak, temiz ve kuru alanlarda, nem geçirmeyen kapalı ambalajlarda saklanmalıdır (Wypych, 2023).

Üretimde kalite açısından uygunsuz olan parçalar, plastik kırma makinesinde boyutları küçültülerek işlenmektedir. Bu küçültülmüş plastik ham maddeler, uygunluk kontrollerinden geçirildikten sonra tekrar enjeksiyon makinelerinde kullanılmak üzere hazır hale getirilebilmektedir (Hannay, 2022).

Ekstrüzyon hattının temel unsurları ekstrüder (makine) ve kalıptır (Patil vd., 2017). Şekil 2.7'de ekstrüder makinesinin gösterimi yapılmaktadır. Polimerlerin enjeksiyonla kalıplanması, küçültülen polimerik maddenin belirli bir kesme akışkanlığına ulaşana kadar işlenip, sıcaklık kontrollü bir kalıba enjekte edilerek şekillendirilmesi işlemidir. Kalıplama sırasında, plastik malzeme bir huni aracılığıyla ısıtılmış bir eritme silindirine girmekte ve burada vida tarafından yakalanmaktadır. Yeterince erimiş malzeme toplandığında, tüm vida ileri doğru hareket etmekte ve erimiş malzemeyi bir nozul aracılığıyla kalıp besleme sistemine enjekte etmektedir.

Ekstrüze edilen polimer soğutma, çapraz bağlama veya polimerizasyonla sertleştirilmektedir. Soğumanın başlangıcında malzeme büzülme ve erimiş malzeme

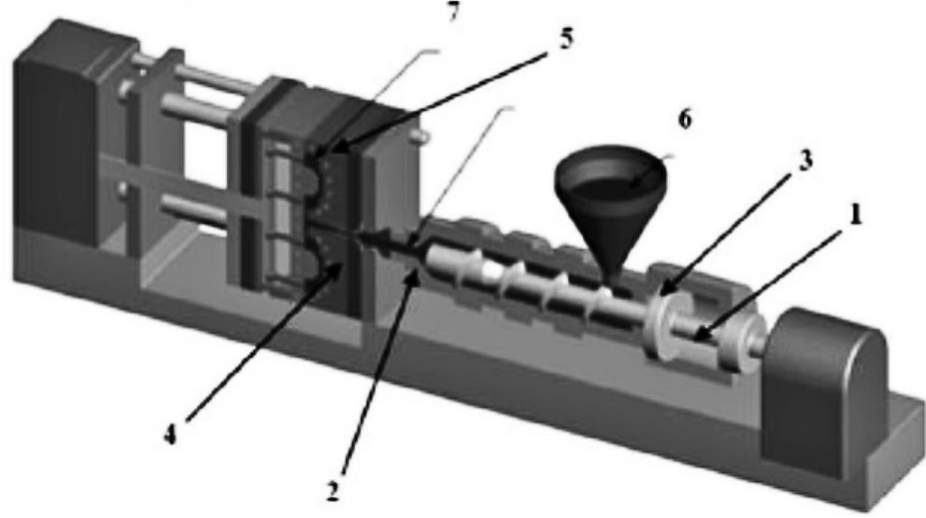
basınç altında kalmaya devam etmektedir. Daha sonra, vida başlangıç konumuna geri dönmekte ve yeni malzeme miktarı için hazırlanmaktadır. En son aşamada kalıp açılarak ürün kalıptan çıkarılmaktadır (Patil vd., 2017).



Şekil 2.7. Ekstrüder makinesi (Nozimbek 2021’den değiştirilerek alınmıştır)

Basınç altındaki enjeksiyon odası Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Nozimbek ve vd. (2021) örnek bir enjeksiyon makinesi prensibini anlatmıştır. Basınçlı enjeksiyon makinesi, bir stok (1), bir piston (2), bir silindir (3), bir nozul (4) ve bir pres kalıbı (5) içermektedir. 600-650 gram plastik karışım, döküm makinesinin stok bölümüne (1) dökülmektedir. Plastik karışım, döküm makinesinin malzeme silindrine (3) aktarılacak şekilde içinde 240-270 °C sıcaklıkta 30-40 dakika boyunca ısıtılmaktadır. 240 °C sıcaklığa ısıtılan parça (4), başlangıçta 80-100 °C’ye kadar ısıtılmış bir şekillendirme plakası (5) üzerine monte edilmektedir. Döküm makinesinin pistonu (7) sağdan sola hareket ettiğinde, erimiş plastik karışımın sıkıştırılmış ucunun (6) silindirden çıkarılması ve şekillendirme yüzeyi ile aşınmış parçanın yüzeyi arasındaki boşluğu doldurması sağlanmaktadır. Bu nedenle, sıvı kompozisyonun sıcaklığı erime sıcaklığından 20°C daha yüksek olması, dökümün özgül basıncı 30-35 MPa olması ve basınç altında kalma süresinin 20 saat olması önerilmektedir. Daha sonra basınç azaltılarak pres kalıbı ayrılır. Onarılan parça kalıptan çıkarılmakta, temizlik işlemi yapılmakta, fazla malzeme parçaları çıkarılmakta, parça 120-130 °C sıcaklıktaki yağda termal olarak işlenmektedir ve 1.5-2 saat boyunca bekletilmektedir. Parça daha sonra yağla birlikte 110 °C’ye kadar soğutulmakta ve açık

havada oda sıcaklığına kadar soğutulmaktadır. Plastikler basınç altında döküldüğünde, boyutları 24 saat sonra kontrol edilmektedir (Nozimbek vd., 2021).



1-stok, 2-piston, 3-silindir, 4-nozül, 5-kalıp, 6-erişik plastik, 7-ayrıntı.

Şekil 2.8. Basınç altındaki enjeksiyon odası (Nozimbek vd., 2021)

Ekstrüzyon adımıından sonra gelen plastik malzemelere isteğe göre kesme işlemi uygulanabilmektedir. Plastik malzemenin belirli bir boyutta veya şekilde kesilmesi işlemidir. Isıl şekillendirme, önceden hazırlanmış plastik malzemelerin belirli bir kalıp kullanılarak şekillendirilmesi işlemidir. Bu işlem, malzemelerin ısıtılması ve ardından mekanik sıkıştırma, hava basıncı veya alt basınç gibi tekniklerle şekillendirilmesini içerebilmektedir. Örneğin, serbest damga ile şekillendirme veya basınçlı hava ile şekillendirme gibi farklı yöntemler kullanılabilmektedir. Bu yöntemler, çeşitli plastik ürünlerin üretiminde kullanılmakta ve farklı sonuçlar elde etmek için çeşitli kombinasyonlarda uygulanabilmektedir.

Müşteri isteği doğrultusunda boyama ve kaplama işlemine tabi tutulacak olan ürünler kontrolleri yapılarak boyahane bölümüne yönlendirilmektedir. Boyahane bölümünde yağ boya, solvent bazlı astar ve vernik gibi kimyasal maddeler kullanılmaktadır. Plastik parçaların boyama işlemi, yüzey geriliminin boyama için uygun hale getirilmesi için flamaj adı verilen bir uygulamayla başlamaktadır. Ardından, parçalar iyonize hava

ünitesinden geçirilerek üzerlerinde biriken yük boşaltılmaktadır. Boyama işlemi, PCL kontrollü iki eksenli bir robot ve konvansiyonel otomatik tabanca kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Boyanın kuruması için parçalar ara koridorda yaklaşık beş dakika bekletilir ve ardından PCL kontrollü iki eksenli bir robot ve konvansiyonel otomatik tabanca kullanılarak verniklenmektedir. Verniklenen parçalar, yaklaşık beş dakika daha ara koridorda bekletildikten sonra, 80°C'de 30 dakika fırınlanır. Fırınlanan parçaların yüzey sıcaklığı, ortam sıcaklığına (23-25°C) ininceye kadar soğutma kabini içinde soğutulmaktadır. Boya prosesi bir tesisin örnek uygulamasından derlenmiştir (Nozimbek vd., 2021).

Üretilen parçalar, herhangi bir yüzey hatası veya kusur açısından görsel olarak kontrol edilmekte ve sevkiyata hazır hale getirilmek üzere paketlenmektedir. Sevk edilene kadar uygun koşullarda depolanmakta ve daha sonrasında siparişe göre sevk edilmektedir.

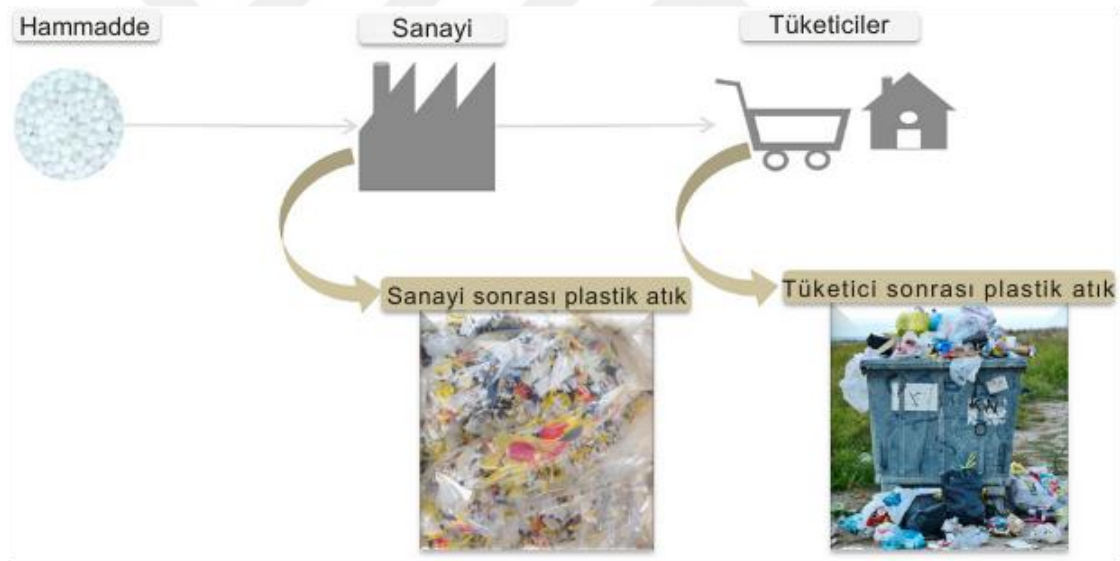
2.6. Plastik Atık Bertaraf Yöntemleri

1980'lerden bu yana, plastik atıkların bertaraf edilmesi gerekliliği fark edilmiş ve o zamandan beri plastik atık yönetimi için uygun yöntemlerin belirlenmesi amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır (Verma vd., 2016). Plastik atıkların yalnızca depolama sahasına gönderilecek malzeme olarak görülmemesi, geri dönüşüm veya yakma gibi ekonomik değeri olan alternatiflerinin de olduğunun hatırlanması önemlidir.

Plastiklere olan küresel talep sürekli artmaktadır. Birleşmiş Milletler Çevre Programı'na göre her yıl 460 milyon tonun üzerinde plastik üretilmektedir (IUCN, 2024). Plastiklerin dayanıklılığı, kullanımlarını teşvik ederken bozunma kapasitelerini azaltmakta ve bu durum düzenli depolama sahalarının dolmasına ve fazla atığın çevreye atılmasına neden olmaktadır. Yaygın olarak kullanılan plastiklerin hiçbiri biyolojik olarak parçalanamaz (Song vd., 2009), bu yüzden üretilen plastiklerin yarısından fazlası geri kazanılmadan atılmakta ve çöp sahalarında veya doğal çevrede birikmektedir (Bano vd., 2020). Plastik atıkları kalıcı olarak ortadan kaldırmanın tek yolu, yakma veya piroliz gibi yıkıcı ısıtıl

işlemlerdir, bu nedenle doğal çevrenin plastik atıklarla kirlenmesi giderek artan bir endişe kaynağıdır (Barnes vd., 2009).

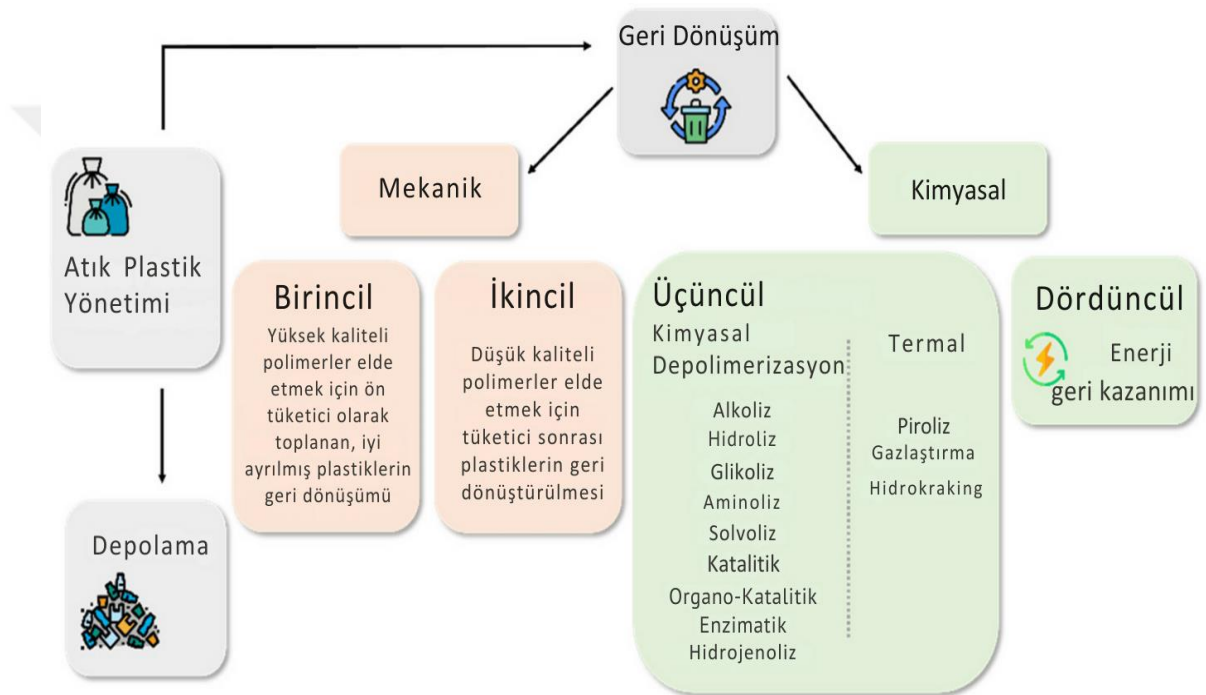
Endüstri sonrası atık, endüstride üretilen ancak kullanılmamış ve kirletici içermeyen plastik hurdaları kapsar. Bu plastik atık, kalıplama, ekstrüzyon veya baskı gibi üretim aşamaları yoluyla bertaraf edilir ve bu nedenle üzerinde bulunabilecek başlıca istenmeyen maddeler katkı maddeleri, yapıştırıcılar, çözücüler ve mürekkeplerden kaynaklanan kirliliklerdir (Cabanes vd., 2020). Diğer yandan, malzeme kullanıldıktan sonra sınıflandırılarak veya diğer belediye katı atıkları arasından geri kazanılarak elde edilen plastikler tüketici sonrası plastik atık olarak tanımlanır (Geyer, 2020). Bu atıklar, gıda, kozmetik ve deterjan gibi kalıntılar barındırarak plastiğe hoş olmayan bir koku katabilir ve mekanik geri dönüşümü daha zor hale getirebilir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Sanayi sonrası ve tüketici sonrası plastik atıkların şematik gösterimi

Plastik atıklar geri dönüştürülerek ikincil plastik ürünler olarak yeniden işlenebilir, ancak bu süreç sonsuza kadar devam edemez ve sonunda nihai bertaraf gerektirir. Plastiklerin termal imha yöntemiyle yok edilmesi mümkündür. Piroliz ve gazlaştırma gibi teknolojiler, plastik atıkları yakıta dönüştürebilir, ancak bu yöntemler yaygın değildir ve ekonomik açıdan verimli değildir. Termal imha genellikle enerji geri kazanımı ile veya

geri kazanım olmadan yakma yoluyla gerçekleştirilir. Plastik atık yakmanın sağlık ve çevre üzerindeki etkileri, emisyon kontrol teknolojilerine, yakma fırınının tasarımına ve işletilme şekline bağlıdır (Zink vd., 2018). Piroliz sıcaklığı genellikle 400-800°C veya daha yüksek düzeylerde seyrederken, plastik atıkların malzeme geri dönüşüm sürecinde erime sıcaklığı yaklaşık 200-300°C civarındadır. Bu daha düşük sıcaklıklarda, çeşitli zararlı bileşenler üretilebilir ve atmosfere salınabilmektedir (Tsai vd., 2009). Plastik atıkların bertarafı Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



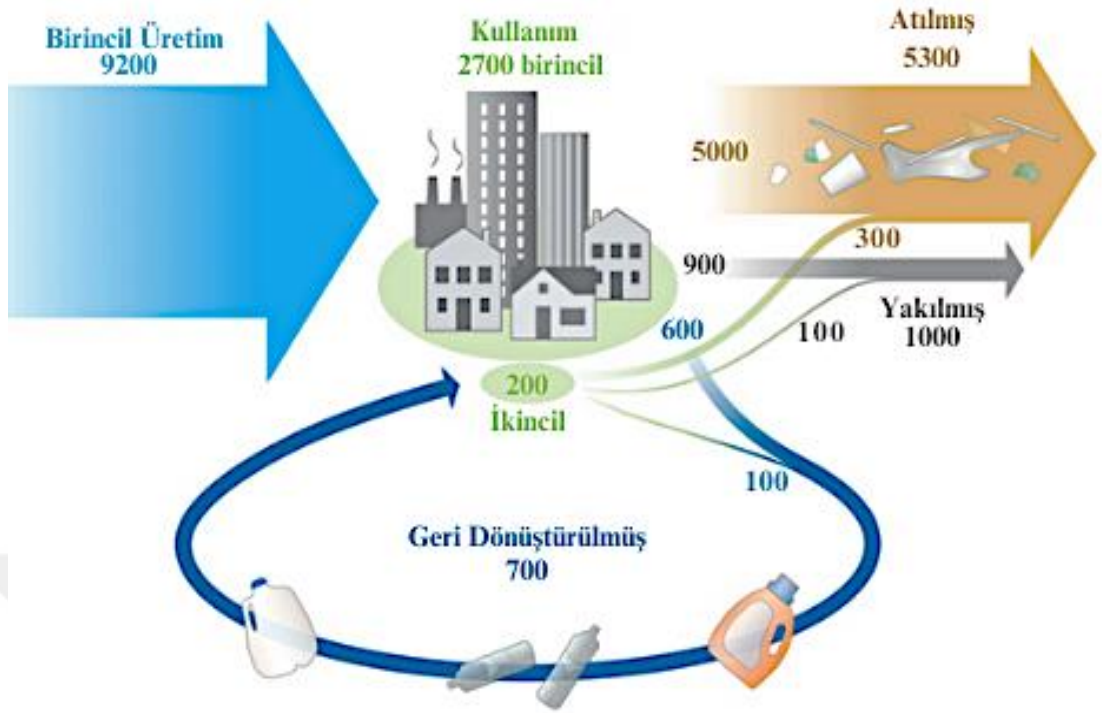
Şekil 2.10. Plastiklerin bertaraf yöntemleri

Vollmer vd. (2020), farklı plastik türlerinin (ABS, HIPS, PET, PET-PE, PP-GF) 1 tonunun yakılması, depolanması ve geri dönüştürülmesi sonucu yaşam döngüsü boyunca oluşan CO₂ emisyonları incelenmiştir. Araştırma, 1 ton plastiğin yakılmasının, plastik türüne bağlı olarak 5 ila 10 ton CO₂ salımına neden olduğunu ortaya koymaktadır. Plastiklerin erime noktası, viskozitesi, gerilme mukavemeti ve enerji içeriği gibi özellikler, yakma sonucu oluşan CO₂ emisyonlarını etkilemektedir. CO₂ emisyonlarının yaklaşık yarısı plastik üretiminden, üçte birinden azı ise yakma işlemiyle ortaya çıkan karbondan kaynaklanmaktadır. Düzenli depolama, CO₂ emisyonlarını üçte bir oranında

azaltmakta ve karbon salımı neredeyse yok denecek kadar olmaktadır, ancak büyük arazi ihtiyacı ve toprağa ve yeraltı sularına potansiyel toksik sızıntılar nedeniyle sürdürülebilir bir çözüm olmadığı belirtilmiştir. Katkı maddeleri içeren karışık plastiklerin mekanik geri dönüşümü, düşük kalite nedeniyle CO₂ emisyonlarının yalnızca %25'ini engellemektedir. Geri dönüştürülmüş ürünlerin üretimi ve taşınması gerektiğinden, bu durum yeniden kullanımın diğer tüm geri dönüşüm yöntemlerine göre avantajlı olduğunu göstermiştir.

Geyer vd. (2017), plastik ve plastik atık üretimi verilerine dayanarak kümülatif bir hesap yapmıştır. 2018 yılı sonunda dünya genelinde üretilen toplam birincil plastik atıkların miktarı 6900 megaton (Mt)'a ulaşmaktadır. Bu miktarın içinde 5600 Mt polimer reçine, 900 Mt polimer elyaf ve 400 Mt katkı maddesi bulunmaktadır. Polimer reçine, 2300 Mt PE, 1300 Mt PP, 400 Mt PS, 300 Mt PVC, 800 Mt PET, 300 Mt PUR ve 200 Mt diğer türlerden oluşmaktadır. Şimdiye kadar üretilen bu atıkların 700 Mt'u geri dönüştürülmüş, 1000 Mt'u yakılmış ve 5300 Mt'u ise çöpe atılmış ve şu anda çöplüklerde veya doğal ortamda bulunmaktadır. Dolayısıyla, şimdiye kadar üretilen tüm plastik atıkların %10'unun geri dönüştürüldüğü, %14'ünün yakıldığı ve geri kalanının, yani %76'sının ise atıldığı tahmin edilmektedir.

1950'den 2017'ye kadar insanlık yaklaşık 9200 Mt birincil plastik ve 700 Mt ikincil plastik üretmiştir (Şekil 2.11). Üretilen toplam 9900 Mt plastiğin yaklaşık 2700 Mt'u birincil olarak kullanılmış geriye kalan 7000 Mt plastik ise atık haline gelmiştir. Bu atıkların yaklaşık 700 Mt'u geri dönüştürülmüş, 5300 Mt'u ise çöpe atılmıştır. 1000 Mt'u ise yakılmıştır. Üretilen plastiklerin sadece %14'ü, üretildikten sonra birden fazla kez geri dönüştürülmüştür.



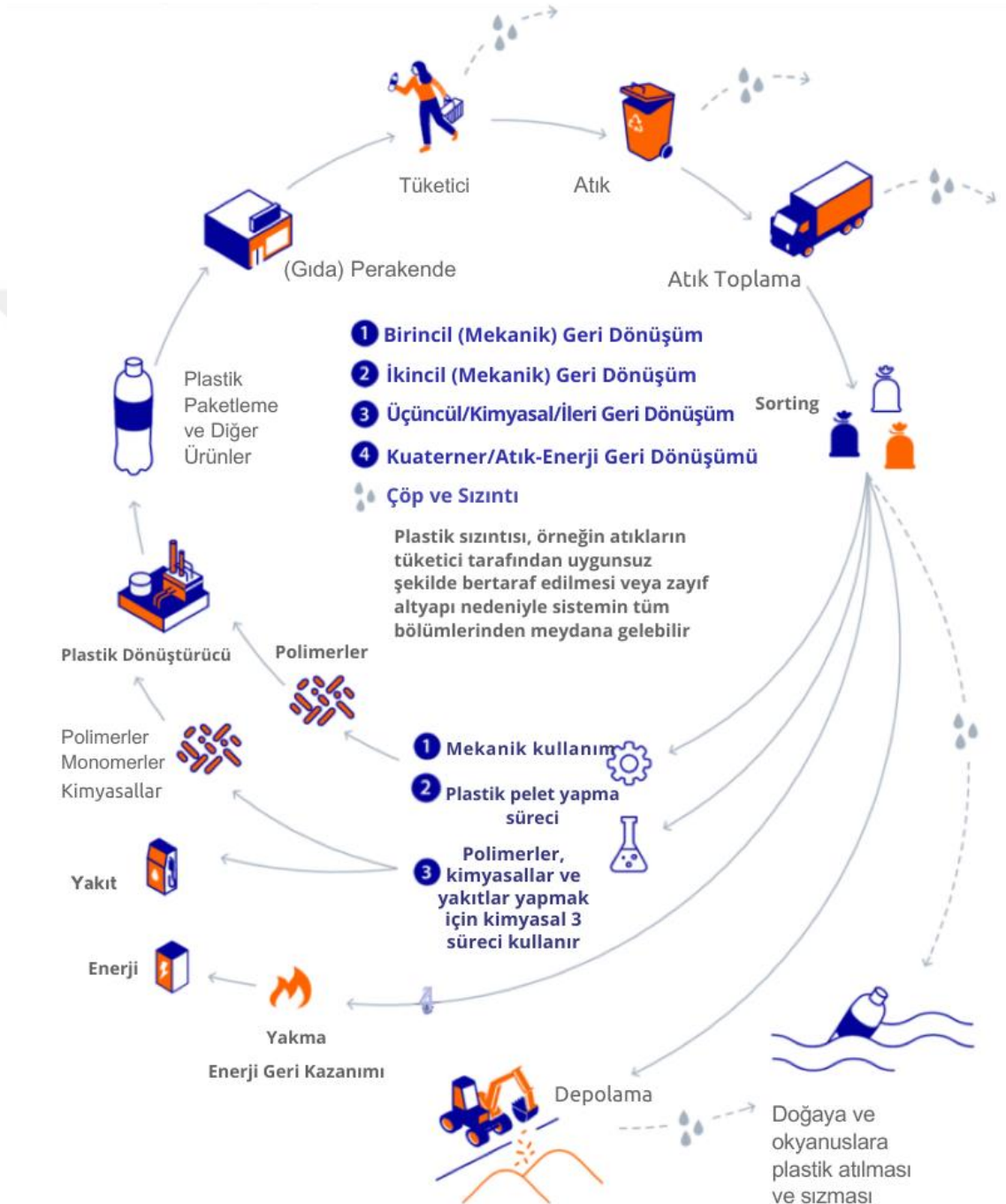
Şekil 2.11. 1950'den 2017'ye kadar tüm plastiklerin kümülatif üretimi, kullanımı ve kaderi (Geyer 2017'den değiştirilerek alınmıştır)

Türkiye'de yılda yaklaşık 32-35 milyon ton evsel atık oluşmaktadır ve bu çöpün %85'i düzenli veya düzensiz depolama alanlarına karışık bir şekilde gömülmektedir. Araştırmalar, evsel atıkların %10-15'inin plastiklerden oluştuğunu ve bu miktarın yaklaşık 3.5 milyon ton olduğunu göstermektedir. Ancak, etkisiz atık yönetimi nedeniyle bu plastiklerin en iyimser tahminle %15'inin toplanabilmekte olduğu ve çoğunlukla atık toplayıcıları tarafından gayri resmi olarak geri dönüştürüldüğü belirtilmektedir (TÜBİTAK, 2023).

Mevcut doğrusal üretim modelinin sürdürülmesi, yaklaşan çevresel plastik atık krizine dair önemli uyarılar vermekte olup, bu durum üretilen plastiklerin büyük bir kısmının geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması için çözümler geliştirilmesini gerektirmektedir (Cabanes vd., 2020).

Plastics Europe verilerine göre, son yıllarda geri dönüşüm ve enerji geri kazanım oranları düzenli olarak artmakta, bu da düzenli depolama alanlarının doldurulmasını önemli ölçüde azaltmaktadır (Plastics Europe, 2023). Döngüsel ekonomi ve plastik atıkların

azaltılması Avrupa Birliği'nin öncelikleri arasında yer almaktadır. Artan geri dönüşüm oranlarının plastik endüstrisinin fosil ham maddeden ayrılmasına katkıda bulunacağı düşünülmektedir. Plastiklerin üretimi, kullanımı ve bertarafı Şekil 12'de verilen görselle özetlenmektedir.



Şekil 2.12. Plastiklerin üretimi, kullanımı ve bertarafı

2.7. Plastiklerin Geri Dönüşümü

Geri dönüşümün üç ana türü bulunmaktadır: mekanik, kimyasal ve termal/enerji geri dönüşümü (Al-Salem vd., 2009). Teorik olarak, tüm termoplastiklerin geri dönüştürülmesi mümkün olmakla birlikte, pratikte toplanan atıkların büyük bir kısmı belirli termoplastiklerden oluşmaktadır. Bu atıkların dağılımı şu şekildedir: PET (%40), HDPE ve LDPE (%22), PP (%10,2), PVC (<%2) ve PS (<%2) (Schyns & Schaver, 2021). Geri dönüşüm türlerinden mekanik geri dönüşüm bu plastik türleri için uygun bir seçenektir. Özellikle temiz ve tek tip termoplastiklerin mekanik geri dönüşümü hem kolay hem de daha düşük maliyetlidir (Maris vd., 2018).

Çizelge 2.2. Plastik atıkların geri dönüştürülmesi ile ilgili yöntemlerin sınıflandırılması (Alhazmi vd., 2021)

Tür	Tanım	Dezavantaj
Birincil	Endüstriyel süreçlerde atık plastiklerin yeniden ekstrüzyonu yapılırken, yüksek homojenlik sağlanması gerektiğinden tüketici sonrası plastik atıklar dışarıda bırakılmıştır.	Tüketici sonrası plastik atıklar için uygun değildir.
İkincil	Geri kazanılan plastiklerin mekanik geri dönüşümü. Tüketicilerden geri kazanılan plastikler, işlenmemiş plastiğin yerini almak üzere tek polimer peletler veya granüller üretmek için eritilir ve ekstrüzyon yapılır.	Plastik atıklar kuru ve temiz olması ve ideal olarak tek bir tür plastik polimerinden oluşma gerekliliği
Üçüncül	Plastik atıkların birincil plastik üretimi için ham madde olarak kullanılabilecek monomerlere ve diğer temel kimyasal elementlere de polimerize olduğu ve parçalandığı piroliz ve/veya hidroliz işlemlerine tabi tutulan ham madde kimyasal geri dönüşümü. Bu genellikle geri dönüşüm tesisinin kendisine güç sağlamak için kullanılan, petrol ve gaz üretimine dönüşür.	Basınç uygulamasından dolayı yüksek enerji tüketimi Negatif çevresel etkilere sahip kimyasal reaktifler kullanılması

Plastik atıkların geri dönüştürülmesi, Çizelge 2.2'de gösterildiği üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Birincil işlemler, tüketici öncesi veya saf polimerlerin geri kazanımı ve

yeniden kullanılması ile ilgilenmektedir. İkincil işlemler, tüketici sonrası polimerik atıkları ayrıştırmakta, kırmakta ve yeniden ekstrüde etmektedir. Ancak, bu işlemler sonucunda elde edilen ürünler genellikle orijinal polimere kıyasla daha düşük fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Birincil ve ikincil geri dönüşüm, defalarca tekrarlanabilen fiziksel süreçleri göstermektedir. Üçüncül işlemler, mekanik geri dönüşümle işlenemeyen polimerlerin kimyasal geri dönüşümünü kapsamaktadır. Çizelgede olmayan dördüncül işlemler ise enerji üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Çöp sahalarına gönderilen polimerler ve plastikler, geri dönüştürülemeyerek atık haline gelmekte ve değerini kaybetmektedir (Beghetto vd., 2021).

Plastik atıkların ayrıştırılması ve işlenmesi için kullanılan teknikler, atığın türüne bağlı olmaktadır. Termoplastik ve termoset polimerler arasında önemli bir ayrım yapılması gerekmektedir. Termoplastikler ısıtıldığında eriyip soğutulduğunda sertleşmekte, bu nedenle ekstrüzyon işlemiyle defalarca işlenebilmektedirler. En yaygın termoplastikler arasında PP, PET, LDPE, HDPE, PVC ve PS bulunmaktadır. Ancak, termoset polimerler ısıtıldığında geri dönüşümsüz kimyasal reaksiyonlara girmekte, bu yüzden ekstrüzyonla yeniden işlenememektedirler. Ana termosetler arasında poliüretanlar (PUR), reçineler (epoksi, fenol-formaldehit ve polyester) ve vulkanize kauçuk yer almaktadır (Ncube vd., 2021).

Plastik geri dönüşümünün büyük çoğunluğu termoplastiklerin mekanik geri dönüşümü yoluyla yapılmaktadır. Plastik atığı monomerlerine geri polimerize eden kimyasal geri dönüşüm şu anda çok sınırlıdır (Zink vd., 2018).

Avrupa Birliği'nin açıkladığı plastik stratejisine göre; 2030 yılına kadar plastiklerin %100'ünün yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesi hedeflenmektedir (Haider vd., 2019).

Tehlikesiz plastik atıkların mekanik geri dönüşümü; ayırma, öğütme, yıkama, kurutma, yeniden granüle etme ve birleştirme gibi çeşitli aşamalardan geçmekte ve ardından geri dönüştürülen plastikler yeni ürünlere dönüştürülmektedir (Chandran vd., 2020).

Genel olarak, mekanik geri dönüşüm çevresel açıdan en çok tercih edilen yöntemdir (Vollmer vd., 2020). Ayırma ve yeniden işleme adımlarına göre çeşitli derecelerde mekanik geri dönüşüm uygulanabilmektedir. Basit tesislerde yalnızca birkaç polimer türü (örneğin PP ve PE veya PET ve HDPE) hedeflenmekte ve diğer plastik atıklar atılmaktadır. Gelişmiş tesisler ise daha fazla polimer türünü işleyebilmektedir. Geri dönüştürülmüş plastiğin kalitesi ve değeri, saflığına bağlıdır. Endüstrilerin birçoğu, safsızlık içeren geri dönüştürülmüş plastikleri (örneğin, plastik olmayan bileşenler, hedef dışı plastikler, boyalar) reddetmektedir (Vighi vd., 2021). Plastik atığın şekli de önemlidir; örneğin, plastik filmler (örneğin ambalaj poşetleri) makineleri tıkayabilmektedir.

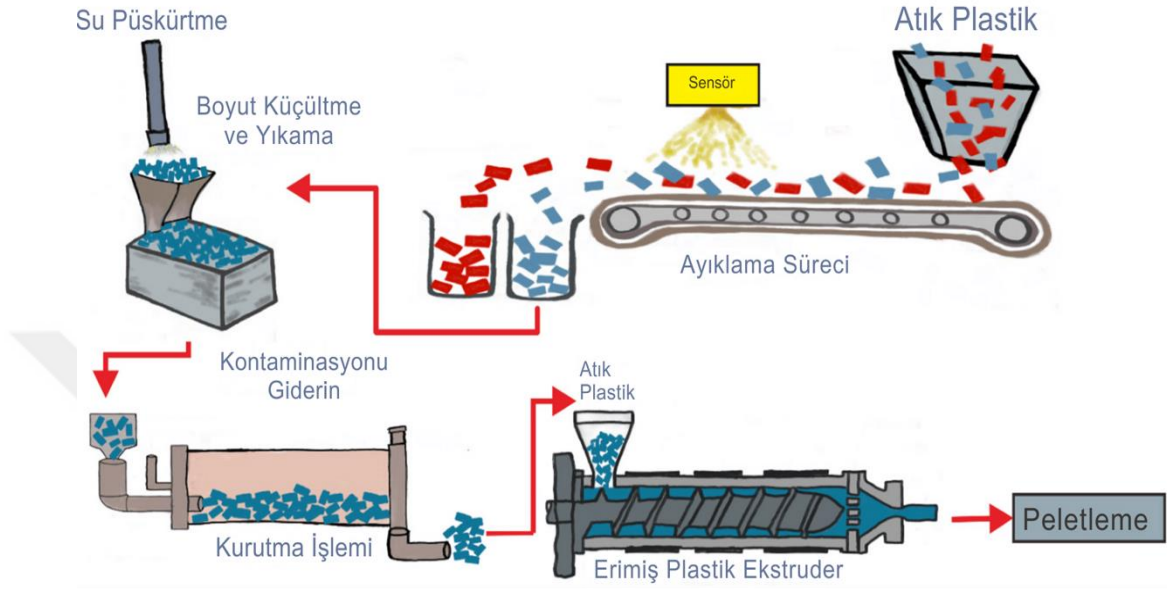
Buna karşın, kimyasal ve termal geri dönüşüm yöntemleri safsızlıklara daha toleranslıdır. Bu yöntemler, plastik olmayan ve plastik safsızlıkları ayırarak malzemeleri ve/veya enerji kaynaklarını (petrol ve gaz) geri kazanabilmektedir. Ancak, kimyasal geri dönüşümle yalnızca az sayıda polimer geri dönüştürülebilmekte ve bu süreçler hala önemli miktarda kaynak gerektirmektedir (Hopewell vd., 2009).

2.7.1. Plastiklerin Mekanik Geri Dönüşümü

Mekanik geri dönüşüm, toplama, eleme, otomatik veya manuel ayıklama, yıkama, parçalama ve ekstrüzyon gibi çeşitli adımlardan oluşan plastik geri dönüşümünün ana ve en yaygın kullanılan teknolojisi olarak bilinmektedir. Şekil 2.13'te atık plastiğin mekanik geri dönüşüm teknolojisi gösterilmektedir.

Mekanik geri dönüşüm, plastik atıkların kirletici maddelerinden ayrılması, kesme/parçalama, yüzdürme, öğütme, yıkama ve kurutma, aglütinasyon, ekstrüzyon ve söndürme gibi bir dizi mekanik adımla ikincil ham maddelere veya ürünlere dönüştürüldüğü fiziksel bir süreçtir (Harun, 2012). Mekanik geri dönüşüm, malzemelerin kimyasal yapısında önemli değişikliklere uğratmadan plastikleri geri dönüştüren düşük maliyetli bir çözümdür. Süreç, plastik atıkların ayıklanmasıyla başlamakta ve daha sonra herhangi bir yabancı maddeyi gidermek için temizlenmektedir. Temizlenen plastik atıklar

küçük parçalara bölünerek erilmektedir. Eriyen plastikler peletler, pullar veya granüller olarak adlandırılmaktadır. Bu peletler, pullar ve/veya granüller yeni plastik ürünler üretmek için kullanılabilir (Pilapitiya & Ratnayake, 2024).



Şekil 2.13. Atık plastiğin mekanik bir yöntemle geri dönüştürülmesi teknolojisi: ayırma işlemi, boyut küçültme, kurutma işlemi ve erimiş plastik (Damayanti 2022'den değiştirilerek alınmıştır)

Plastik atıkların taranması ve ayrıştırılması, verimli geri dönüştürülebilirlik ve polimerin kalitesinin korunması için kritiktir. Karışık plastiklerin ayrılması genellikle farklı teknolojilerin birleşimini gerektirmektedir. Tüm geri dönüşüm süreçlerinde ayıklama önemli bir adımdır (Ragaert vd., 2020). Ayıklama için kuru ve ıslak tekniklerin uygulandığı manüelden otomatığe kadar değişen çeşitli teknolojiler bulunmaktadır (Cabanes vd., 2020). Manyetik veya elektrik özellikleri, parçacık boyutu, yoğunluk ve renk gibi özelliklere göre kuru veya ıslak yerçekimi ayırma, elektronik veya manyetik yoğunluk ayırma, yüzdürme ve sensör tabanlı sıralama gibi teknikler kullanılmaktadır (Beghetto vd., 2021).

Kuru ayırma, optik sensörler, manyetik ayırıcılar ve hava tabanlı sistemler gibi teknolojilerle gerçekleştirilmektedir. Islak ayırma ise yüzdürme ve yoğunluk farklarını kullanarak plastikleri su içinde ayırmaktadır (Schwabl vd., 2021). Yerçekimi ayırma

yöntemi hem kuru hem de ıslak ortamda yapılabilmekte; hava sınıflandırıcıları, lavabo-şamandıra, jigging ve hidrosiklon teknikleri kullanılmaktadır. Girdap akımı ayırıcısı, demir dışı metalleri plastiklerden ayırmak için yüksek hızlı bir manyetik rotor kullanılmaktadır (Huang, 2021). Mekanik ayırma, tamburlu elek ve dönen bıçak sistemi ile plastikleri boyutlarına göre ayırıştırarak, parçalamakta ve yeniden işlenmeye hazır hale getirmektedir. Bu yöntemler, geri dönüştürülen plastiklerin kalitesini ve ekonomik değerini arttırmaktadır. Ayırma işlemi, ekstrüzyon sırasında polimer matrisinde yanmış maddelerin oluşmasını önlemek ve elde edilen polimerin koku emisyon değerini azaltmak için mekanik geri dönüşümün önemli adımlardan biridir (Cabanes vd., 2020).

Plastik endüstrisinde farklı polimerlerin bir araya gelmesi ayıklama zorlukları yaratmaktadır. Bu zorluklar aşılmazsa, karışık polimer akışlarının geri dönüştürülmesi gerekecektir. Mekanik geri dönüşümde karışık polimer akışları sıkça görülür, ancak polimer fazlarının uyumsuzluğu nedeniyle genellikle zayıf malzemeler ortaya çıkmaktadır. Bu uyumsuzluklar, ekstrüdatta kırılma noktaları oluşmasına neden olmaktadır (Vilaplana vd., 2007).

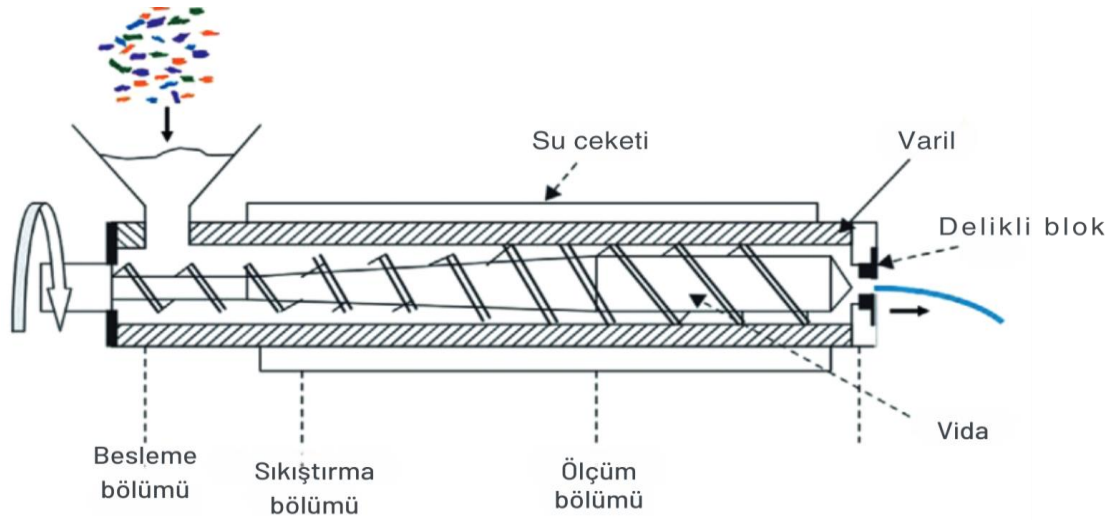
Polimer karışımlarının uyumlaştırılması, geri dönüşüm değerini artırarak daha iyi işlenebilirlik, tesis esnekliği, ürün uyarlama ve iyileştirilmiş karışık geri dönüşüm performansı sağlamaktadır. Uyumlaştırıcılar, fazlar arasındaki ara yüzey gerilimini azaltmakta ve böylece iki polimer fazının daha homojen bir şekilde karışmasını sağlamakta, aynı zamanda faz yapışmasını artırmaktadır. Kopolimer uyumlaştırıcılar ise farklı kimyasal özelliklere sahip polimerlerin etkili bir şekilde birleştirilmesine yardımcı olmaktadır. Çok bloklu uyumlaştırıcı sistemlerde, fazlar arasındaki dolaşıklık artmakta ve bu da karışımın performansını iyileştirmektedir (Xu vd., 2018). Karışımların tasarımında, kullanım ömrü sonu geri dönüşümü göz önünde bulundurulmalı ve ekstrüzyon sırasında polimer eriyik sıcaklığı, bozunma ve stabilizasyon gibi etkiler dikkate alınmalıdır.

Ekstrüzyon, atık plastiklerden yeniden granüle edilmiş malzeme üretmek için mekanik geri dönüşüm endüstrilerinde en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yöntem, az solvent

kullanımı veya hiç kullanılmaması, basit ürün izolasyonu, kısa reaksiyon süreleri, sürekli proses ve nispeten düşük altyapı maliyetleri gibi birçok avantaj sunar (Maris vd., 2018). Tsai vd. (2009), yaptığı çalışmada ekstrüzyon işlemi sırasında şu sıcaklık aralıklarını önermiştir: PE için 260-270 °C, PP için 230-250 °C ve PVC için 180 °C.

Ekstrüder, ısı ve döner vidalar kullanarak polimerlerin termal yumuşamasını veya plastikleşmesi ile başlamaktaadır (Dynisco, 2017) (Şekil 2.14). Bu süreçte, polimerlerin termal iletim ve viskoz kesme etkisiyle termo-oksidatif ve kesme kaynaklı zincir parçalanması meydana gelmektedir. Bu zincir parçalanması, polimer zincirlerinin uzunluğunu azaltarak mekanik özelliklerini ve işlenebilirliğini olumsuz etkilemektedir. Çevresel oksijen, kesme kaynaklı radikallerle reaksiyona girerek peroksi radikallerini üretmektedir, bu da daha fazla radikal ayrışmasına yol açabilmektedir. Yüksek oksijen geçirgenliği, malzeme içinde termo-oksidasyon oranlarının artmasına katkıda bulunabilmektedir (Berk, 2009).

Polimer malzemesi, ekstrüderin içindeki vida tarafından ileriye doğru taşınırken, kovanın ısıtıcı elemanları tarafından ısıtılmaktadır. Ekstrüderdeki ısı ve vida hareketi, polimer malzemesini ileriye doğru taşırken iyice karıştırarak ve homojen hale getirmektedir. Erimiş polimer, özel bir kalıptan geçirilerek istenen profil veya şekli almaktadır. Soğutma işlemi sonrasında, ürün sertleşmekte ve nihai formunu almaktadır. Bu aşamada, ürün belirli uzunluklarda kesilebilmektedir (Dynisco, 2017).

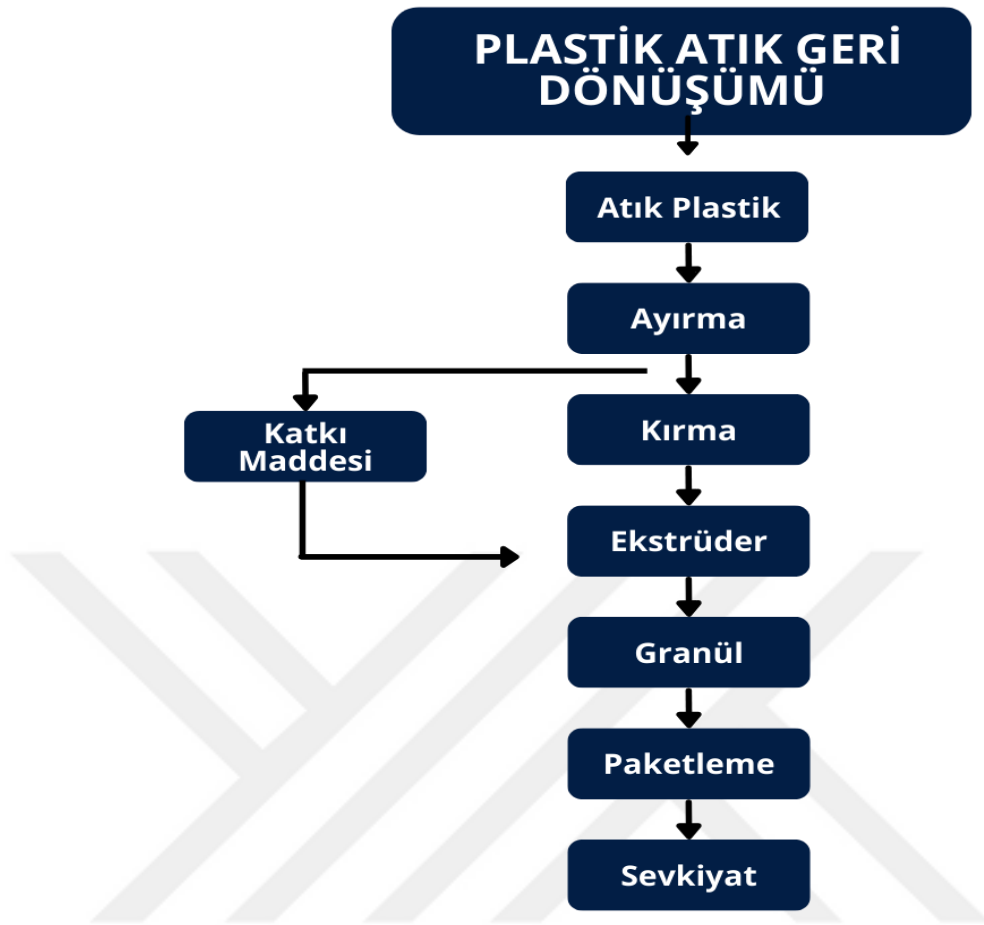


Şekil 2.14. Plastik eritme işleminde kullanılan ekstrüder makinesi

Ekstrüzyon ünitesi, plastikten UOB emisyonlarının oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır, çünkü plastik dönen vida aracılığıyla yüksek sıcaklıklarda eritilmekte, bu da malzemenin bozunmasını ve parçalanma ürünlerinin salınmasını kolaylaştırmaktadır (Liu vd., 2019).

Son yıllarda, araştırmacılar kimyasal işlemlere odaklanmış olsa da mekanik geri dönüşüm hala daha verimli ve iyi performans gösteren bir tekniktir. Ancak, kimyasal geri dönüşümün sanayileşmesi ve mevcut malzemelerin sürdürülebilir polimerlerle değiştirilmesi, altyapı ve teknoloji eksikliği ile sınırlıdır (Li vd., 2022).

Gelecekteki çözümler, biyolojik olarak parçalanabilen malzemelerin, tamamen geri dönüştürülebilir polimerlerin ve plastik yaşam döngüsünü en üst düzeye çıkarmayı sağlayan depolimerizasyon yollarının geliştirilmesine odaklanacaktır. Tipik bir geri dönüşüm tesisinin akış diyagramı Şekil 2.15'te verilmektedir.



Şekil 2.15. Tipik bir plastik geri dönüşüm tesisinin akış diyagramı

Atık plastiklerin eritilmesi sırasında açığa çıkan kokulu emisyonlara (Huang vd., 2013) ve çevre ve insan sağlığını etkileyen toprak kirliliğine (Tang vd., 2015) rağmen, mekanik geri dönüşüm atık plastik bertarafı için genellikle çevre dostu bir yaklaşımdır.

2.8. Plastiklerin Çevre ve Sağlık Üzerinde Etkileri

Dünyanın 2018 yılı sonu itibarıyla çevreye yaklaşık 6900 Mt yanlış yönetilen plastik atık bıraktığı tahmin edilmektedir (Geyer, 2020). Bu plastikler, yüksek moleküler ağırlıkları, karmaşık yapıları ve hidrofobik özellikleri nedeniyle çevrede uzun süre dayanıklılık göstermekte ve biyolojik bozunmaya dirençlidir (Huang vd., 2022). Plastikler, fotodegradasyon, termal oksidasyon, hidroliz ve biyolojik bozunma gibi süreçlere maruz kalmaktadır. Ayrıca, plastikler çöllerden çiftliklere, dağlardan okyanuslara kadar çeşitli

ekosistemlerde bulunmaktadır (Gabbott vd., 2020). Kontrolsüz olarak doğada biriken plastik atıklar çevre ve sağlık üzerinde olumsuz etkilere sahiptir.

2.8.1. Karasal ve denizel ortamlarda plastikler

Plastikler çoğunlukla karada üretildiği, kullanıldığı ve bertaraf edildiği için karasal ortamda yüksek miktarda atık birikmektedir (Hurley vd., 2020). Bu plastik parçacıklar mikropplastikler halinde parçalanır ve toprakta 15 yıla kadar kalabilmektedir. Ayrıca, nehirler, barajlar, göller ve kentsel drenaj ağları gibi tatlı su sistemleri de plastik çöplerle doludur. Tatlı su ekosistemleri, düşük rakımlı araziler nedeniyle, havza içinde salınan kirleticiler için birincil alıcı haline gelmektedir (Azevedo-Santos vd., 2021).

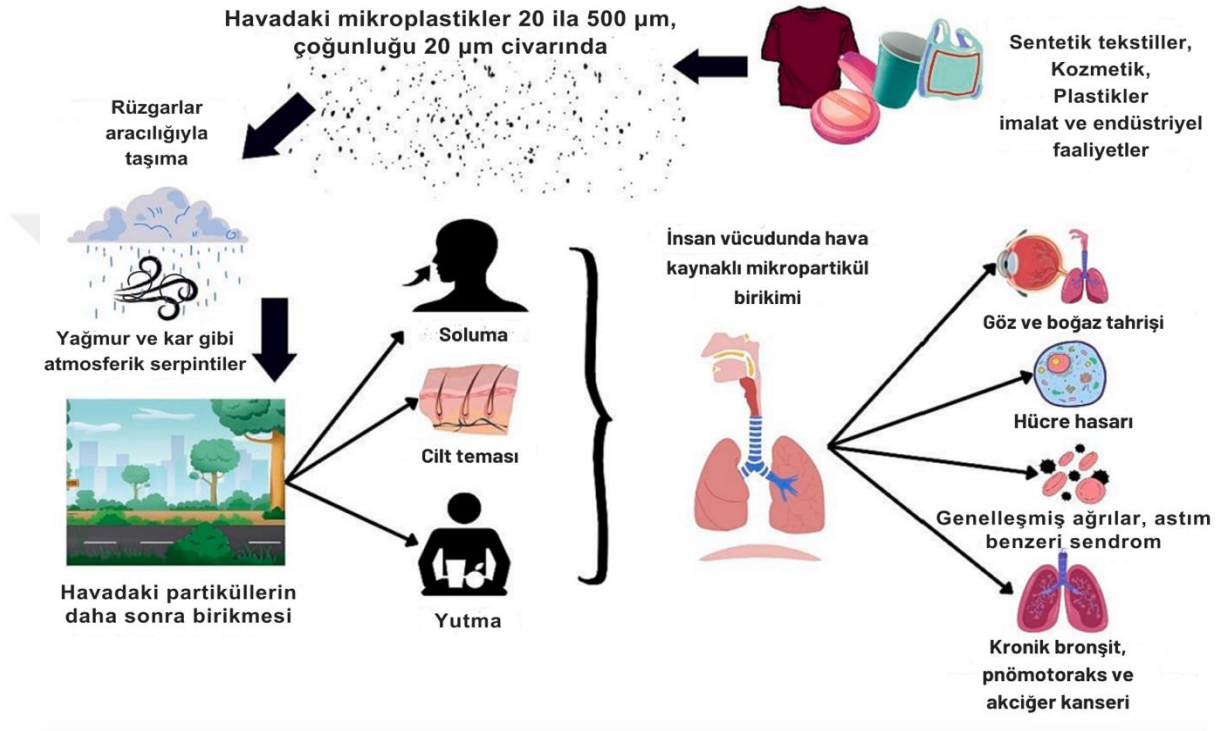
2020 yılı itibarıyla okyanus tabanında 3 ila 11 milyon metrik ton plastik kirlilik bulunduğu tahmin edilmektedir. Her yıl yaklaşık 8 ila 10 milyon ton plastik okyanusa sızmakta ve tüm deniz kirliliğinin %80'ini oluşturmaktadır. Plastik atıklar her yıl 100.000'den fazla deniz canlısını öldürmekte ve kıyıdan derin okyanusa kadar her alanda bulunmaktadır (Pilapitiya & Ratnayake, 2024).

Çöp sahalarındaki ve okyanuslardaki plastiklerin varlığı, bu malzemenin neredeyse yok edilemez doğası nedeniyle çevre için ciddi tehdit oluşturmaktadır. Plastik, zehirli kimyasalların toprağa ve yeraltı sularına sızmasına, hayvanların boğulmasına veya zehirlenmesine neden olabilmektedir. Toprak kirliliği, toprağın yapısını değiştirmekte ve su tutma kapasitesini sınırlamaktadır. İlk kullanımın ardından büyük miktarda plastik geri dönüştürülememekte ve doğrudan çöp sahalarına atılmaktadır, bu da sonunda okyanuslarda büyük tahribata yol açmaktadır (Fayshal vd., 2023).

2.8.2. Atmosferdeki plastikler

Havadaki mikropplastikler hem doğal hem de sentetik polimerlerden oluşmaktadır. Havadaki mikropplastiklerin baskın boyutu 20 ila 500 µm arasında değişmekte olup, çoğunluğu 20 µm civarındadır (Wang vd., 2021). Genel olarak, iç mekanlarda havadaki

mikroplastik miktarı dış mekân konsantrasyonundan çok daha yüksektir. Havadaki partiküllerin dağılması ve ardından atmosferik serpintide birikmesi yağış, rüzgâr, kirlilik konsantrasyonu, nem, yerel koşullar ve partikül boyutu gibi faktörlerden etkilenmektedir (Şekil 2.16). Rüzgâr, mikroplastikleri yerden havaya kaldıran ve uzak bölgelere taşınmalarını kolaylaştıran bir güç olarak işlev görmektedir.



Şekil 2.16. Atmosferdeki plastikler ve halk sağlığına etkileri (Pilapitiya & Ratnayake 2024'ten değiştirilerek alınmıştır)

2.8.3. Plastik döküntülerinin biyoçeşitlilik üzerindeki etkileri

Hayvanlar çeşitli çevresel ortamlarda plastiklerle, özellikle mikroplastiklerle karşılaşabilmekte ve bunları sindirebilmektedir. Plastiklerin sindirim sistemlerinde birikmesi, deve, keçi ve koyunlarda iç yaralanmalara, bağırsak tıkanmaları, beslenme sorunları ve hormon seviyelerinde düşüş gibi sağlık sorunlarına yol açmaktadır.

Deniz ortamlarında plastikler, ışık ve oksijen seviyelerini düşürerek biyolojik çeşitliliği azaltmaktadır. Bisfenol A, ftalatlar ve ağır metaller gibi plastikle ilişkili kimyasallar,

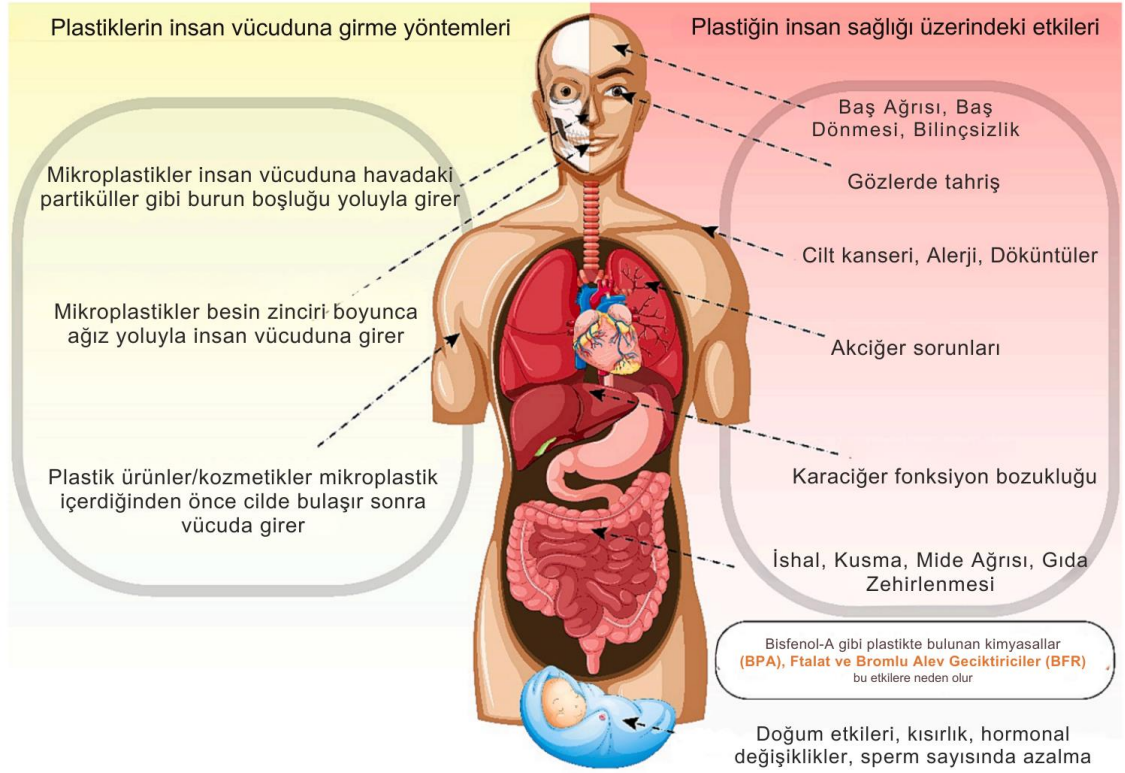
besin ağırları yoluyla organizmalarda birikerek oksidatif stres, kanser ve endokrin bozulma gibi olumsuz etkilere neden olabilmektedir (Pilapitiya & Ratnayake, 2024).

Deniz kaplumbağaları, deniz memelileri ve her tür deniz kuşu, plastik döküntüleri nedeniyle dolanma ve yutulma riskiyle daha fazla karşı karşıya kalmaktadır. Plastiklerle ilişkili toksik maddeler, hayvan gelişimini, üremeyi ve popülasyon dinamiklerini olumsuz etkileyebilmektedir. Endokrin bozucu kimyasallar içeren plastik kirliliği, üreme bozuklukları, biyoçeşitlilik kaybı, metabolizma bozulması ve hormon duyarlı kanser riskinde artış gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açmaktadır (Pilapitiya & Ratnayake, 2024).

2.8.4. Plastik döküntülerin halk sağlığı üzerindeki etkisi

Plastikler, çevresel sınırların ötesinde insan hayatını da etkileyerek ciddi sağlık sorunlarına yol açmaktadır (Şekil 2.17). Plastiklerde bulunan Bisfenol A (BPA), ftalatlar ve Bromlu Alev Geciktiriciler (BFR'ler) gibi kimyasal katkı maddeleri halk sağlığına ciddi zararlar verebilmektedir (Pawar vd., 2016). İnsanlar BPA'ya hava, toz ve su gibi çeşitli kaynaklardan maruz kalmaktadır, ancak ana kaynak beslenmedir (Katyal vd., 2020). BPA, kardiyovasküler hastalıklar, kronik böbrek hastalığı, doğum kusurları, gelişim bozuklukları ve kanser gibi ciddi sağlık sorunlarına neden olabilmektedir. Havada bulunan mikroplastikler, insan solunum sistemi yoluyla içeri alınabilir ve hidrofobik özellikleri nedeniyle kan dolaşımı aracılığıyla diğer dokulara ve organlara yayılabilmektedir (Yang vd., 2021).

Derin akciğerlerde bulunan mikroplastikler, göz ve boğaz tahrişi, nefes darlığı, öksürük, göğüste sıkışma, astım benzeri sendrom, kronik bronşit ve akciğer kanserleri gibi ciddi sağlık sorunlarına neden olabilmektedir (Wang vd., 2021). Ayrıca, plastiklerin çevresel bozunması uzun zaman almaktadır, örneğin LDPE'nin bozunması 500-1000 yıl sürmekte ve PVC asla bozunmamaktadır (Geyer, 2020). Bu plastiklerden sızan toksinler, çevre ve insan sağlığı için büyük bir tehlike oluşturmaktadır (Fayshal vd., 2023).



Şekil 2.17. Plastiklerin insan vücuduna giriş yöntemleri ve insan sağlığına etkileri (Pilapitiya & Ratnayake 2024'ten değiştirilerek alınmıştır)

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

3.1. Örnekleme Alanı

Bu tez çalışmasında, Bursa ilinde bulunan dört otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisi ile dört plastik geri dönüşüm tesisi bacalarından örnekler alınarak UOB, koku ve toz analizleri gerçekleştirilmiştir. Tesislerin üretimde kullandıkları ham maddeler, üretilen ürünler ve miktarları Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Otomotiv yan sanayi parça üretim tesisleri ve plastik geri dönüşüm tesisleri ham madde ve üretim bilgileri

Tesis	Üretimde kullanılan ham madde ve miktarları (kg/yıl)	Üretilen ürün ve miktarları (kg/yıl)
Otomotiv Yan Sanayi Plastik Parça Üretim Tesisleri		
O1	¹ PA: 610.985 PE: 2.036.617 PP: 1.323.801 Polyester: 101.801 Boya ve Bütil Asetat: 7553	Yakıt deposu, traktör tavanı, hava filtresi, hava kanalı, hava borusu, taşıma kasası, su deposu: 4.073.234
O2	ABS: 398.410 ABS/PC: 49.801 PA: 647.417 PE: 99.603 POM: 1.045.827 PP: 2.739.070 Boya, astar, masterbatch, gres yağı, rulman: 554.130	Emniyet kemeri parçaları, koltuk parçaları, tozluk, ayna çerçevesi, tampon braket parçaları, hava yastığı parçaları: 4.810.448 Plastik profiller (oto koltuk fitilleri): 169.680
O3	Antişok levha: 3.721.586 PP: 451.382 POM: 644.831 TPE: 193.449 ABS: 1.270.080 PS: 362.880 PE: 181.440	ABS levha: 1.270.080 PE levha 181.440 Koltuk arkılığı: 1.561.211 Koltuk yan kapakları: 390.303 Koltuk oturak arkılığı: 390.303 Klima kapakları: 1.561.211 Muhtelif plastik parçalar (tampon, motor ve bağlantı parçaları): 1.289.663
O4	PVC hurdası: 161.333 Plastik granül: 69.143	PVC lambri: 5.040 PVC tambur: 35.280 PVC çita: 2.520 PVC çekmece içi bölme: 1.512 PVC boru: 6.042 Plastik kasnak: 62475

Çizelge 3.1. Otomotiv yan sanayi parça üretim tesisleri ve plastik geri dönüşüm tesisleri ham madde ve üretim bilgileri (devam)

Plastik Geri Dönüşüm Tesisleri		
G1	Tehlikesiz ve inert ambalaj atığı: 27.676.000	Tehlikesiz ve inert ambalaj atıkları ayrıştırma ve presleme: 11.016.000 Kırılmış hurda plastik: 13.636.000 Muhtelif plastik granül: 3.024.000
G2	PP: 2.658.936 PVC: 782.040 Boya: 78.204 Kalsit: 391.020	Muhtelif plastik granül: 3.910.200
G3	Tehlikesiz plastik atıklar: 3.135.000	Granül: 3.135.000
G4	PP: 5.914.755 PE: 3.763.935 Hidrate magnezyum silikat: 537.705 Kalsit: 537.705	Granül: 10.754.100

¹PA: Poliamid, PE: Polietilen, PP: Polipropilen, Polyester, ABS: Akrilonitril bütadien stiren, ABS/PC: Akrilonitril bütadien stiren/polikarbonat, POM: Polioksümetilen, TPE: Termoplastik elastomer, PS: Polistiren, PVC: Polivinil klorür)

Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri ve plastik geri dönüşüm tesislerinin örnek alma noktaları ve örnek alınan bacalarda analiz edilen parametreler Çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3.2. Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri ve plastik geri dönüşüm tesisleri analiz edilen parametreler ve örnek alma noktaları

Tesisler	Analiz Edilen Parametreler			Örnek alma noktaları
	Koku	UOB	Toz	
Otomotiv Yan Sanayi Parça Üretim Tesisleri				
O1	-	+	+	Tozhane toz hazırlama bacası, rotasyon-1 fırın bacası, rotasyon-1 soğutma bacası, boya kabini bacası, rotasyon-2 soğutma bacası, rotasyon-2 fırın bacası, rotasyon-3 fırın bacası, rotasyon-3 soğutma bacası, bakımhane kaynak bacası
O2	-	+	+	Boya kabini 1 bacası, boya fırını 1 brülör bacası, boya fırını, havalandırma bacası, boya kabini 2 bacası, boya mutfağı flash off-1 bacası, flash off-2 bacası, flash off-3 bacası, soğutma kabini havalandırma bacası, boya deposu ve mutfağı havalandırma bacası, boya kabini 3 bacası, karbondioksit ve flamage kabin bacası, boya fırını 2 brülör bacası, yanma kabini bacası, çeker ocak bacası

Çizelge 3.2. Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri ve plastik geri dönüşüm tesisleri analiz edilen parametreler ve örnek alma noktaları (devam)

O3	-	+	+	Ekstrüder makinesi bacası
O4	-	+	+	Enjeksiyon makinesi bacası, kırma makinesi bacası

Plastik Geri Dönüşüm Tesisleri				
G1	+	+	+	Proses bacası, granül makinesi bacası
G2	+	+	-	Proses bacası, filtre temizleme bacası
G3	+	+	+	Granül makinesi havalandırma bacası, elek yakma fırını bacası
G4	+	+	+	Ekstruder bacası, agromer 1, agromer 2

3.2. Yöntem

3.2.1 UOB ölçüm yöntemi

Bu tez çalışmasında, otomotiv yan sanayi plastik parça üretimi ve plastik geri dönüşümü yapan tesislerin bacalarından alınan örneklerde uçucu organik bileşik (UOB) emisyonlarına bakılmıştır. Ölçüm prosedürü, TS EN 13649 sabit kaynak emisyonları – gaz halindeki her bir organik bileşiğin kütle derişiminin tayini – çözücü özütlemesi veya ısısal tarafından izlenen sorptif numune alma yöntemi standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş ve analizlerde farklı örnekleme cihazları kullanılmıştır (European Committee for Standardization, 2004; TS EN 13649). Literatürde referans metot olarak kabul edilen bu standart, UOB ölçümü için uluslararası alanda geniş kabul görmektedir.

Çizelge 3.3’te otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri ve plastik geri dönüşüm tesis bacalarından alınan hava örneklerinde bakılan analiz parametreleri, metot adı, metot numarası ve cihaz adı verilmektedir.

Çizelge 3.3. Otomotiv yan sanayi plastik parça üreten ve plastik geri dönüşüm tesisleri emisyon analizlerinde kullanılan metotlar ve cihazlar

Parametre	Metot Adı	Metot Numarası	Cihaz Adı
Hız ve Debi	Pitot Tüpü Metodu	TS ISO 10780 EPA 2	Environmental Supply C5000 İzokinetik Toz Örneklem Cihazı-1806/2317 Otomatik İzokinetik Örnekleyici- 600/A30002C/ISO LİFETEK
Nem	Nem Probu Metodu	İşletme İçi Metot-T 04 EPA 4	MRU Air Nova Plus Örneklem Cihazı - 017170 İzokinetik Toz Örneklem Cihazı-1806/2317 Otomatik İzokinetik Örnekleyici- 600/A30002C/ISO DELTA OHM HD2301.OR 16001804 LİFETEK
Toz (Partikül Madde)	Gravimetrik	TS EN 13284-1 EPA 17 EPA 5 TS ISO 9096	Environmental Supply C5000 İzokinetik Örneklem Cihazı İzokinetik Toz Örneklem Cihazı-1806/2317 Otomatik İzokinetik Örnekleyici- 600/A30002C/ISO LİFETEK
Uçucu Organik Bileşik	Aktif Karbon Tüp ile Absorbsiyon	TSE CEN/TS 13649	Eurometric Nas 13 D Dinamik Örneklem Cihazı (S.N:1720) Mefe VOC Örneklem Cihazı – EYM100 GC-FID

Numune alma hattı, TSE CEN/TS 13649 standartlarına uygun olarak kurulmuş ve örneklemme cihazına bağlanarak kaçak testi yapılmıştır. Nemli bacalardan örneklemme yapılacaksa, seyreltme hattı kurulmuş ve baca gazı belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Ardından prob baca içine yerleştirilerek cihaz çalıştırılmış ve belirli bir çekiş hızında (0,1 lt/dk - 0,5 lt/dk) örneklemme devam ettirilmiştir. Numuneler, absorplayıcı tüpler üzerinde absorbe edilmiş ve ölçüm süresince baca ebatları, boyu, hızı gibi diğer yardımcı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan numune kapları, özenle çıkarılarak kapatılmış, etiketlenmiş ve laboratuvara taşınmıştır. Numuneler, gaz kromatografisi ile analiz edilerek, UOB türleri ve konsantrasyonları belirlenmiştir.

Örnekleme işlemleri sırasında Mefe VOC Örnekleme Cihazı (EYM100) ve Euro Metrics Nas 13-D UOB Örnekleme Cihazı kullanılarak numuneler toplanmıştır. Her bir cihaz, belirli bir süre boyunca hava çekerek UOB'lerin aktif karbon tüpleri üzerinde adsorbe edilmesini sağlamıştır.

Toplanan UOB örneklerinin analizi için Agilent 7820 Gaz Kromatografisi kullanılmıştır. Her bir UOB'nin analiz edilerek konsantrasyonları belirlenmiş ve sonuçlar elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında emisyon ölçümleri, ölçüm sonuçlarının karşılaştırılabilir olmasını sağlayacak şekilde titizlikle gerçekleştirilmiştir. Kullanılan ölçüm cihazları ve yöntemleri, Türk Standartları, DIN, EPA veya CEN normlarına uygun olarak seçilmiştir. Genellikle sürekli rejimde çalışan tesislerde, emisyon ölçümleri tesisin izin verilen en yüksek yükte çalıştığı durumlarda, en az üç ardışık zamanda yapılmıştır. Ölçümler, izokinetik şartların sağlandığı noktalarda yapılmıştır.

3.2.2 Koku ölçüm yöntemi

Bu tez çalışmasında, çeşitli plastik geri dönüşüm tesislerinden alınan örneklerde koku ölçümü dinamik olfaktometri yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu yöntem, koku konsantrasyonunu tespit etmek için insan burnunu dedektör olarak kullanır. Temel olarak, yöntem evet/hayır prensibine dayanır ve koku konsantrasyonunu metreküp başına koku birimi (KB/m³) olarak ifade etmektedir.

Çeşitli tesislerden toplanan örneklerin koku ölçümleri belirlenen standart metotlar ve cihazlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Koku ölçümleri sırasında, her bir parametrenin doğru ve güvenilir bir şekilde ölçülmesi sağlanmıştır. Kullanılan metotlar, numaraları ve cihaz adları Çizelge 3.4'te verilmektedir.

Çizelge 3.4. Plastik geri dönüşüm tesisleri koku analizlerinde kullanılan metotlar ve cihazlar

Parametre	Metot Adı	Metot Numarası	Ölçüm Cihazları
Koku	Sabit kaynak emisyonları - dinamik olfaktometri ve koku yayılma hızı ile koku derişiminin tayini	TS EN 13725	Olfactometer T08
Hız	Pitot Tüpü Metodu	TS ISO 10780	Pitot Tüpü
Sıcaklık	Isıl Çift Yolu ile	İşletme İçi Metot	Optima 7
Nem	Yaklaşım Metodu	EPA 4	Optima 7
	Gravimetrik Referans Metot	TS EN 14790	

Tez çalışma kapsamında örnekleme ve ölçümler, uluslararası TS EN 13725:2004 Sabit kaynak emisyonları - dinamik olfaktometri ve koku yayılma hızı ile koku derişiminin tayini metodu ve Şekil 3.1'de görülen ECOMA TO8 olfaktometre cihazı kullanılmaktadır.

Panelistlere temiz hava ile seyreltilmiş kokulu numuneler verilmiştir. Temiz hava içinde karbon filtre bulunan kompresör ile sağlanmıştır. Koku ölçümleri genellikle dört panelist ve bir panel lideri ile gerçekleştirilmiştir. Panelistlerin algılama eşiklerinin %50'si olduğunda yanıtlarına göre cevapları bilgisayar yazılımı aracılığıyla hesaplanmıştır. Yazılım, koku konsantrasyonunu panelistlerin koku eşiklerinin geometrik ortalaması olan ve KB/m^3 cinsinden ifade edilmektedir.



Şekil 3.1. Koku analizi TO8 olfaktometre cihazı (Jońca, 2021)

Numuneler 10 litrelik hacimde ODOURNET/Nalophan ve PET torbalarda alınmıştır. Her rnekleme noktası için üç örnek toplanmıştır. Nalophan torbalar vakumlu bir numune alma cihazının içine yerleştirilmiş ve bacalardan çıkan hava ile doldurulmuştur. Çizelge 3.5'te koku analizi sırasında kullanılan cihazlar listelenmiştir. Örnekleme işlemi “gecikmeli olfaktometre için örnekleme” yöntemi ile alınmıştır. Örnekler tesislerin bacalarından alınarak uygun koşullarda laboratuvara taşınmıştır. Örnekler numune alındıktan sonra 30 saati geçmeyecek şekilde llmştr.



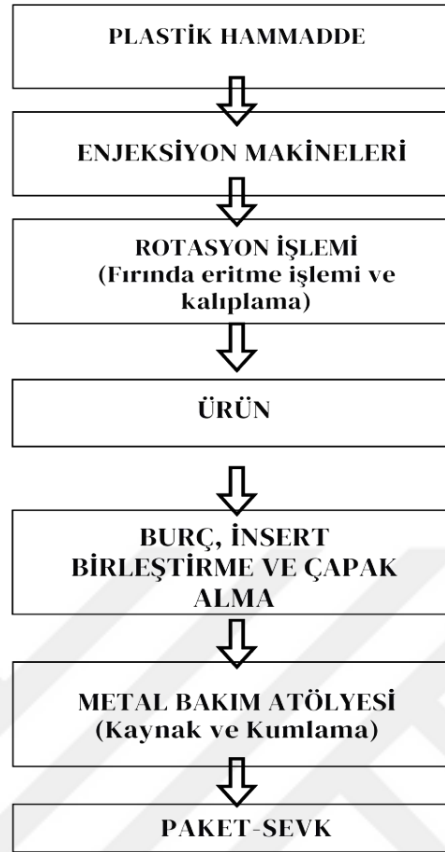
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Otomotiv Yan Sanayi Plastik Üretim Tesisleri Emisyon Sonuçları

Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri ham madde ve üretim miktarları incelendiğinde (bkz. Çizelge 3.1) en yüksek üretim miktarına sahip tesis 6.644.211 kg üretim miktarı ile O3 tesisidir. O3 tesisini sırasıyla yıllık 4.073.234 ve 4.979.928 kg üretim miktarlarına sahip O1 ve O2 tesisleri takip etmektedir. O4 tesisi diğer otomotiv yan sanayi plastik parça üreten tesislere kıyasla oldukça az üretim yapmaktadır. Yıllık 62.475 kg ve 50.394 m²'lik üretim miktarına sahiptir. Kullandığı ham madde miktarı da ürettiği ürün miktarıyla doğru orantılı olarak diğer tesislere göre daha azdır.

Otomotiv yan sanayi plastik parça üreten tesislerin proses açıklamaları O1, O2, O3 ve O4 tesisleri için sırasıyla aşağıda verilmektedir.

Şekil 4.1'de otomotiv yan sanayi plastik parça üreten O1 tesisinin akış diyagramı verilmektedir. O1 tesisinde, polietilen ve polipropilen ham madde olarak temin edilmekte ve tozhanne bölümünde sipariş isteğine göre belirli oranlarda karıştırılmaktadır. Bu karışım, rotasyon makinelerinde kalıplara dökülerek yüksek sıcaklıkta istenen kalıbın şeklini almaktadır. Ayrıca, polietilen ve polipropilen, belirli oranlarda hazırlanarak enjeksiyon makinasına yerleştirilmekte ve burada istenen kalıp şeklini alarak ürün elde edilmektedir. Şişirme alanında da kalıplar doğrultusunda ham madde ilavesiyle istenilen parçalar üretilmektedir. Üretim hatası sonucu oluşan ıskarta parçalar, kırma makinası ile küçük parçalara ayrılmakta ve tekrar ham maddeye karıştırılarak geri kazanılmaktadır. Metal bakım ünitesinde kalıpların bakımları gerçekleştirilmektedir. Kumlama bölümünde ise rotasyon işlemi sonrası ham maddenin kalıplara daha iyi yayılabilmesi için kuru kumlama ile temizleme işlemi yapılmaktadır.



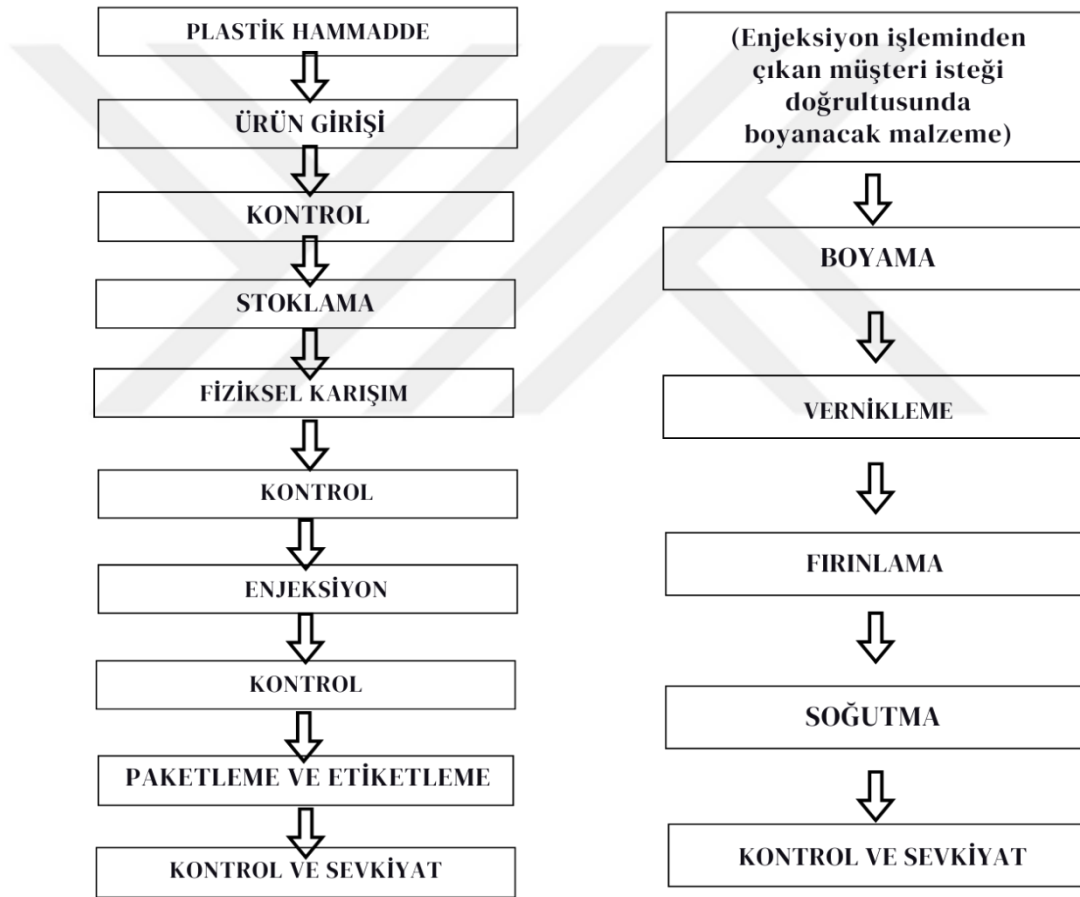
Şekil 4.1. O1 otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisi akış diyagramı

Şekil 4.2’de otomotiv yan sanayi plastik parça üreten O2 tesisinin akış diyagramı verilmektedir. O2 tesisinde otomotiv plastik parça üretimi üç ana bölümden oluşmaktadır: plastik enjeksiyon, kalıp hazırlama ve boyahane.

Plastik enjeksiyon aşamasında ABS, PA, polipropilen, polietilen ve polioksimetil gibi plastik malzemeler ham madde olarak kullanılmaktadır. Kalite kontrolleri yapılan parçalar enjeksiyon makinelerine alınmaktadır. Kalite açısından uygunsuz parçalar, plastik kırma makinasında küçültülerek yeniden kullanılmaktadır.

Kalıp hazırlama bölümünde, çelik malzemeler torna ve CNC frezelerde işlenerek kalıplar üretilmektedir. Enjeksiyon işleminden sonra, müşteri talebine göre boyama yapılmayacak ürünler ayrılarak sevkiyata hazırlanmaktadır. Boyama işlemi yapılacak ürünler boyahaneye yönlendirilmektedir.

Boyahanede yaş boya, solvent bazlı astar ve vernik kullanılmaktadır. Parça yüzeylerinin özelliklerinin iyileştirilmesi ve yüzey gerilimlerinin ayarlanması için flamaj işlemi yapılmaktadır İyonize hava ile yük boşaltılarak yüzeydeki elektrostatik yükler ortadan kaldırılır ya da azaltılır. Bu işlem ile parçaların tozlanması azaltılarak, boyanın yüzeye daha düzgün ve homojen kaplanması sağlanmaktadır. Daha sonra parçalar robotik sistemlerle boyanmaktadır. Boyanan parçalar, 80°C’de 30 dakika fırınlanmakta ve soğutma kabininde 23-25°C’ye soğutulmaktadır. Son olarak, kalite kontrolleri yapılarak ambalajlanmakta ve depoya sevk edilmektedir.

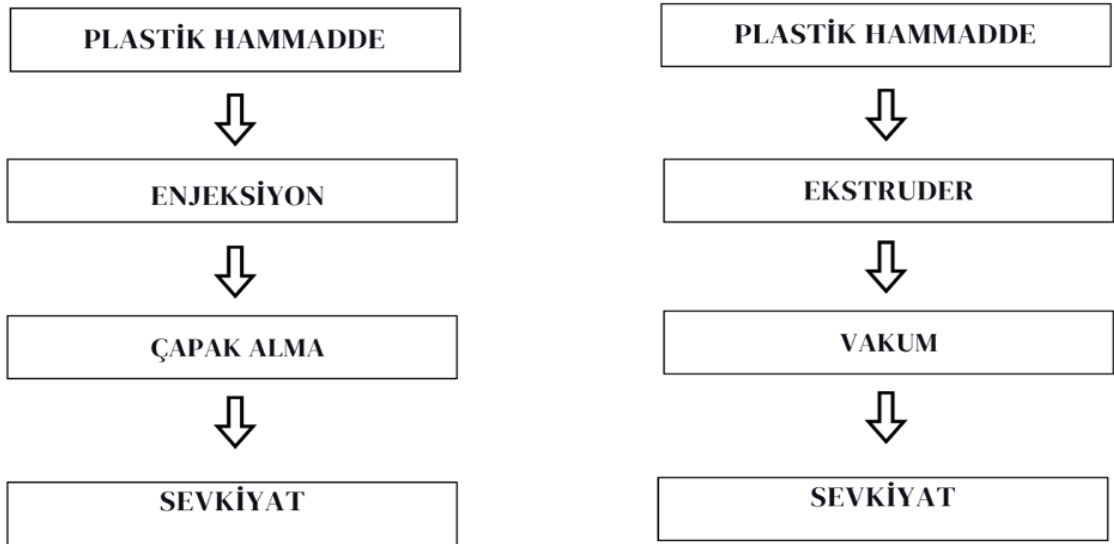


Şekil 4.2. O2 otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisi akış diyagramı

Şekil 4.3’te otomotiv yan sanayi plastik parça üreten O3 tesisinin akış diyagramı verilmektedir. O3 tesisinde antişok levha, PP, POM, TPE, ABS, PS, PE ham madde olarak alınmaktadır. Bu ham maddeler genellikle granül, toz veya pelet formunda bulunur

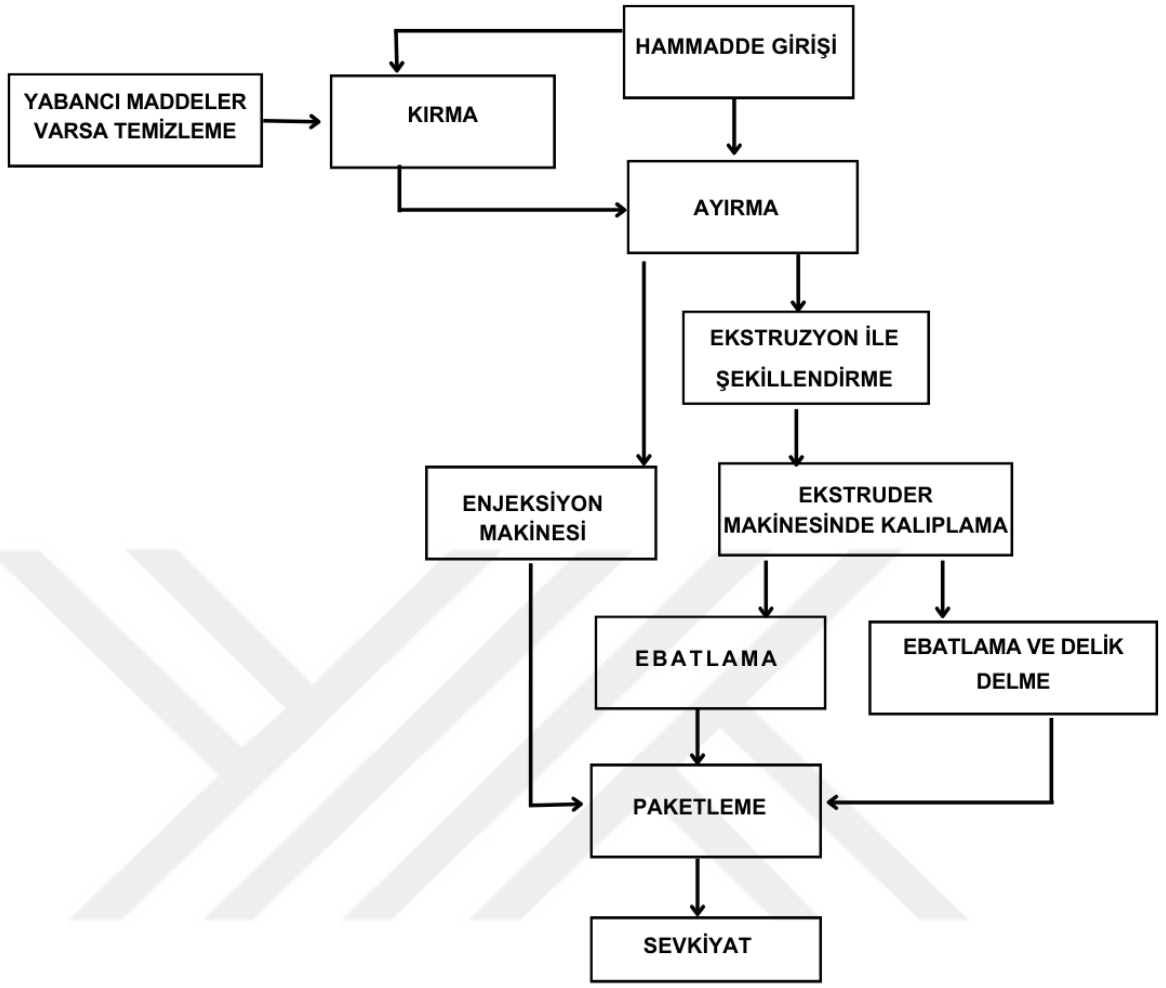
ve büyük çuvallarda veya torbalarda fabrikaya getirilmektedir. Depolama alanında uygun koşullarda saklanmaktadır. Ham madde, üretim sürecinde kullanılmak üzere belirli miktarlarda besleme sistemine aktarılmaktadır.

Ürün üretimi O3 tesisinde iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk olarak plastik malzemelere ısı işlem uygulanarak şekil verme işlemi yapılmaktadır. Enjeksiyon makinesine verilen plastik malzemeden düz plaka şeklinde levhalar üretilmektedir. Enjeksiyon kalıplama sonrasında, üretilen parça üzerinde oluşan ince plastik fazlalıklar (çapaklar) temizlenmektedir. Çapak alma işleminden geçirilen parçalar, kalite kontrol aşamasında titizlikle incelenerek paketlenmekte ve müşteri taleplerine uygun bir şekilde sevkiyatı gerçekleştirilmektedir. İkinci aşamada ise, ham maddeler ekstrüder makinesine beslenmekte ve ısı ile eritilerek soğutulmaktadırlar. Buradan çıkan malzemeler vakum makinesinde ısıtılarak esnek hale getirilir ve vakum yardımıyla kalıba çekilerek şekillendirilmektedir. Vakum şekillendirme ile üretilen parçalar, kalite kontrol aşamasında incelenmekte ve uygun bulunanlar paketlenmektedir. Son olarak ürünlerin, müşteri taleplerine göre sevkiyatı gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.3. O3 otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisi akış diyagramı

Şekil 4.4'te otomotiv yan sanayi plastik parça üreten O4 tesisinin akış diyagramı verilmektedir. O4 tesisinin üretiminde yalnızca PVC hurdası ve plastik granül ham madde olarak prosese girmektedir. Plastik granüller, çeşitli polimerlerden yapılmış küçük, sert parçacıklardır. PVC hurdası ise, daha önce kullanılmış veya üretim sırasında ortaya çıkmış PVC malzemelerin yeniden işlenmesiyle elde edilmektedir. Ham madde, üretim hattına uygun dozajlama ekipmanlarıyla beslenmektedir. Gelen plastik ham maddeleri boyut olarak uygun değilse kırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Aynı zamanda temiz değilse, temizleme işlemine tabi tutulmaktadırlar. Ayırma işlemi sonrasında bazı plastikler enjeksiyon kalıplama aşamasına geçmektedir. Buradan paketleme ve sevkiyat adımlarıyla ürünler çıkmaktadır. Ürünün çeşidine göre bazı plastik ham maddeler ekstrüder makinesine beslenmekte ve ısı ile eriyik haline getirilmektedir. Eriyik malzeme, sürekli bir basınç altında kalıptan geçirilmekte ve istenilen profilde bir şekil almaktadır. Ekstrüzyondan geçen eriyik malzeme, kalıba yönlendirilmekte ve burada nihai şekli almaktadır. Şekillenen parçalar soğutulmakta, ardından kalıptan çıkarılarak kesim ve düzeltme işlemleri yapılmaktadır. Bu süreçlerde fazla plastikler temizlenmekte ve parçalar gerekli boyut ve şekle getirilmektedir. Tesiste üretilen PVC ürünler paketlenerek sevkiyat aşamasına geçerek müşterilere gönderilmektedir.



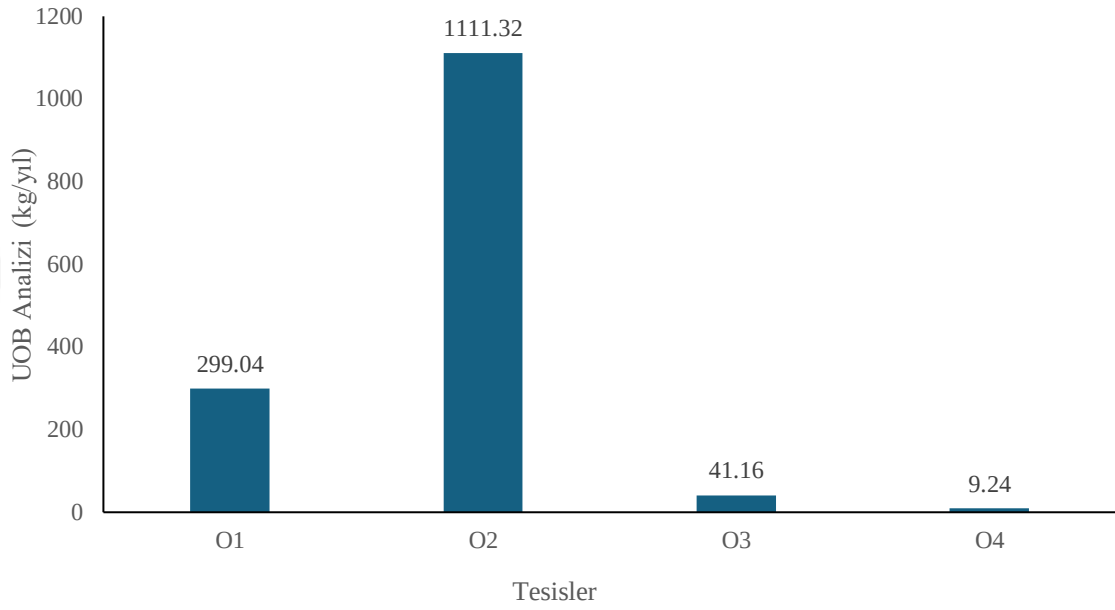
Şekil 4.4. O4 otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisi akış diyagramı

4.1.1. UOB sonuçlarının değerlendirilmesi

Başlık 4.1’de sıralanan şekillerde (Şekil 4.1-4.4) otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesislerinin proses açıklamaları ve akış diyagramları verilmektedir. Tüm tesislerde ortak olarak ısı gücü ile gerçekleştirilen ekstrüzyon işlemi yapılmaktadır. Tesislerde genel olarak ayırma, karıştırma ve temizleme gibi işlemler de ortak olarak uygulanmaktadır.

O1 ve O2 tesislerinde diğer tesislerden farklı olarak boya ve yardımcı malzemeler kullanılmaktadır. En fazla boya ve yardımcı malzemelerin kullanıldığı tesis O2 tesisidir. O2 tesisinin proses akış diyagramında diğer tesislerden farklı olarak boyahane bölümü bulunmaktadır.

Boyahane bölümünde boyama, vernikleme, fırınlama ve soğutma gibi işlemler gerçekleştirilmektedir. O1, O2 ve O3 tesislerinde kullanılan farklı türlerde plastik ham madde olarak kullanılmaktadır. O4 tesisinde ise yalnızca PVC hurdası ve plastik granül ham maddeleri işlenmektedir.



Şekil 4.5. Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri UOB analiz sonuçları

Şekil 4.5'te dört farklı otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisinin (O1, O2, O3 ve O4) bacalarından çıkan UOB emisyonları kg/yıl cinsinden gösterilmektedir. O1 tesisinin yıllık UOB emisyonu 299,04 kg olarak belirlenirken, O2 tesisinin UOB emisyonu 1111,32 kg/yıl olarak ölçülmüş ve oldukça yüksek çıkmıştır. O3 tesisinin emisyon miktarı 41,16 kg/yıl'dır. O4 tesisinin emisyonu 9,24 kg/yıl olarak diğer tesislerden oldukça düşük çıkmıştır.

En yüksek UOB emisyon sonucu kg/yıl olarak O2 tesisine aittir. O2 tesisi diğer tesislerden farklı olarak boyahane bölümüne sahiptir. Boyahane bölümünde kullanılan yaş boya, solvent bazlı astar ve vernik gibi malzemelerin kullanımı doğrudan UOB çıkışında artışa sebep olabileceği düşünülmektedir.

Ham polimerler, ticari ürünlere dönüştürülmek üzere işlenirken basınca ve sıcaklığa maruz kalmakta ve bu süreçte sistem içinde belirli bir süre tutulmaktadır. Ham maddelerdeki bileşenler, yüksek sıcaklık ve basınca maruz kaldıklarında tepkimeye girebilir veya bozunarak kimyasal maddeler ya da bileşikler açığa çıkarabilmektedir.

Çizelge 4.1. O2 otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisi UOB emisyonu türleri

UOB Türü	UOB Emisyonu (kg/saat)
1.Sınıf	0,048
1,1,2-Trikloroetan, 1,1,2,2-Tetrakloroetan, 1,1-Dikloroeten, 1,2-Diklorobenzen, Bromoform	
2.Sınıf	0,073
1,1,1-Trikloroetan, 1,2-Dikloropropan, Bromodiklorometan, Tetrakloroeten, Etilbenzen, İzopropilbenzen, Trikloroeten, 1,4-Diklorobenzen, Toluen, Klorobenzen, 1,2,3-Trikloropropan	
3.Sınıf	0,004
Diklorometan, benzen	

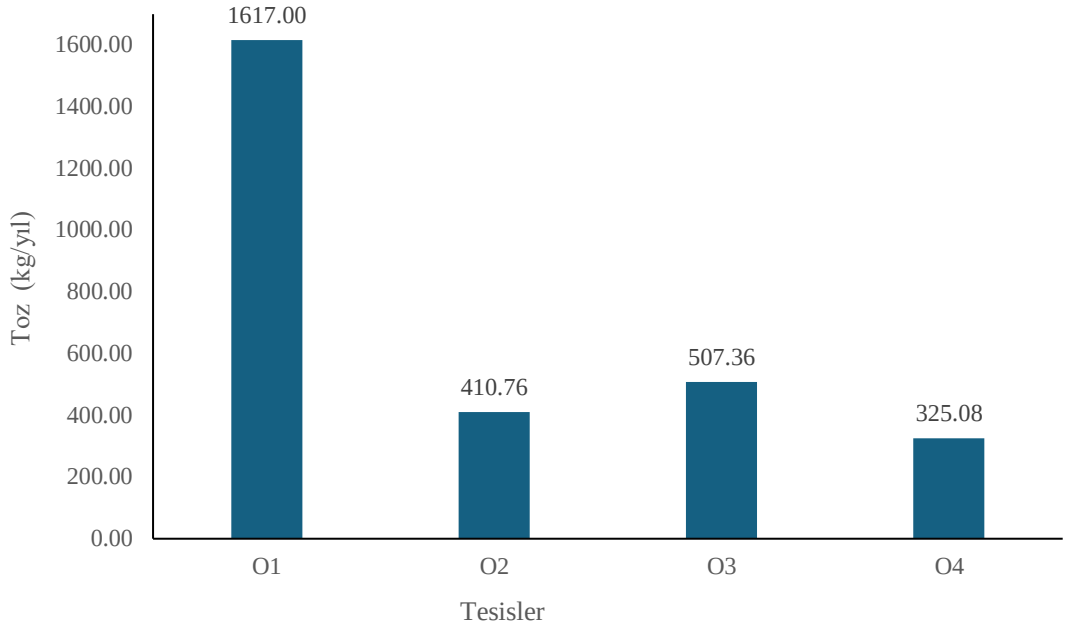
Cheng vd. (2017), derlediği çalışmada UOB emisyonlarının etkisinin otomotiv kaplamaları, yapıştırıcılar, plastik ve kauçuk parçaların kullanımından dolayı artacağını belirtmiştir. Kaplamalar, üretimde kullanılan fazla miktarda organik solventler nedeniyle taşıma ve kullanım sırasında kötü kokuya ve çok miktarda UOB oluşumuna neden olmaktadır. Boya endüstrisinin atmosferik UOB'lerin önemli bir endüstriyel kaynağı olduğu belirtilmiştir. Kaplama prosesinin ana bileşenleri olan PVC reçinesi, DOP (dioktilftalat) plastikleştiricisi ve organik solventlerin, otomotiv UOB emisyonları üzerinde büyük etkisi olduğu yapılan çalışmayla belirlenmiştir.

Boya esas olarak film oluşturu maddeler, pigmentler, organik çözücüler ve katkı maddelerinden oluşmaktadır (Cheng vd., 2017). Boya işlemindeki bu organik bileşikler, benzen, metanol, klorlu etilen, hidrojen klorür ve fenoller ve diğer toksik maddeleri serbest bırakabilmektedir. Dolayısıyla boya üretim sürecindeki kirliliğin ana kaynağı solventler olduğu düşünülmektedir. Cheng vd. (2017) derlediği çalışmada, otomotiv kaplama prosesinde benzen, toluen, etilbenzen, ksilen, etil asetat, bütil asetat, metil izobütil keton, propilen glikol metil eter asetat ve diol bütil eter vb. dahil olmak üzere

toplam on beş ana UOB türü tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında analiz edilen sonuçlara göre, O2 tesisinin boya bacalarında da benzen, toluen, etilbenzen gibi ortak UOB'ler tespit edilmiştir. Aynı zamanda çok sayıda klorlu bileşikler bacalardan emisyon olarak çıkmıştır (Çizelge 4.1).

Cheng vd. (2017) derlediği çalışmada otomotiv plastik parçalarında en yaygın olarak kullanılan polipropilendir. Ancak üretim ve proses kullanımında PP malzemeleri kaçınılmaz olarak bazı monomer, oligomerler ve diğer kirletici maddeleri ürettiği belirtilmiştir. UOB emisyonu olarak toplam 28 bileşen tespit edilmiştir. Bunlar alkanlar, aldoksonlar, alkoksitler ve olefinlerdir. Bu tez çalışmasında da O2 tesisinin boya bacalarından çıkan UOB emisyonlarının %65'i bu gruplarda yer almaktadır (Çizelge 4.1).

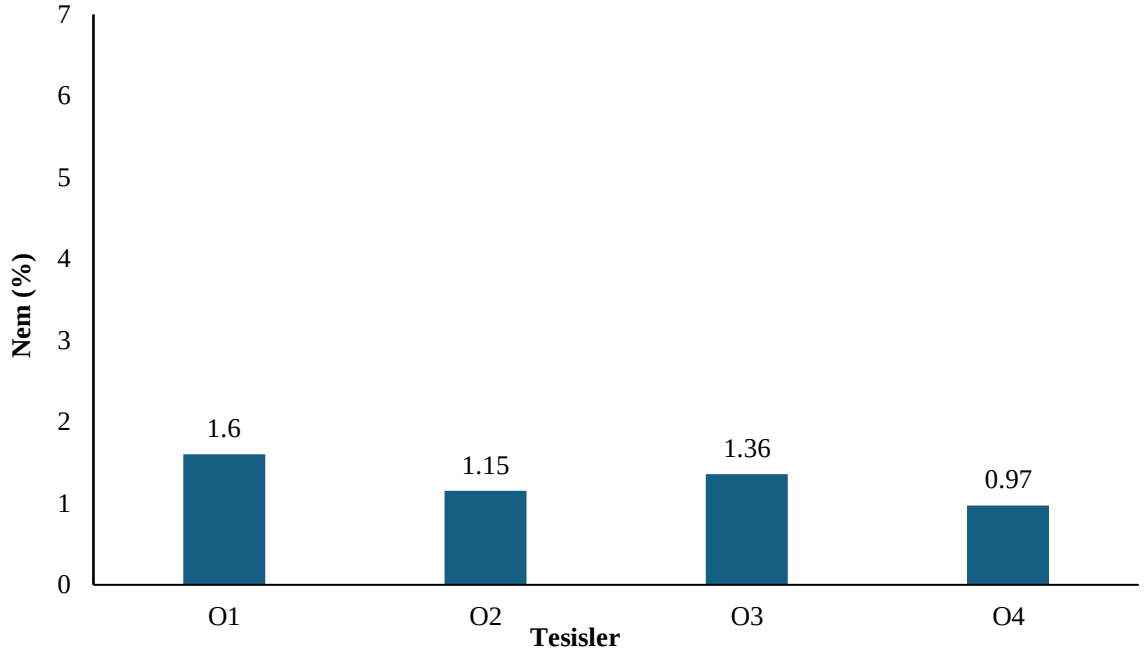
Dört farklı otomotiv yan sanayi tesisi verileri, 3 Temmuz 2009 tarih ve 27277 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren "Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY)" sınır değerleri aşıp aşmadığı konusunda tesislerin çevresel etkilerini değerlendirmek için önemli bir kaynak sağlamaktadır (SKHKKY, 2009). Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği Ek-2'ye göre tesisin bacalarından alınan örneklerin toplam UOB sınır değeri 30 kg/saat'tir. Bu da yıllık 252.000 kg UOB emisyonuna karşılık gelmektedir. Dört tesisin tamamı bu yönetmeliğe göre UOB emisyon sınır değerlerinin çok altında kalmaktadır.



Şekil 4.6. Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri toz emisyon analiz sonuçları

Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesislerinden kaynaklanan yıllık toz emisyonları Şekil 4.6’da verilmektedir. O1, O2, O3 ve O4 tesis bacalarından sırasıyla yıllık 1617,00 kg, 410,76 kg, 507,36 kg ve 325,08 kg toz emisyonu çıkmaktadır.

3 Temmuz 2009 tarih ve 27277 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren “Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği” Ek-2’ye göre tesisin bacalarından alınan örneklerin toplam toz emisyon miktarı sınır değeri 10 kg/saat’tir. Dört otomotiv yan sanayi plastik parça üreten tesisin toz emisyon miktarları incelendiğinde, bu yönetmeliğe göre toz emisyon miktarı sınır değerin çok altında kalmaktadır.



Şekil 4.7. Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri nem analiz sonuçları

Şekil 4.7’de dört farklı otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisinin (O1, O2, O3 ve O4) baca nem sonuçları yüzdesel olarak verilmektedir. Otomotiv yan sanayi plastik parça üreten tesislerin bacalarından alınan bağıl nem ve UOB emisyon sonuçları incelendiğinde, O1 tesisinin nem oranı %1,6 ve UOB emisyon sonucu 299,04 kg/yıl olarak belirlenmiştir. Bu orta seviyede nem ve UOB değerleri, O1 tesisindeki proseslerin makul bir seviyede su buharı ve UOB emisyonu ürettiğini göstermektedir.

O2 tesisinde ise nem oranı %1,15 ile düşük bir seviyedeysen, UOB emisyon sonucu 1111,32 kg/yıl ile oldukça yüksektir. Bu durum, O2 tesisinin proseslerinden yüksek miktarda uçucu organik bileşikler salındığını ve bu bileşiklerin oluşumunun nem oranından bağımsız olabileceğini düşündürmektedir.

O3 tesisinde nem oranı %1,36 ve UOB değeri 41,16 kg/yıl olarak ölçülmüştür. O3 tesisinin düşük nem oranına rağmen orta seviyede UOB emisyonu salması, bu tesisin proseslerinin de belirli bir miktarda uçucu organik bileşik ürettiğini ifade eder.

Son olarak, O4 tesisinde en düşük nem oranı %0,97 iken, UOB emisyonu da 9,24 kg/yıl ile en düşük seviyededir. O4 tesisi, düşük nem oranı ve düşük UOB emisyonu ile dikkat çekmektedir. Genel olarak, nem oranı ile UOB emisyonları arasında belirgin bir ilişki bulunmamakla birlikte, yüksek UOB emisyonlarının düşük nem oranlarıyla da görülebileceği anlaşılmaktadır.

Wang vd. (2011), atık su arıtma tesisinin çöktürme kurutma binası ortam havasından toplanan örnekler üzerinde yaptığı çalışmada kaynak emisyonları ile nem arasında bir bağlantı çıkmamıştır. Nem ve sıcaklığın UOB emisyonu oluşumunda etkisinin olabileceği ancak plastik ham madde türünün sonuçlara etkisinden dolayı değişiklik gösterebileceğini tespit edilmiştir.

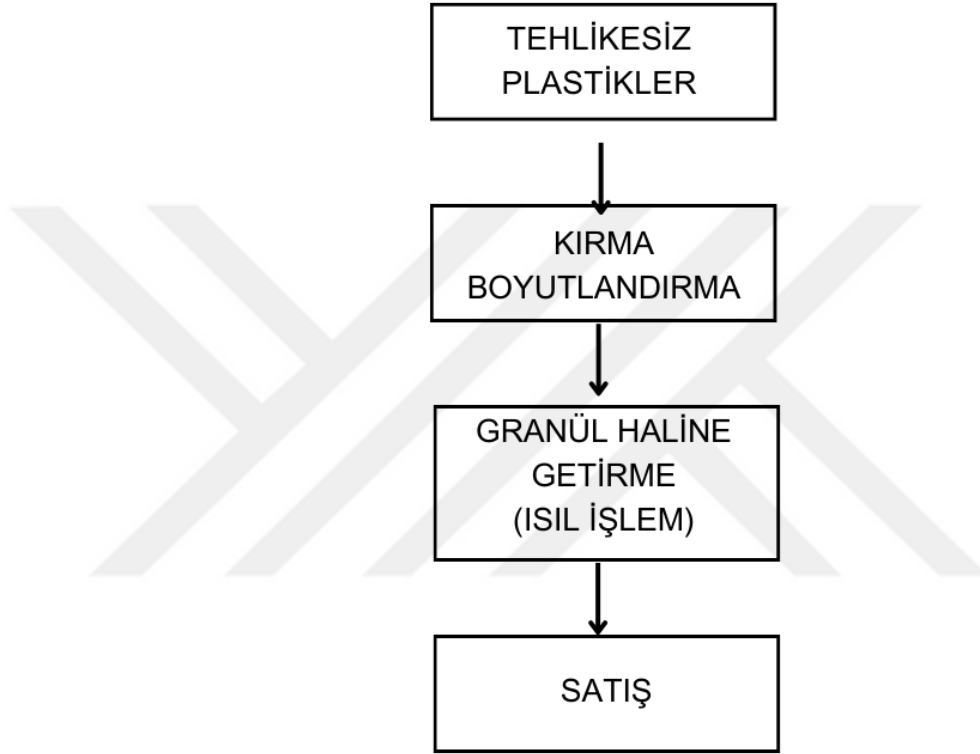
4.2. Plastik Geri Dönüşüm Tesisleri Emisyon Sonuçları

Plastik geri dönüşüm tesisleri ham madde ve üretim miktarları (bkz. Çizelge 3.1) incelendiğinde, G1 tesisinin tehlikesiz ve inert ambalaj atıklarını geri dönüştürdüğü görülmektedir. Bu tesis, yıllık 27.675.000 kg ürün elde etmektedir. G2 tesisinde ise PP ve PVC geri dönüşümü yapılmaktadır. Yardımcı malzeme olarak boya ve kalsit de kullanılmaktadır. Toplamda 3.910.200 kg ürün elde edilmektedir. G3 tesisinde, tehlikesiz plastik atıklardan elde edilen ürün miktarı 3.135.000 kg'dır. G4 tesisinde ise PP ve PE geri dönüştürülmektedir. Plastiğin işlenebilirliğini arttırmak için hidrate magnezyum silikat ve dolgu malzemesi olarak da kalsit kullanılmaktadır. Bu tesiste toplamda yıllık 10.754.100 kg ürün elde edilmektedir.

Üretim miktarlarına göre sıralama yapıldığında, G1 tesisinin 27.675.000 kg ürün miktarıyla en yüksek üretimi gerçekleştirdiği görülmektedir. Diğer tesislerin üretim miktarları sırasıyla 3.910.200, 3.135.000, 10.754.100 kg'dır. G1 tesisinin üretim miktarının diğer tesislerin üretim miktarlarının toplamını geçtiği görülmektedir.

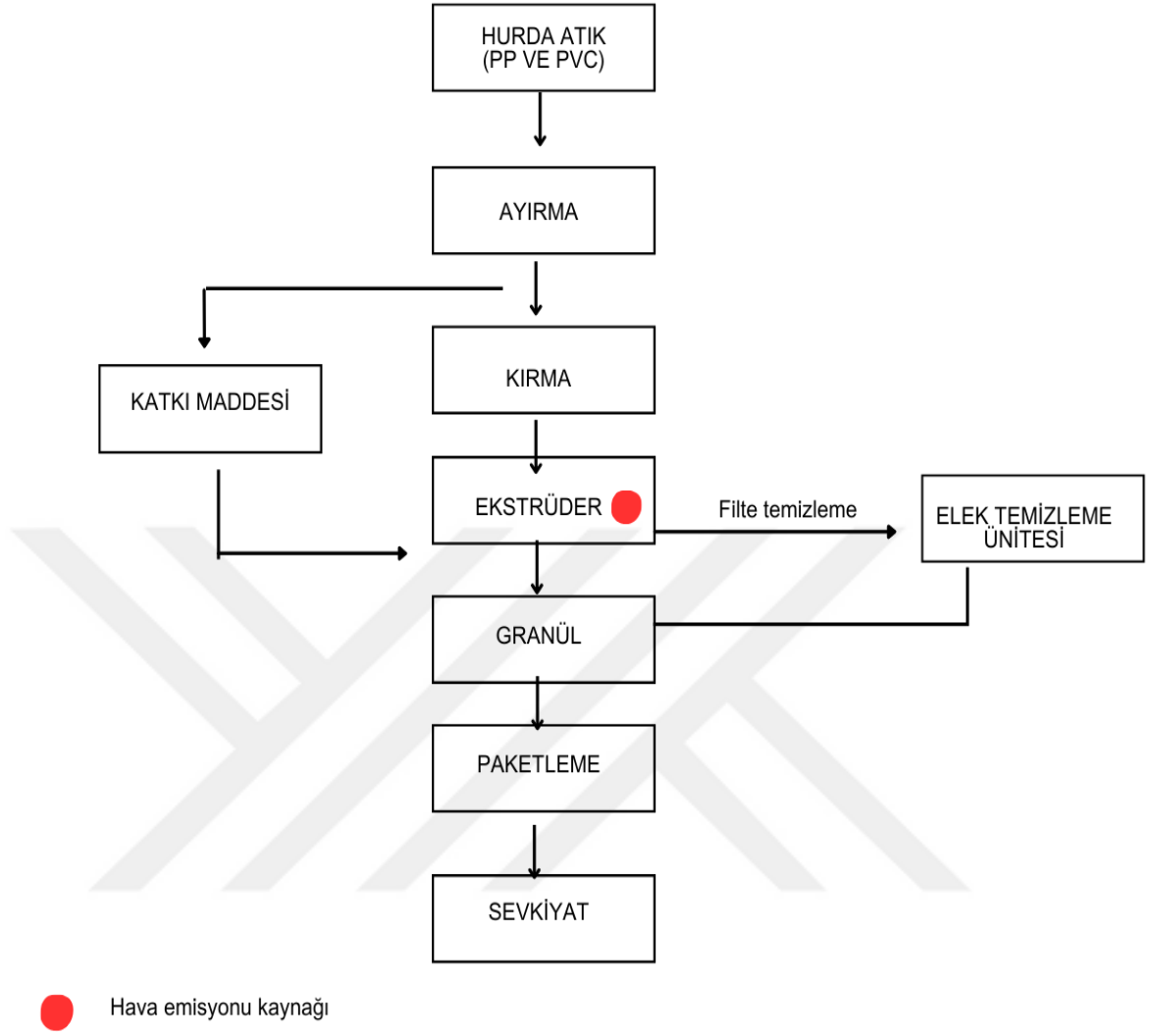
Otomotiv yan sanayi plastik parça üreten tesislerin proses açıklamaları G1, G2, G3 ve G4 tesisleri için aşağıda verilmektedir.

Şekil 4.8’de plastik geri dönüşüm tesislerden G1 tesisine ait akış diyagramı verilmektedir. Tesise gelen tehlikesiz ve inert plastik ambalaj atıkları ham madde olarak gelmektedir. Plastik ham maddeler ilk olarak cinslerine göre ayrılmaktadır. Kırma işlemine tabi tutularak çapak formu elde edilmektedir. Kırılan plastikler ekstrüzyon işlemi ile granül haline getirilerek ham madde olarak satılmaktadır.



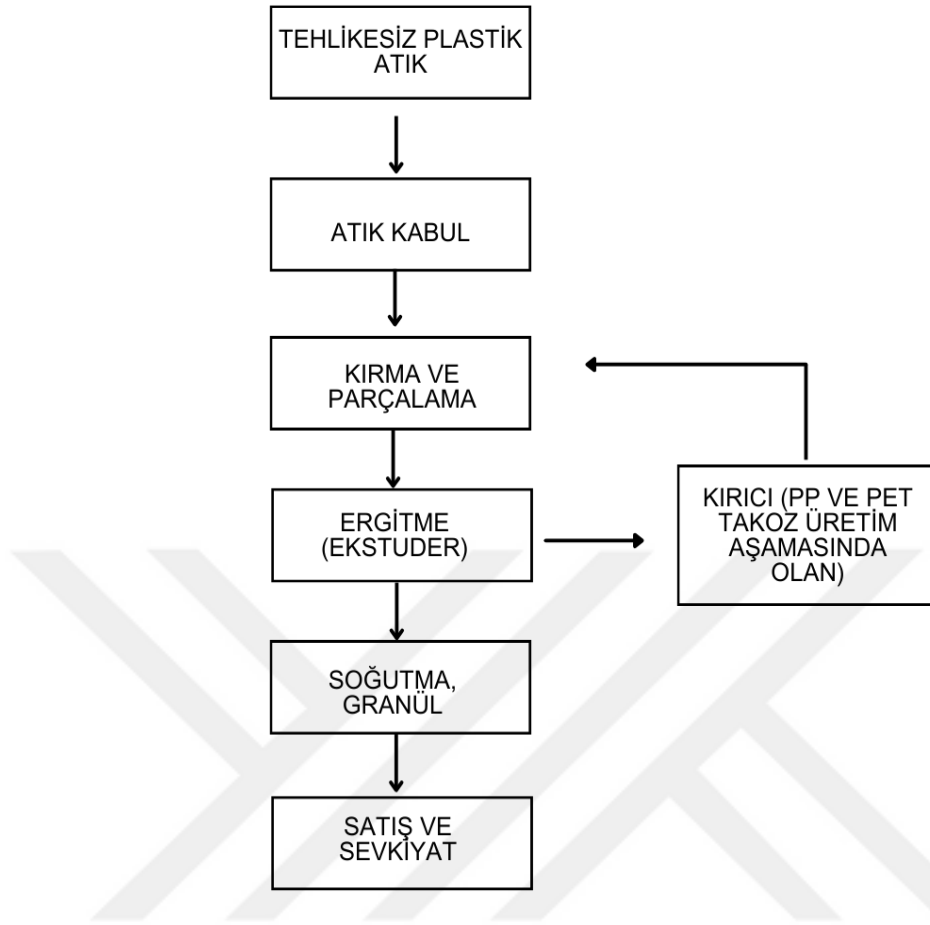
Şekil 4.8. G1 plastik geri dönüşüm tesisi akış diyagramı

Şekil 4.9’da plastik geri dönüşüm tesislerden G2 tesisine ait akış diyagramı verilmektedir. Tesise gelen PP ve PVC formundaki hurda plastikler geri dönüştürülmektedir. Plastik ham maddeler ilk olarak manuel olarak ayrılmaktadır. Çeşitlerine göre ayrıldıktan sonra plastikler kırma makinesinde 5-8 mm çapına kadar küçültülmektedir. Kırma işleminden sonra plastiklerin bir kısmı ürün olarak çıkarken bir kısmı ekstrüzyon işlemi ile granül haline getirilmektedir. Granül olarak elde edilen plastikler paketlenerek sevkiyata gönderilmektedir. Ekstrüder makinesinde elek temizleme ünitesi bulunmaktadır. Tel elekler plastiklerin bir kısmının tutup tekrar döngüye girmesini sağlamaktadır.



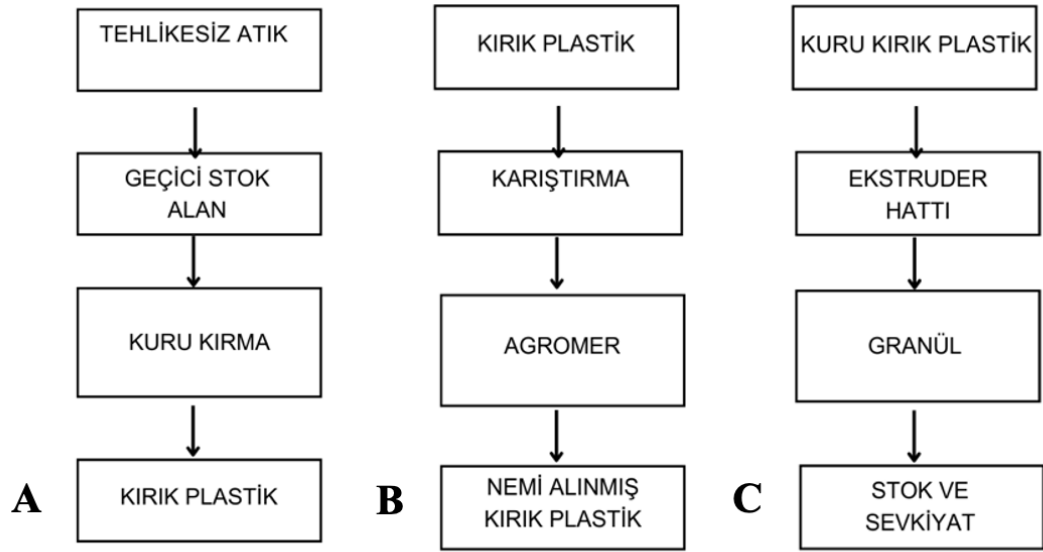
Şekil 4.9. G2 plastik geri dönüşüm tesisi akış diyagramı

Şekil 4.10’da plastik geri dönüşüm tesislerden G3 tesisine ait akış diyagramı verilmektedir. Tesise dışarıdan ham madde olarak tehlikesiz plastik atık gelmektedir. Gelen atık plastikler öncelikle depolama alanına alınmakta ve kontrol edilmektedir. Atık kabulü tamamlanan plastik atıklar tesiste geçici depolama alanında tutulmaktadır. Plastik atıklar ayırma işlemi ile birbirlerinden ayrılmaktadır. Ayrılan plastikler parçalayıcı makinesinde kırma işlemine tabi tutulmaktadır. Kırılan plastikler ekstrüzyon işlemi ile granül haline getirilmektedir. Burada öncelikle ısıl işlem daha sonrasında da soğutma işlemi ile granül eldesi gerçekleştirilmektedir. Oluşan ürünlerin paketlenerek sevkiyatı gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.10. G3 plastik geri dönüşüm tesisi akış diyagramı

Şekil 4.11’de plastik geri dönüşüm tesislerden G4 tesisine ait akış diyagramı verilmektedir. Tesise ham madde olarak tehlikesiz atık kabulü yapılmakta ve atıklar cinsine göre ayrılmaktadır. Cinsine göre ayrılan plastik atıklar geçici depolama alanında depolanmaktadır. Kırma işlemi ile atıklar istenen boyutlara indirilmektedir. Kırma ünitesinden çıkan plastik atıklar karıştırma-nem alma ünitesine gelmektedir. Bu ünite de kırma ünitesinde istenilen boyutlara getirilen plastikler karıştırılmakta ve agromer ile nemi alınmaktadır. Kırılmış ve nemi alınmış plastik atıklar granül ünitesine alınmaktadır. Bu ünite de tesiste kırılmış ya da kırık olarak gelen tehlikesiz atıklar ekstrüder makinesinde ısı işlemi yaparak granül haline getirilmektedir. Elde edilen ürünler big-bag çuvallarına alınarak sevkiyata hazır hale getirilerek stok alanına alınmaktadır. Müşteri taleplerine göre hazırlanan ürünler sevk edilmektedir.



Şekil 4.11. G4 plastik geri dönüşüm tesisi akış diyagramı **A)** Kırma ünitesi iş akım şeması **B)** Karıştırma – nem alma ünitesi iş akım şeması **C)** Granül ünitesi iş akım şeması

4.2.1. UOB sonuçlarının değerlendirilmesi

Başlık 4.2’de sıralanan şekillerde (Şekil 4.8-4.11) plastik geri dönüşüm tesislerinin proses açıklamaları ve akış diyagramları verilmektedir. Tüm tesislerde ortak olarak ısı gücü ile gerçekleştirilen ekstrüzyon işlemi yapılmakta olup, ayrıca ayırma, kırma ve parçalama gibi işlemler de uygulanmaktadır.



Şekil 4.12. Plastik geri dönüşüm tesisleri UOB analiz sonuçları

Şekil 4.12’de dört farklı plastik geri dönüşüm tesisinin (G1, G2, G3 ve G4) bacalarından çıkan UOB emisyonları kg/yıl cinsinden verilmektedir. G1 tesisinin yıllık UOB emisyonu 57,96 kg, G2 tesisinin UOB emisyonu 139,19 kg, G3 tesisinin emisyonu 57,12 kg çıkmıştır. G4 tesisinin emisyonu ise 1034,88 kg ile oldukça yüksek çıkmıştır. G4 tesisi diğer tesis bacalarına göre fazla miktarda UOB emisyonu salmaktadır.

UOB emisyon sonuçları 3 Temmuz 2009 tarih ve 27277 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren “Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY)” Ek-2’de belirtilen emisyon sınır değerlerine göre değerlendirilmektedir. G4 tesisi de dahil tesislerin tümünde bacaların toplam UOB emisyon miktarı Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği Ek-2’ye göre belirlenen 30 kg/saat sınır değerinin altında kalmaktadır.

Plastik atık geri dönüşüm tesislerindeki ısıtma işlemi kullanılan ergitme ve toz haline getirme işlemlerinin, çalışanlar ve çevre için potansiyel sağlık risklerine neden olan zararlı gaz emisyonlarına yol açtığı belirlenmiştir (Cabannes vd., 2020). Plastik mekanik geri dönüşüm prosesinin en büyük parçasını ekstrüzyon işlemi oluşturmaktadır. Oluşabilecek

UOB emisyonunun en büyük nedeninin bu proseste uygulanan ısı işlem olduğu düşünülmektedir (Tsai vd., 2009).

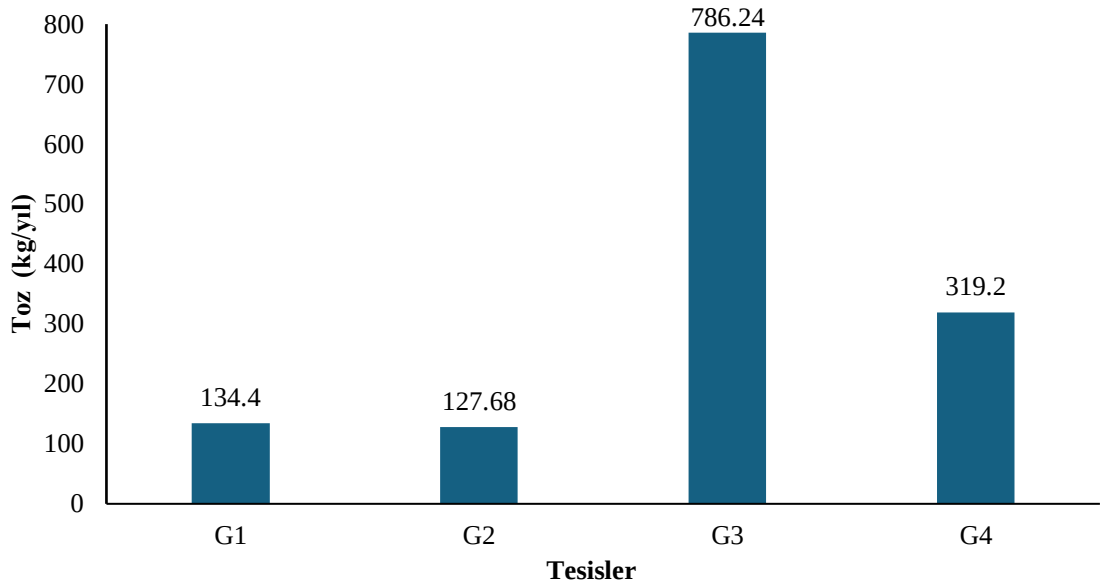
Cabanes vd. (2020), yeni polimerik malzemelerden yayılan maddelerin çoğunlukla hidrokarbonlardan oluştuğunu, geri dönüştürülmüş plastiklerin ise ayrıca çok sayıda aldehit, ester ve karboksilik asit içerdiğini belirlemiştir. Geri dönüştürülmüş plastiklerdeki istenmeyen UOB emisyonlarının tamamen ortadan kaldırılmasını sağlamak amacıyla geleneksel mekanik geri dönüşümü iyileştirmeye yönelik yeni teknolojileri araştırmanın ve geliştirmenin önemi vurgulanmıştır.

Tsai vd. (2009), derlediği çalışmalarda PVC, PE ve PP plastiklerin 150-300°C arasındaki eritme işlemleri sırasında ortaya çıkan emisyonlara odaklanmıştır. Emisyonların büyük çoğunluğunun ekstrüzyon ve enjeksiyon işlemlerinden dolayı ortaya çıktığı belirtilmiştir. UOB emisyonlarının, polimer bozunması ve katkı maddelerinden kaynaklanarak işletme sıcaklığında yayılabileceğini ve yayılan UOB'lerin tür ve miktarlarının kullanılan malzemeye ve işletme parametrelerine bağlı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, plastik atıkların benzer işleme sıcaklıklarında eritilmesi sonucu ortaya çıkan UOB emisyonları, işlenmemiş polimerlerden kaynaklanana göre daha fazla ve karmaşık olabileceği belirtilmektedir. Bu durum, zamanla bozunma, uzun süreli termal maruziyet, kirleticilerin varlığı ve ayrılmamış plastikler ile polimer bileşenleri arasındaki etkileşimlerden kaynaklanacağı sonucuna varılmıştır.

PE veya PP plastik atıkların erime sıcaklığı 250°C civarında olduğu iç mekân numunelerinde yüksek miktarda hidrokarbon ve oksidatif bileşiklerin ölçülebildiği görülmüştür. Dikkat çekici bir şekilde, PE/PP ve PVC üretim hatlarından üretilen oksidatif bileşiklerin oranları toplam UOB emisyon miktarının %50'sinden fazladır ve bunlar hoş olmayan kokulara katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Yüksek miktardaki aromatik hidrokarbonlar ve oksidatif bileşikler, yalnızca polimer bozunmasından ve katkı maddelerinden değil aynı zamanda baskı mürekkebi gibi uçucu kirletici maddelerden de kaynaklanıyor olabilmektedir (Tsai vd., 2009). Bu tez çalışmasında, G4 tesisinin bacalarında da hidrokarbonlar tespit edilmiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. G4 plastik geri dönüşüm tesisi UOB emisyonu türleri

UOB Adı
1.Sınıf 2-klortoluen
2.Sınıf 1,2-dikloreten, 1,1,1-trikloreten, toluen, 1,2-dibromoeten, tetrakloretilen, klorobenzen, etilbenzen, m-p-ksilen, stiren, o-ksilen izopropilbenzen, n-propilbenzen
3.Sınıf Benzen

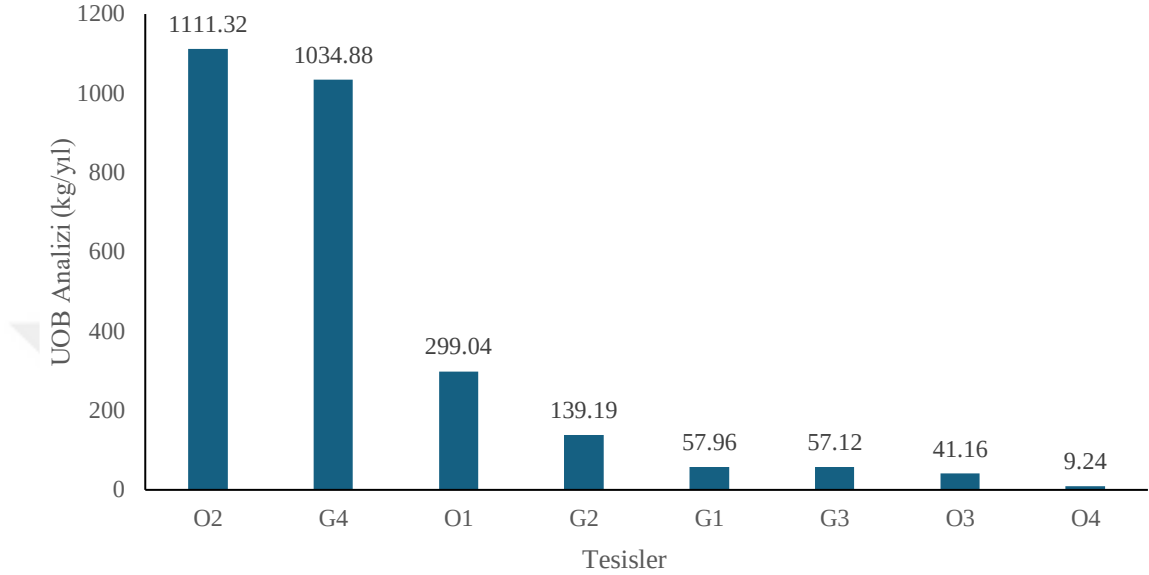


Şekil 4.13. Plastik geri dönüşüm tesisleri toz emisyon analiz sonuçları

Şekil 4.13'te plastik geri dönüşüm tesislerinin bacalarından çıkan toz emisyon miktarları kg/yıl cinsinden gösterilmektedir. G1 tesisinin emisyonu 134,4 kg/yıl olarak belirlenirken, G2 tesisinin emisyonu 127,68 kg/yıl olarak ölçülmüştür. G3 tesisinin yıllık toz emisyon miktarı 786,24 kg iken, G4 tesisinin toz emisyon miktarı ise 319,2 kg/yıl olarak kaydedilmiştir.

Bu bulgular, plastik geri dönüşüm tesislerinin hava kalitesine olan etkilerini anlamak ve bu etkileri azaltmak için önemli bir veri kaynağı sağlamaktadır. Özellikle G3 tesisi

diğerlerine kıyasla çok daha yüksek toz emisyon miktarına sahiptir. G1, G2 ve G4 tesislerinin toz emisyonları ise daha düşük düzeylerde olup, bu tesislerin çevresel performanslarının iyileştirilmesi için çalışmalar yapılması gerekmektedir.



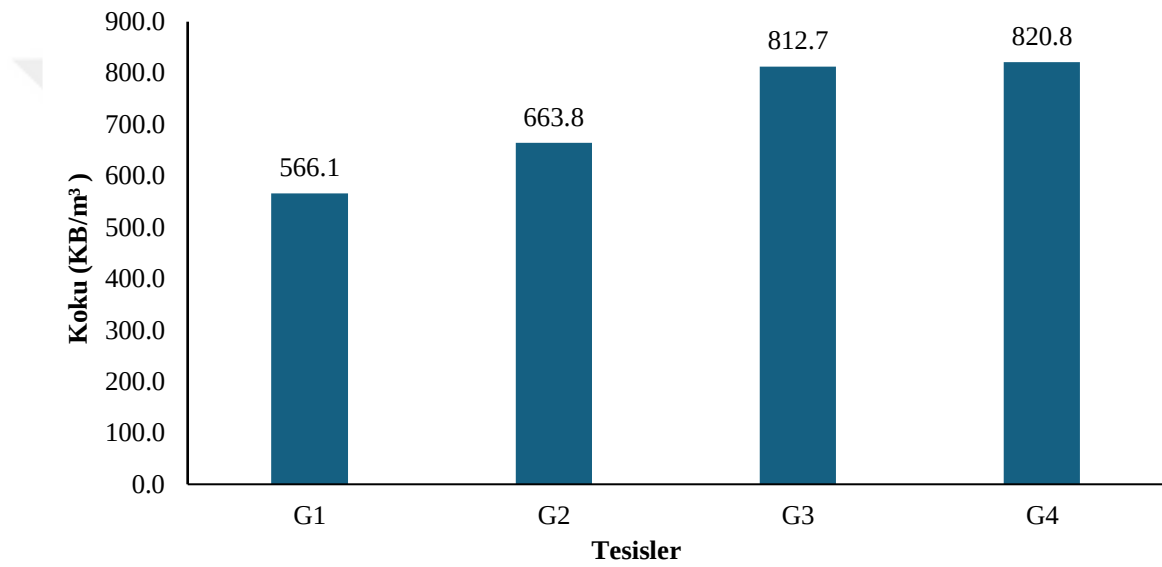
Şekil 4.14. Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim ve plastik geri dönüşüm tesisleri UOB analiz sonuçları

Otomotiv yan sanayi plastik parça üreten tesisler ile plastik geri dönüşüm tesislerinin UOB emisyon sonuçları kg/yıl cinsinden gösterilmektedir (Şekil 4.14). En yüksek UOB emisyonuna sahip dört tesis sırasıyla O2, G4, O1 ve G2 tesisleridir. UOB emisyonu sonuçları sırasıyla 1111,32 kg/yıl, 1034,88 kg/yıl, 299,04 kg/yıl, 139,19 kg/yıl'dır. Bu veriler, otomotiv yan sanayi plastik parça üreten tesisleri ile plastik geri dönüşüm tesislerinin UOB emisyonlarına sahip olduğunu göstermektedir.

G4 tesisinin ise plastik geri dönüşüm tesisleri arasında en yüksek UOB emisyonuna sahip olduğu görülmektedir, bu değer 1034,88 kg/yıl olarak belirlenmiştir. G1 tesisinin emisyonu 57,96 kg/yıl iken, G3 tesisinin emisyon miktarı 57,12 kg/yıl olarak hesaplanmıştır. G2 tesisinin emisyonu ise 139,19 kg/yıl olarak ölçülmüştür. Plastik geri dönüşüm tesislerinin genellikle otomotiv yan sanayi plastik parça üretiminden daha yüksek UOB emisyonlarına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Tüketici sonrası plastik atıkların yeniden işlenmesinin temel dezavantajları, polimerin ileri düzeyde bozunmasının yanı sıra geri dönüştürülmüş malzemedeki kirletici seviyeleridir. Tüketici sonrası plastik atıklarda bulunan kirleticilerin çoğu, Liu vd. (2019) tarafından bildirildiği üzere, tüketici sonrası geri dönüştürülmüş PET'te tespit edilen benzen gibi bazı plastik türlerinin insan sağlığı için özellikle endişe verici olduğu bildirilen UOB'ler de dahil olmak üzere organik bileşiklerle ilgilidir (Cabanés vd., 2020).

4.2.2. Koku sonuçlarının değerlendirilmesi



Şekil 4.15. Plastik geri dönüşüm tesisleri koku emisyonu sonuçları

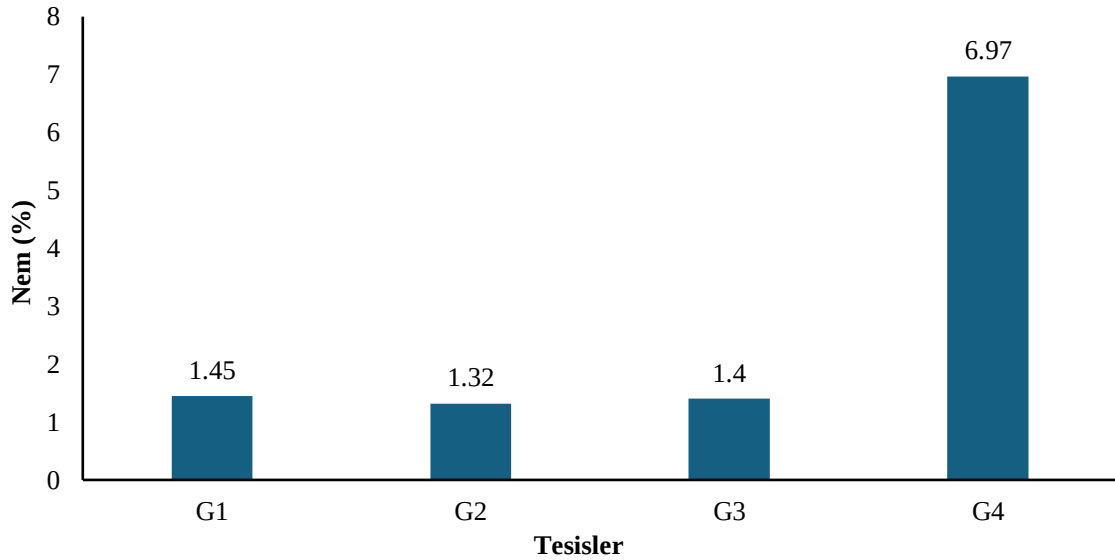
Şekil 4.15'te dört farklı plastik geri dönüşüm tesisinin (G1, G2, G3 ve G4) bacalarından çıkan koku emisyon sonuçları KB/m³ cinsinden gösterilmektedir. G1 tesisinin koku emisyonu sonucu 566,1 KB/m³, G2 tesisinin 663,8 KB/m³, G3 tesisinin 812,7 KB/m³ ve G4 tesisinin 820,8 KB/m³ olarak ölçülmüştür. Plastik geri dönüşüm tesislerinde oluşan koku emisyonları ekstrüzyon işleminde kullanılan ısıtma işlemi ile ilişkilendirilmiştir.

Koku sonuçları 19 Temmuz 2013 tarih ve 28712 sayılı Resmî Gazete' de yayımlanarak yürürlüğe giren "Koku Oluşturan Emisyonların Kontrolü Hakkında Yönetmelik (KOEKHY) Madde 9'da belirtilen koku emisyon sınır değerlerine göre

değerlendirilmektedir (KOEKHY, 2013). Yönetmelik sınır değerleri incelendiğinde, tüm plastik geri dönüşüm tesislerini koku emisyon sonuçları 1.000 KB/m³ sınır değerinin altında kalmıştır. Bu sınır değerinin altında kalınması işletmelere/tesislere kaynakta koku giderimi konusunda herhangi bir işlem uygulanmayacağı anlamına gelmektedir.

Tsai vd. (2009), yaptığı olfaktometrik ölçümler ile polietilen/polipropilen PE/PP ve PVC plastik atıkların işlenmesi için kullanılan eritme işlemlerinin önemli ölçüde kötü koku ürettiğini tespit etmiştir.

Plastik ambalajlar, geri dönüşüm süreci boyunca çıkarılmadıkları takdirde nihai geri dönüşümde istenmeyen kokular oluşturabilecek lavabo, yapıştırıcı ve katkı maddelerinin kalıntıları da içermektedir. Bu nedenle, Suschem tarafından yayınlanan "Döngüsel Ekonomide Plastik Stratejik Araştırma ve İnovasyon Gündemi" raporunda da belirtildiği üzere, reçinelere gömülü kirleticilerin ve özellikle kokuya neden olan maddelerin giderilmesi, geri dönüşüm endüstrisi için temel zorluklardan ikisidir (Suschem, 2019).

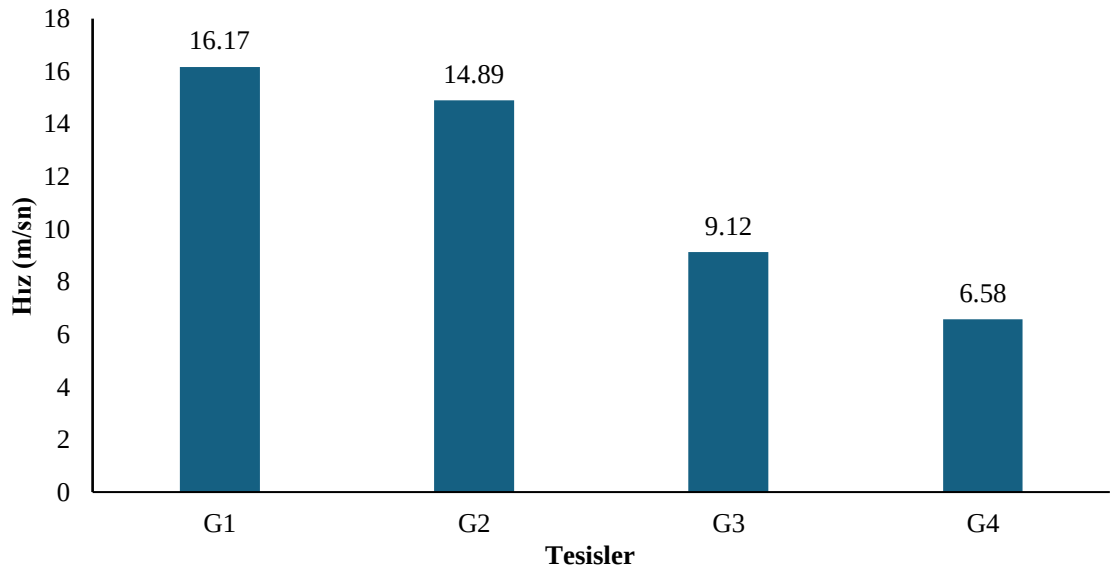


Şekil 4.16. Plastik geri dönüşüm tesisleri nem analiz sonuçları

Şekil 4.16'da dört farklı plastik geri dönüşüm tesisinin (G1, G2, G3 ve G4) baca nem oranları yüzdesel olarak gösterilmektedir. Plastik geri dönüşüm tesislerinin bacalarından

ıkan gazın nemi ve koku emisyon sonuçları incelendiğinde, G1 tesisinde nem oranı %1,45 iken koku emisyonu 566,1 KB/m³ olarak llmştr. Bu tesis, düştük nem oranı ve nispeten düştük koku emisyonu yaymaktadır. G2 tesisinde nem oranı %1,32 iken koku emisyonu 663,8 KB/m³ olarak belirlenmiştir. G3 tesisi ise %1,4 nem oranına ve 812,7 KB/m³ koku emisyonuna sahiptir. Nem oranları arttıkça tesislerin koku emisyon sonuçlarının da arttığı gözlenmiştir. G4 tesisinin en yüksek nem ve koku değerine sahip olduğu grlmektedir. G4 tesisinde nem oranı %6,97, koku değeri ise 820,8 KB/m³ olarak llmştr. Bu yüksek değerler, G4 tesisinde gerçekleştiren proseslerin daha fazla su buharı ve kokulu gaz ürettiğini ve bunun çevresel etkilerini artırabileceğini göstermektedir.

Wang vd. (2011), yaptığı çalışmada sülfür bileşikleri, bağıl nem (RH) ve CO₂ konsantrasyonlarının kokuyla önemli ölçüde ilişkili olduğunu tespit etmiştir. Bağıl nem kaynak emisyonlarını etkilemese de bağıl nemdeki artışı insanların koku algısını artırabileceği tespit edilmiştir.



şekil 4.17. Plastik geri dönüşüm tesisleri hız analiz sonuçları

şekil 4.17’de plastik geri dönüşüm tesislerinin (G1, G2, G3 ve G4) baca gazı hızları gösterilmektedir. Hız ve koku yoğunluğu arasındaki ilişki incelendiğinde, G1 ve G2

tesislerinin en yüksek hız değerlerine sahip olduğu ve buna bağlı olarak koku emisyonlarının diğer plastik geri dönüşüm tesislerine göre daha düşük olduğu görölmektedir. Baca gazı hızları sırasıyla 16,17 m/s ve 14,89 m/s. Koku emisyonu sonuçları ise G1 tesisi için 566,07 KB/m³ G2 tesisi için ise 663,82 KB/m³'dir. Yüksek hızın, kokulu bileşiklerin daha hızlı ve geniş bir alana dağılmasını sağlayarak koku yoğunluğunun azalmasına katkıda bulunduğu gözlemlenmektedir. G3 tesisinde hız 9,12 m/s iken koku değeri 812,67 KB/m³ olarak ölçölmüş ve bu tesis orta seviyelerde yer almıştır. G4 tesisinde ise düşük hızda (6,58 m/s) koku değeri en yüksek seviyede ölçölmüştür (820,8 KB/m³), bu da düşük hızın kokulu bileşiklerin baca yakınında yoğunlaşmasına ve yüksek koku seviyelerinin oluşmasına neden olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇ

Plastik sektörünün ham madde çıkarımından nihai ürün üretimine ve atık yönetimine kadar geniş bir süreci kapsamaması, plastik üretiminin ve tüketiminin artması bu sektörü çevresel etki bakımından kritik bir hale getirmektedir. Sektör genelinde çevresel sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla, mevcut süreçlerin dikkatli bir şekilde yönetilmesi ve iyileştirilmesi gerekmektedir. Yenilikçi malzeme seçimleri, çevreci üretim teknikleri ve etkin atık geri dönüşüm sistemleri, sektörün çevresel performansını iyileştirmeye yönelik önemli adımlar olarak öne çıkmaktadır.

Plastiklerin toplum için sağladığı önemli faydalar göz önüne alındığında, plastik kirliliğinin ana sorunlarından biri, çevre dostu üretim tekniklerinin yetersiz kullanımı ve düşük emisyonlu geri dönüşüm yöntemlerinin uygulanmamasıdır. Plastik atıkların uygun şekilde toplanması, geri dönüştürülmesi ve yeniden işlenmesi üzerine odaklanan sürdürülebilir atık yönetim sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması büyük önem taşımaktadır. Geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi, özellikle karmaşık plastik atıkların işlenmesinde ve kaliteli geri dönüşüm ürünlerinin elde edilmesinde büyük önem taşımaktadır.

Otomobillerin hacminin yaklaşık %50'si ve ağırlığının %12-17'si plastikten oluşmakta, bu da otomobillerin yakıt verimliliğini artırarak karbon emisyonlarını azaltmakta ve performansını iyileştirmektedir. Gelecekte, gelişen plastik teknolojileri ve çevre dostu malzemeler sayesinde otomobillerde kullanılan plastik miktarının artması beklenmektedir. Bunun yanı sıra, plastik geri dönüşümü de artan çevresel farkındalık, sürdürülebilirlik gereksinimleri ve ekonomik avantajlar nedeniyle giderek önem kazanmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri ve plastik geri dönüşüm tesislerinin UOB ve koku emisyonları değerlendirilmiştir. Plastik parça üretimi ve geri dönüşümü sırasında kullanılan polimer türleri, proses akışları, kullanılan ham madde ve üretim miktarları emisyon sonuçlarının değerlendirilmesinde yardımcı

olması amacıyla derlenmiştir. Emisyon sonuçları yanında toz, hız, nem gibi parametreler de incelenmiştir.

Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesisleri arasında en yüksek UOB emisyonu, yıllık 1111,32 kg ile boyahanesi olan otomotiv yan sanayi plastik parça üreten tesiste gözlenmiştir. Boyahane bölümüne sahip olması nedeniyle, diğer tesislere göre daha yüksek bir UOB emisyonu üretmektedir. Boya ve yardımcı malzeme kullanımı, özellikle benzen, toluen, etil benzen gibi UOB türlerinin yanı sıra klorlu bileşiklerin salımına sebep olmuştur. Bu sonuçlar literatürle desteklenmiş olup, çalışmada tespit edilen UOB türleri %65'in üzerinde literatürdeki türlerle örtüşmektedir.

Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim proseslerinin ekstrüzyon ve kaplama aşamalarında uygulanan yüksek sıcaklık ve basınç uygulamalarının UOB emisyonuna yol açtığı belirlenmiştir.

Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim tesislerinden O1 tesisinin %1,6 ile en yüksek nem oranına sahip olduğu, ancak UOB emisyonunun diğer tesislere göre 299,04 kg/yıl ile orta seviyede kaldığı belirlenmiştir. Nem oranı ve UOB değerleri arasında doğrudan bir ilişki gözlemlenmemiştir.

Otomotiv yan sanayi plastik parça üretim ve plastik geri dönüşüm tesislerinin tamamı, 3 Temmuz 2009 tarihli ve 27277 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'ne (SKHKKY) göre tesisteki tüm bacaların saldığı UOB emisyonları için belirlenen 30 kg/saat sınırının altında kalmıştır. Ayrıca, toz emisyonları da tüm tesislerde yönetmelikte belirtilen 10 kg/saat sınırını aşmamıştır.

Plastik geri dönüşüm tesislerinde, ekstrüzyon sırasında uygulanan ısı işlemler, polimerlerin zamanla bozulmasına, uzun süreli termal etkiye ve kirleticilerin varlığına bağlı olarak UOB emisyonlarına yol açmıştır.

En yüksek nem oranı (%6,97), G4 tesisi bacalarından çıkmıştır ve koku emisyonu da bu tesis içinde en yüksek seviyede gözlemlenmiştir. Bacalardaki artan nem, fazla su buharının oluşmasına neden olmuş ve bunun sonucunda kokulu gaz çıkışı artmıştır. Bu durum, nem oranının yükselmesiyle birlikte tesislerdeki koku emisyon sonuçlarının da arttığını göstermektedir.

G1 ve G2 tesislerinde baca gazı hızı en yüksek değerlere (sırasıyla 16,17 m/s ve 14,89 m/s) ulaşmıştır. Bacalardaki hızın artmasıyla birlikte, kokulu gaz emisyonlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Düşük baca gazı hızının kokulu bileşiklerin baca yakınında birikmesine ve yüksek koku seviyelerine sebep olabileceği gözlemlenmiştir.

Plastik geri dönüşüm tesislerinde, otomotiv plastik parça üretim tesislerine yakın olabilecek UOB emisyonları gözlenmiştir. Bu durum, tesislerde çeşitli kaynaklardan gelen karmaşık ve kirli atıkların işlenmesinin ve sınırlı teknolojik altyapının kullanılmasının da plastik parça üretimi kadar etki edebileceği düşünülmektedir.

Plastik geri dönüşüm tesislerinde, koku emisyon sonuçlarına göre en yüksek değer G4 tesisi tarafından kaydedilmiştir. Tesislerin koku emisyon sonuçları, 19 Temmuz 2013 tarihli ve 28712 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Koku Oluşturan Emisyonların Kontrolü Hakkında Yönetmelik (KOEKHY) Madde 9’a göre belirlenen 1000 KB/m³ koku emisyon sınır değerinin altında kalmıştır. Dolayısıyla, bu sınır değerinin altında kaldığı için tesislere kaynakta koku giderimi konusunda herhangi bir işlem uygulanmayacaktır.

Plastik atık geri dönüşüm tesislerinde yapılan çalışmalar, eritme işleminin toksik maddeler yayabileceğini ve insanlarda duyuşsal rahatsızlıklara neden olabileceğini göstermektedir (Tsai vd., 2009). Plastik atıkların yüksek sıcaklıkta eritilmesi ve toz haline getirilmesi işlemleri, sadece çalışanlar için değil çevrede yaşayanlar için de sağlık açısından potansiyel zararlı ve kötü kokulu gaz emisyonlarına sebep olabilir.

Plastik geri dönüşüm tesislerindeki yeni teknolojilerin araştırılması ve geliştirilmesi, geri dönüştürülmüş plastiklerdeki istenmeyen UOB'leri tamamen ortadan kaldırmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, plastiklerin geri dönüşüme uygun olarak üretilmesi önem arz etmektedir, çünkü bu yaklaşım geri dönüşüm süreçlerini daha etkin hale getirebilir.

Otomotiv yan sanayi, çevresel açıdan emek ve bilgi yoğun bir sektördür. Bu sektörde, otomotiv üretim sürecinde ortaya çıkan UOB emisyonlarının kontrol edilmesi, üretim sürecinin yanı sıra ham madde üretiminden başlayarak optimize edilmelidir. Yeni teknolojiler ve malzemeler kullanılarak temiz üretim yöntemleri benimsenmekte ve organik atık gaz emisyonları azaltılmaktadır. Özellikle kaplama prosesinde, yeşil üretim malzemeleri tercih edilerek organik solventlerden kaynaklanan UOB emisyonları azaltılmaktadır. Ayrıca, otomotiv plastik parçalarının üretiminde yüksek sıcaklık ortamında oluşan UOB gazlarının azaltılması için uzun zincirli polimer malzemelerin kullanımı teşvik edilmelidir (Cheng vd., 2017). Eko-tasarım önlemleri, katkı maddelerinin azaltılması, plastik parçalarda kullanılan boyaların geri dönüşümde ayrıştırılabilir olması sağlanması ve karışık plastiklerin kullanımının önlenmesi gibi hedefler içerebilir.

KAYNAKLAR

- Adeniyi, A., Agboola, O., Sadiku, E. R., Durowoju, M. O., Olubambi, P. A., Babul Reddy, A., Ibrahim, I. D., & Kupolati, W. K. (2016). Design and applications of nanostructured polymer blends and nanocomposite systems; Chapter 2 – Thermoplastic-thermoset nanostructured polymer blends. In E. R. Sadiku (Ed.), *Elsevier*.
- Agenda, I. (2016). *The new plastics economy: Rethinking the future of plastics*. World Economic Forum, 36.
- Alhazmi, H., Almansour, F. H., & Aldhafeeri, Z. (2021). Plastic waste management: A review of existing life cycle assessment studies. *Sustainability*, 13(10), 5340. <https://doi.org/10.3390/su13105340>
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29, 2625–2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
- Andrady, A. L. (2003). *Plastics and the environment*. John Wiley & Sons.
- Azevedo-Santos, V. M., Brito, M. F. G., Manoel, P. S., Perroca, J. F., Rodrigues-Filho, J. L., Paschoal, L. R. P., ... Pelicice, F. M. (2021). Plastic pollution: A focus on freshwater biodiversity. *Ambio*, 50, 1313–1324. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01496-5>
- Bano, N., Younas, T., Shoaib, F., Rashid, D., & Jaffri, N. (2020). Plastic: Reduce, recycle, and environment. M. Aliofkhazraei (Ed.), *Environmentally-benign energy solutions* (s. 191-208). Springer International Publishing.
- Barnes, D. K., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1985-1998.
- Beghetto, V., Sole, R., Buranello, C., Al-Abkal, M., & Facchin, M. (2021). Recent advancements in plastic packaging recycling: A mini-review. *Materials*, 14(17), 4782.
- Behera, B. K. (2019). Automotive textiles and composites. M. Aliofkhazraei (Ed.), *High Performance Technical Textiles* (s. 191-208). Springer International Publishing.
- Berk, Z. (Ed.). (2009). *Food Process Engineering and Technology* (2nd ed., pp. 333-350). Academic Press.
- Britannica, T. (2020). Editors of encyclopaedia. Argon. *Encyclopedia Britannica*.
- Cabanes, A., Valdés, F. J., & Fullana, A. (2020). A review on VOCs from recycled plastics. *Sustainable Materials and Technologies*, 25, e00179. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00179>
- Causin, V. (2015). Polymers: An overview. V. Causin (Ed.), *Polymers on the Crime Scene: Forensic Analysis of Polymeric Trace Evidence* (pp. 9–52). Wiley.
- Chandran, M., Tamilkolundu, S., & Murugesan, C. (2020). Conversion of plastic waste to fuel. M. Aliofkhazraei (Ed.), *Plastic Waste Recycling* (ss. 385-399). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00014-1>
- Cheng, T., Chen, J., Wu, K., Liu, J., Lu, S., & Hu, S. (2017, Haziran). Analysis and countermeasure of VOCs source in automobile production process in China. In *Environment. Technologies. Resources: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (Vol. 3, pp. 27-30).

- Chong, S., Chiu, H. L., Liao, Y. C., Hung, S. T., & Pan, G. T. (2015). Cradle to Cradle® design for 3D printing. *Chemical Engineering*, 45.
- Damayanti, D., Saputri, D. R., Marpaung, D. S. S., Yusupandi, F., Sanjaya, A., Simbolon, Y. M., ... Wu, H. S. (2022). Current prospects for plastic waste treatment. *Polymers*, 14(15), 3133. <https://doi.org/10.3390/polym14153133>
- Demirci, B. (2022). *Türkiye Plastik Sektörü 2021 Gerçekleşmeleri ve 2022 Beklentileri*. Pagev. Erişim adresi: <https://pagev.org/upload/files/T%C3%BCrkiye%20Plastik%20Sekt%C3%B6r%C3%BC.pdf>
- Di Lorenzo, M. L., & Androsch, R. (2018). Industrial applications of poly (lactic acid). *Springer International Publishing*. 177–219. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76711-6_6
- Dynisco. (2017). An introduction to single screw extrusion. *AZoM*. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13566> Erişim tarihi: 25.03.2024
- EuRIC. (2020). *Call for Recycled Content in Cars*. EuRIC AISBL. Erişim tarihi: 14 Mart 2024, [https://euric-aisbl.eu/images/Position-papers/EuRIC-Call for Recycled ContentPlastics.pdf](https://euric-aisbl.eu/images/Position-papers/EuRIC-Call%20for%20Recycled%20ContentPlastics.pdf)
- EuRIC AISBL. (2020). *Recycling: Bridging Circular Economy & Climate Policy, Plastic Recycling Factsheet*.
- European Committee for Standardization. (2004). TS EN 13649: TS EN 13649 sabit kaynak emisyonları – gaz halindeki her bir organik bileşiğin kütle derişiminin tayini – çözücü özütleme veya ısısal tarafından izlenen sorptif numune alma yöntemi standardı. Erişim adresi: <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073098121080068087086106121088072108>
- Evode, N., Qamar, S. A., Bilal, M., Barceló, D., & Iqbal, H. M. (2021). Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 10014. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.10014>
- Fayshal, Md. Atik, Tasnuva Dhara Farin, Mehedi Hasan Md., M Fairouz Adnan H., & Mizan Tahiat. (2023). Global Plastic Waste Scenario: A Review On Production, Fate And Future Prospects. *figshare*. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24225586.v1>
- Gabbott, S., Key, S., Russell, C., Yonan, Y., & Zalasiewicz, J. (2020). The geography and geology of plastics. In *Plastic Waste Recycl.* (pp. 33-63). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00003-7>
- Gallone, T., & Zeni-Guido, A. (2019). Closed-loop polypropylene, an opportunity for the automotive sector. *Field Actions Science Reports*, 19, 48-53. Erişim adresi: <https://journals.openedition.org/factsreports/5225>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782
- Geyer, R. (2020). Production, use, and fate of synthetic polymers. In *Plastic waste and recycling* (pp. 13-32). Academic Press.

- Ghaffar, I., Rashid, M., Akmal, M., et al. (2022). Plastics in the environment as potential threat to life: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 56928–56947. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21542-x>
- Haider, T. P., Volker, C., Kramm, J., Landfester, K., & Wurm, F. R. (2019). Plastics of the future? The impact of biodegradable polymers on the environment and on society. *Angewandte Chemie International Edition*, 58, 50-62. <https://doi.org/10.1002/anie.201805766>
- Hannay, F. (2002). *Rigid plastics packaging: materials, processes and applications* (Vol. 151). iSmithers Rapra Publishing.
- Harper, C. A. (2000). *Modern Plastics Handbook*. McGraw-Hill.
- Harun, N. (2012). *Study on Mechanical Characteristics of Mixed Heterogeneous Coastal Plastic Waste* [Doctoral dissertation, Universiti Malaysia Pahang].
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126.
- Huang, D., Zhou, S., Hong, W., Feng, W., Tao, L. (2013). Pollution characteristics of volatile organic compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalate esters emitted from plastic wastes recycling granulation plants in Xingtian town, South China. *Atmospheric Environment*, 71, 327–334.
- Huang, S., Wang, H., Ahmad, W., Ahmad, A., Vatin, N. I., Mohamed, A. M., Deifalla, A. F., Mehmood, I. (2022). Plastic waste management strategies and their environmental aspects: A scientometric analysis and comprehensive review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), Article 4556. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>
- Huang, Z., Zhu, J., Wu, X., Qiu, R., Xu, Z., & Ruan, J. (2021). Eddy current separation can be used in separation of non-ferrous particles from crushed waste printed circuit boards. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127755.
- Hurley, R., Horton, A., Lusher, A., & Nizzetto, L. (2020). Plastic waste in the terrestrial environment. *Plastic Waste Recycl.* (pp. 163-193). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00007-4>
- International Union for Conservation of Nature (IUCN). (2024, 18 Haziran). Plastic pollution. IUCN. <https://www.iucn.org/resources/issues-brief/plastic-pollution#:~:text=Over%20460%20million%20metric%20tons,to%20increase%20significantly%20by%202040>
- Jońca, J. (2021, 29 Ocak). The e-nose will detect sources of unpleasant odours. *Wrocław University of Science and Technology*. Retrieved from <https://pwr.edu.pl/en/university/news/the-e-nose-will-detect-sources-of-unpleasant-odours-10510.html>
- Katyal, D., Kong, E., & Villanueva, J. (2020). Microplastics in the environment: Impact on human health and future mitigation strategies. *Environmental Health Review*, 63, 27–31. <https://doi.org/10.5864/d2020-005>
- Koku Oluşturan Emisyonların Kontrolü Hakkında Yönetmelik (KOEKHY). (2010, 19 Temmuz). 27648 sayılı Resmî Gazete. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=18607&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- Kumar, R., & Singh, V. P. (2022). *Plasticulture Engineering and Technology*. CRC Press.

- Li, H., Aguirre-Villegas, H. A., Allen, R. D., Bai, X., Benson, C. H., Beckham, G. T., ... & Huber, G. W. (2022). Expanding plastics recycling technologies: chemical aspects, technology status and challenges. *Green Chemistry*, 24(23), 8899-9002
- Lintsen, H., Hollestelle, M., & Hölsgens, R. (2017). *The plastics revolution. How the Netherlands became a global player in plastics*. Eindhoven: Stichting Historie der Techniek.
- Liu, S. S., Hu, J. Y., Qin, D., Gao, L. L., Chen, Y., Ke, F. Y., Wang, C. S., & Wang, H. P. (2019). Analysis of the volatile organic compounds (VOCs) during the regeneration of post-consumed poly(ethylene terephthalate) using HS-GC-MS method. *Materials Science Forum*, 944, 1208–1214. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.944.1208>
- Maris, J., Bourdon, S., Brossard, J. M., Cauret, L., Fontaine, L., & Montembault, V. (2018). Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes. *Polymer Degradation and Stability*, 147, 245-266.
- Moad, G., & Solomon, D. H. (2021). The critical importance of adopting whole-of-life strategies for polymers and plastics. *Sustainability*, 13(15), 8218.
- Ncube, L. K., Ude, A. U., Ogunmuyiwa, E. N., Zulkifli, R., & Beas, I. N. (2021). An overview of plastic waste generation and management in food packaging industries. *Recycling*, 6(1), 12. <https://doi.org/10.3390/recycling6010012>
- Nozimbek, A., Kongratbay, S., & Khasanboy, T. (2021). Manufacture of automotive plastic parts under pressure and the factors affecting it. *Universum: технические науки*, (3-4 (84)) , 56-59.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022, 22 Şubat). Plastic pollution is growing relentlessly as waste management and recycling fall short. OECD. Erişim adresi: <https://www.oecd.org/environment/plastic-pollution-is-growing-relentlessly-as-waste-management-and-recycling-fall-short.htm>
- Ouellette, R. J., & Rawn, J. D. (2014). *Organic chemistry study guide: Key concepts, problems, and solutions*. Elsevier.
- Paterson, H. (2019). Plastic habits—an overview for the collection ‘Plastics and Sustainable Earth’. *Sustainable Earth*, 2, 1-8. <https://doi.org/10.1186/s42055-019-0017-6>
- Patil, A., Patel, A., & Purohit, R. (2017). An overview of polymeric materials for automotive applications. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3807-3815.
- Pawar, P. R., Shirgaonkar, S. S., & Patil, R. B. (2016). Plastic marine debris: Sources, distribution and impacts on coastal and ocean biodiversity. *Oceanography*, 3, 40–54.
- PCC Group. (2023). Uses of plastic in everyday life. PCC Product Portal. Erişim adresi: <https://www.products.pcc.eu/en/blog/uses-of-plastic-in-everyday-life/>
- Pilapitiya, P. N. T., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: a review. *Cleaner Materials*, 100220.
- PlasticsEurope. (2018). *Plastics e the Facts 2018: An analysis of European plastics production, demand and waste data*. Brussels, Belgium: PlasticsEurope.
- PlasticsEurope. (2023). *What are plastics?* Plastics Europe, Association of Plastics Manufacturers. Erişim adresi: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>

- Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste management*, 69, 24-58.
- Ragaert, K., Huysveld, S., Vyncke, G., Hubo, S., Veelaert, L., Dewulf, J., & Du Bois, E. (2020). Design from recycling: A complex mixed plastic waste case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104646.
- Raghav, S., & Kumar, D. (2020). Review environmental implications of incineration of municipal solid waste and ash disposal. In T. Dasgupta, & P. R. Dasgupta (Eds.), *Handbook of Research on Environmental and Human Health Impacts of Plastic Pollution* (pp. 59-79). Publisher.
- Saleh, T. A., & Gupta, V. K. (2016). *Nanomaterial and polymer membranes: synthesis, characterization, and applications*. Elsevier.
- Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY). (2009, 3 Temmuz). 27277 sayılı Resmî Gazete. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=13184&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- Schyns, Z. O., & Shaver, M. P. (2021). Mechanical recycling of packaging plastics: A review. *Macromolecular rapid communications*, 42(3), 2000415.
- Schwabl, D., Bauer, M., & Lehner, M. (2021). Advancing plastic recycling by wet-mechanical processing of mixed waste fractions. *Processes*, 9(3), 493.
- SensXpert. (2022, Mart 22). Automotive plastics manufacturing trends. SensXpert. <https://www.sensxpert.com/blog/automotive-plastics-manufacturing-trends/>
- Shen, M., Huang, W., Chen, M., Song, B., Zeng, G., & Zhang, Y. (2020). (Micro) plastic crisis: Un-ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120138.
- Song, J. H., Murphy, R. J., Narayan, R., & Davies, G. B. H. (2009). Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2127-2139.
- Stouten, J., & Bernaerts, K. V. (2022). Condensation Polyesters In Stouten, J., & Bernaerts, K. V. (Eds.), *Biodegradable Polymers in the Circular Plastics Economy*, 113-144.
- Suschem. (2019). *Plastics strategic research and innovation agenda*. Erişim adresi: https://cefic.org/app/uploads/2019/02/Plastics_Strategic_Research_Innovation_Agenda.pdf
- Tang, Z., Zhang, L., Huang, Q., Yang, Y., Nie, Z., Cheng, J., Yang, J., Wang, Y., Chai, M. (2015). Contamination and risk of heavy metals in soils and sediments from a typical plastic waste recycling area in North China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 122, 343–351.
- Tsai, C. J., Chen, M. L., Chang, K. F., Chang, F. K., & Mao, I. F. (2009). The pollution characteristics of odor, volatile organochlorinated compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons emitted from plastic waste recycling plants. *Chemosphere*, 74(8), 1104-1110.
- Tübitak. (2023). *Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası–Plastik Sektör*. Erişim adresi: https://tubitak.gov.tr/sites/default/files/yesil_tyh_plastik_sektoru_16082023.pdf.
- Ugoeze, K. C., Amogu, E. O., Oluigbo, K. E., & Nwachukwu, N. (2021). Environmental and public health impacts of plastic wastes due to healthcare and food products packages: A Review. *Journal of Environmental Science and Public Health*, 5(1), 1-31.

- Verma, R., Vinoda, K., Papireddy, M., & Gowda, A. (2016). Toxic pollutants from plastic waste-a review. *Procedia Environmental Science*, 35, 701-708.
- Vighi, M., Bayo, J., Fernández-Piñas, F., Gago, J., Gómez, M., Hernández-Borges, J., ... & Rosal, R. (2021). Micro and nano-plastics in the environment: Research priorities for the near future. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 257*, 163-218.
- Vilaplana, F., Ribes-Greus, A., & Karlsson, S. (2007). Analytical strategies for the quality assessment of recycled high-impact polystyrene: A combination of thermal analysis, vibrational spectroscopy, and chromatography. *Analytica Chimica Acta*, 604(1), 18-28.
- Vollmer, I., Jenks, M. J., Roelands, M. C., White, R. J., Van Harmelen, T., De Wild, P., ... & Weckhuysen, B. M. (2020). Beyond mechanical recycling: Giving new life to plastic waste. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(36), 15402-15423.
- Yang, Y., Liu, J., & Chen, L. (2021). Occurrence, sources, and human exposure to airborne microplastics: A critical review. *Environmental Pollution*, 287, 117482.
- Young, R. J., & Lovell, P. A. (2011). *Introduction to Polymers* (3rd ed.). CRC Press.
- Zhu, G., Xie, C., Li, Z., & Wang, X. (2017). Catalytic processes for light olefin production. C. S. Hsu & P. R. Robinson (Eds.), *Springer Handbook of Petroleum Technology* (Springer Handbooks, pp. 551-571). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49347-3_36
- Zink, T., & Geyer, R. (2018). Recycling and the myth of landfill diversion. *Journal of Industrial Ecology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/jiec.12808>
- Wang, T., Sattayatewa, C., Venkatesan, D., Noll, K. E., Pagilla, K. R., & Moschandreas, D. J. (2011). Modeling indoor odor-odorant concentrations and the relative humidity effect on odor perception at a water reclamation plant. *Atmospheric Environment*, 45(39), 7235-7239.
- Wang, Y., Huang, J., Zhu, F., & Zhou, S. (2021). Airborne microplastics: A review on the occurrence, migration and risks to humans. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107, 657-664. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03180-0>
- Wilkie, C. A., & Morgan, A. B. (Eds.). (2009). *Fire retardancy of polymeric materials*. CRC press.
- Wypych, G. (2023). Odors in plastic materials. G. Wypych (Ed.), *Handbook of odors in plastic materials*. Elsevier.
- Xu, J., Eagan, J. M., Kim, S. S., Pan, S., Lee, B., Klimovica, K., ... & Bates, F. S. (2018). Compatibilization of isotactic polypropylene (i PP) and high-density polyethylene (HDPE) with i PP-PE multiblock copolymers. *Macromolecules*, 51(21), 8585-8596.