**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE POLİÜRETAN KULLANIMI VE ÇEVRESEL YÜKÜNÜN BELİRLENMESİ**

**Nihan ŞUMNULU**

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

# OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE POLİÜRETAN KULLANIMI VE ÇEVRESEL YÜKÜNÜN BELİRLENMESİ

Nihan ŞUMNULU
0000-0003-2559-1917

Prof. Dr. Güray SALİHOĞLU

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Nihan ŞUMNULU tarafından hazırlanan "OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE POLİÜRETAN KULLANIMI VE ÇEVRESEL YÜKÜNÜN BELİRLENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Güray SALİHOĞLU

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Başkan** | **:** | Prof. Dr. Güray SALİHOĞLU<br>0000-0003-0714-048X<br>Uludağ Üniversitesi,<br>Mühendislik Fakültesi,<br>Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |
| **Üye** | **:** | Prof. Dr. Nezih Kamil SALİHOĞLU<br>0000-0002-7730-776X<br>Uludağ Üniversitesi,<br>Mühendislik Fakültesi,<br>Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |
| **Üye** | **:** | Dr. Öğr. Üyesi Berna KIRIL MERT<br>0000-0001-6993-7916<br>Sakarya Üniversitesi,<br>Mühendislik Fakültesi,<br>Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Ali KARA**
**Enstitü Müdürü**
**28/06/2024**

**B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**28/6/2024**

**Nihan ŞUMNULU**

**TEZ YAYINLANMA**
**FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI**

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

| | |
|---|---|
| Danışman Adı-Soyadı<br>Tarih | Öğrencinin Adı-Soyadı<br>Tarih |
| İmza<br>Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır. | İmza<br>Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır. |

**BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ**
**LİSANSÜSTÜ TEZ TANITIMI**
**ÖĞRENCİ VE DANIŞMAN FORMU**

**FR 3.4.6_27**


**ÖĞRENCİ**
**Adı SOYADI : Nihan ŞUMNULU**
**ÜNVANI :**
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ABD
E-POSTA : nihansumnulu@gmail.com
PROGRAMI: YÜKSEK LİSANS
ORCID : 0000-0003-2559-1997
TÜBİTAK ID: TBTK-0159-3521
WOS RESEARCHER ID: KVX-9852-2024
SCOPUS AUTHOR ID :
Google Scholar ID : dXvd3ZIAAAAJ

**DANIŞMAN**
**Adı SOYADI : Güray SALİHOĞLU**
**ÜNVANI : Prof. Dr.**
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ABD
E-POSTA : gurays@uludag.edu.tr
YÖKSİS ARAŞTIRMACI ID :
ORCID : 0000-0003-0714-048X
TÜBİTAK ID : TBTK-0009-1208
WOS RESEARCHER ID: 0000-0003-0714-048X
SCOPUS AUTHOR ID : 8551769300
Google Scholar ID : tHVwXKEAAAAJ


**BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ YÜKSEK LİSANS/DOKTORA EĞİTİMİ BOYUNCA**

**BİLİMSEL ÇALIŞMALARI VE FAALİYETLERİ***

1. Şumnulu, N., Salihoğlu G. (2024) Otomotiv Sektöründeki Araç Hafifletme Çalışmaları ve Çevresel Etkileri. Serüven Yayınevi: Mühendislik Alanında Uluslararası Çalışmalar Mart 2024, sf: 217-230

*****Makaleler, Bilimsel toplantılarda sunulan bildiriler, patentler, projeler, eğitimler vb. faaliyetler sıralanmalıdır.

BİRLEŞMİŞ MİLLETLER SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA HEDEFLERİ

☐


☐


☐


☐


☐


☐


☐


■


Sürdürülebilir Kalkınma

■


Akademik Girişimcilik

☐


☐


■


Kimyasal Geri Dönüşüm
Yaşam Döngüsü Analizi
Tedarik Zinciri

■


Sera Gazı
$CO_2$ azaltımı

☐


☐


☐


☐


Anahtar kelimeler aşağıdaki bağlantı üzerinden seçilecektir.
https://incites.help.clarivate.com/Content/Resources/Docs/SDG2023.xlsx

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

## OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE POLİÜRETAN KULLANIMI VE ÇEVRESEL YÜKÜNÜN BELİRLENMESİ

**Nihan ŞUMNULU**

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Güray SALİHOĞLU

Hayatımızın vazgeçilmez parçalarından olan otomobillerin üretimi, global rekabet koşulları ve giderek zorlaşan yasal şartlara uyum nedeniyle sündürülebilir çözümler üretilmesi gereken alanların başında gelmektedir. Otomobilde plastik kullanımı, üretim ve tasarım kolaylıkları yanı sıra aracı hafifletmesi, beraberinde yakıt ekonomisinde iyileşme ve $CO_2$ salınımında azalma meydana getirmektedir. Bu çalışmada geri dönüşümü yaygın olmayan plastik malzeme gruplarından poliüretan malzemenin otomotiv sektöründe kullanımı değerlendirilmiştir. Otomobil içindeki poliüretan malzemeler, 2008-2013-2020 yıllarında piyasaya yeni çıkan aynı model araç içerisinde analiz edilmiştir. 3 yıl içerisinde değişen poliüretan kullanımına göre SimaPro-Ecoinvent 3.9.1 veri tabanından alınan emisyon faktörleri ile, poliüretan hammadde kaynaklı araç emisyonu hesaplanmıştır. Araç ana grupları içerisinde en çok poliüretan malzemeye sahip bölüm koltuk, ikinci sırada iç mekan parçaları bulunmaktadır. En çok poliüratan malzeme onanına sahip koltuk grubunun poliüretan malzemeler içeren bilenlerinin prosesleri incelemiş olup bu koltuk süngeri ve koltuk kılıf süngeri proseslerinin girdi ve çıktıları çevresel unsurlarla birlikte ortaya konmuştur. İkinci en yüksek poliüretan malzeme onanına sahip iç mekan parçalarından taban paspası ürerim prosesindeki baca gazı emisyon ölçümünde tespit edilen kirleticiler ve konsantrasyonları değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Otomotiv sektörü, araç hafifletme, sürdürülebilir malzemeler, poliüretan malzeme, poliüretan geri dönüşümü, koltuk ve iç mekan parçaları, biyo-bazlı poliüretanlar, çevresel etki.
**2024, xv+ 56 sayfa.**

## ABSTRACT

MSc Thesis

**POLYURETHANE USE IN AUTOMOTIVE INDUSTRY AND DETERMINATION OF ITS ENVIRONMENTAL BURDEN**



**Nihan SUMNULU**

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

**Supervisor:** Prof. Dr. Guray SALIHOGLU



The production of automobiles, which are indispensable parts of our lives, is one of the areas where sustainable solutions need to be produced due to global competition conditions and compliance with increasingly difficult legal conditions. The use of plastic in automobiles not only facilitates production and design, but also makes the vehicle lighter, resulting in an improvement in fuel economy and a reduction in CO2 emissions. In this study, the use of polyurethane material, one of the plastic material groups that is not widely recycled, in the automotive industry was evaluated. Polyurethane materials in the car were analyzed in the same model vehicle that was newly released to the market in 2008-2013-2020. Vehicle emissions originating from polyurethane raw materials were calculated with the emission factors taken from the SimaPro-Ecoinvent 3.9.1 database, according to the changing polyurethane usage within 3 years. Among the vehicle main groups, the seat has the most polyurethane material, followed by interior parts. The processes of the polyurethane materials of the sofa group with the highest polyurethane material approval have been examined, and the inputs and outputs of these seat foam and seat cover foam processes have been revealed together with environmental elements. The pollutants and their concentrations detected in the flue gas emission measurement in the floor mat production process, one of the interior parts with the second highest polyurethane material approval, were evaluated.



**Key words:** Automotive industry, vehicle lightweighting, sustainable materials, polyurethane material, polyurethane recycling, seats and interiors, bio-based polyurethanes, environmental impact.
**2024, xv + 56 pages.**

# TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimi boyunca bilgi ve tecrübesi ile daima yol gösteren, verdiği her dersi alamasam da hevesle girip dinlemeye çalıştığım, tez çalışmamda da desteğini ve yardımlarını esirgemeyen, bana sürekli bir adım ötesini göstermeye çalışan değerli hocam Prof. Dr. Güray Salihoğlu'na teşekkür ederim.

Hayatıma dahil olduğu andan itibaren beni her zaman destekleyen, çoğu zaman büyük bir sabırla ve anlayışla yanımda olan, yardımını esirgemeyen eşim Orçun Şumnulu'ya, tüm hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyip, başarılarımla daima gurur duyan, mezuniyetimi en az benim kadar arzulayan annem Nihal Durak ve babam Mahmut Durak'a çok teşekkür ederim.

Yüksek lisansa başladığım günden itibaren bilgi ve tecrübelerini paylaşan, farklı proje ve bilimsel araştırmalarda birlikte çalıştığım, davranışlarını örnek almaya çabaladığım hocalarım, Prof. Dr. Yücel Taşdemir, Prof. Dr. Fatma Payan Esen, Prof. Dr. Sıddık Cindoruk'a, yüksek lisans yolculuğum boyunca destekleriyle mesafeleri aşan arkadaşlarım, Dr. Özge Sivrioğlu'na, Dr. Burak Çalışkan'a, Yıldız Mine Evci'ye ve Canan Çırakoğlu'na teşekkürlerimi sunarım.

İş hayatımla birlikte yürüttüğüm yüksek lisans yolculuğumda, tüm iş yoğunluğuma rağmen, eğitimin önceliğini farkında olarak, buna zaman ayırabilmemi sağlayan değerli yöneticilerime ve iş arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Nihan ŞUMNULU
28/06/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa
ÖZET.....viii
ABSTRACT.....ix
TEŞEKKÜR.....x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....xv
1. GİRİŞ.....1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....5
2.1. Poliüretan Malzemeler, Gelişimi ve Kullanım Alanları.....5
2.2. Otomotiv Sektöründe Poliüretan Malzeme Kullanımı.....14
2.3. Poliüretan Kullanımının Çevresel Değerlendirilmesi.....15
2.3.1. Poliüretan üretiminde alternatif çevreci hammaddelerin kullanımı.....17
2.3.2. Poliüretan geri dönüşümü, geri kazanımı ve bertarafı.....19
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....24
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....26
4.1. 2008 Model Araç Analizi.....26
4.2. 2013 Model Araç Analizi.....32
4.3. 2020 Model Araç Analizi.....38
4.4. Koltuk Üretimindeki Poliüretan Proseslerinin Çevresel Değerlendirilmesi.....43
4.5. İç Mekan Parçalarının Poliüretan Proseslerinin Çevresel Değerlendirilmesi.....45
4.6. Poliüretan Hammadde Kaynaklı Emisyonların Yıllara Göre Değerlendirilmesi.....49
5. SONUÇ.....52
KAYNAKLAR.....54
ÖZGEÇMİŞ.....56

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| **Simgeler** | **Açıklama** |
|---|---|
| $CO_2$ | Karbondioksit |
| % | Yüzde |
| µg | Mikrogram |
| W | Güç birimi (Watt) |
| N | Kuvvet birimi (Newton) |
| g | Gram |
| km | Kilometre |
| kg | Kilogram |
| m | Metre |
| mm | Milimetre |
| cm | Santimetre |
| MPa | Megapaskal |
| K | Isı iletkenlik katsayısı |
| sn | Saniye |
| HPa | Hektopaskal |
| MPa | Megapaskal |

| **Kısaltmalar** | **Açıklama** |
|---|---|
| AB | Avrupa Birliği |
| ABD | Amerika Birleşik Devletleri |
| ABS | Akrilonitril bütadien stiren |
| ACM | Poliakrilik kauçuk |
| AR-GE | Araştırma-Geliştirme |
| ASA | Akrilonitril stiren akrilat |
| CR | Kloropren kauçuk |
| GF | Cam elyaf |
| CSM | Klorosülfonatlı polietilen kauçuk |
| GFB | Güvenlik Bilgi Formu |
| EPDM | Etilen propilen dien monomer |
| HCN | Hidrosiyanik asit |
| IPCC | Devletlerarası İklimsel Değişimler Paneli |
| MDI | Metilen difenilizosiyanatın |
| NO | Azot monoksit |
| NR | Doğal kauçuk |
| NVH | Gürültü, titreşim ve sertlik |
| PA | Polyamid |
| PBT | Polibütilen tereftalat |
| PC | Polikarbonat |
| PCR | Tüketim sonrası geri dönüştürülmüş plastik |
| PE | Polietilen |
| PET | Polietilen tereftalat |
| PMDI | Polimerik metilen difenilizosiyanat |
| PMMA | Polimetil metakrilat |
| POM | Polioksimetilen |

| | |
|---|---|
| PP | Polipropilen |
| PPE | Polifenilen eter |
| PPO | Polifenilen oksit |
| PPS | Polifenilen sülfit |
| PU | Poliüretan |
| PVC | Polivinilklorür |
| RIM | Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama |
| R-PP | Geri gönüştürülmüş polipropilen |
| SBR | Stiren bütadien kauçuk |
| SMA | Stiren maleik anhidrit koaloksimer |
| TD | Talk dolgu |
| TDI | Toluen diizosiyanat |
| TPE | Termoplastik Elastron |
| TPU | Termoplastik üretan |
| TPV | Termoplastik Vulkanizat |
| UV | Ultraviyole |
| WF | Ahşap lifi |

## ŞEKİLLER DİZİNİ


| | | Sayfa |
|---|---|---|
| Şekil 2.1. | Poliol ve diizosiyanat ile poliüratanın oluşum reaksiyonu | 5 |
| Şekil 2.2. | 2022-2032 yılları arasındaki poliüretan pazar büyüklüğü | 7 |
| Şekil 2.3. | Global düzeydeki pazarın bölgelere göre dağılımı | 7 |
| Şekil 2.4. | Poliüretan Kullanım Alanları | 8 |
| Şekil 2.5. | Farklı poliüretan ürünlerinin pazar payı | 11 |
| Şekil 2.6. | RIM prosesi gösterimi. | 12 |
| Şekil 2.7. | RIM prosesi ile parça üretimi | 13 |
| Şekil 2.8. | Poliüretanın zamana bağlı değişimi | 13 |
| Şekil 2.9. | Blok sünger ve kesilmiş laminasyon süngeri | 14 |
| Şekil 2.10. | İsosiyanat Güvenlik Bilgi Formu tehlike unsurları | 16 |
| Şekil 2.11. | Poliol Güvenlik Bilgi Formu tehlike unsurları | 16 |
| Şekil 3.1 | En fazla PU kütlesel oranına koltuk parçaların proseslerine ait bilgiler | 25 |
| Şekil 4.1. | 2008 model aracın sistem ana gruplarının ağırlıkları | 29 |
| Şekil 4.2. | 2013 model aracın sistem ana gruplarının ağırlıkları | 35 |
| Şekil 4.3. | 2020 model aracın sistem ana gruplarının ağırlıkları | 40 |
| Şekil 4.4. | Ön koltuk bileşenleri | 43 |
| Şekil 4.5. | Arka koltuk bileşenleri | 44 |
| Şekil 4.6. | Kalıplama ile sünger üretim prosesi ve çevresel unsurları | 44 |
| Şekil 4.7. | Blok sünger üretim prosesi ve çevresel unsurları | 45 |
| Şekil 4.8. | Blok sünger üretim prosesi ve çevresel unsurları | 50 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

**Sayfa**


Çizelge 2.1. Poliüretan bileşenleri ve katkıları ile etkileri ..... 6
Çizelge 2.2. Esnek poliüretan köpüklerin özellikleri. ..... 9
Çizelge 2.3. Sert Poliüretan köpüklerin özellikleri ..... 9
Çizelge 2.4. Elastomerlerin özellikleri ..... 10
Çizelge 2.5. Biyo bazlı ve petrol bazlı PU özellikleri ..... 18
Çizelge 2.6. Kimyasal poliüretan geri dönüşüm yöntemlerinin kıyaslanması ..... 20
Çizelge 2.7. Poliüretan geri dönüşüm ve bozunma yöntemlerinin karşılaştırılması ..... 23
Çizelge 3.1. En fazla PU kütlesel oranına sahip koltuk üretim proseslerine ait bilgiler ..... 24
Çizelge 4.1. Analiz edilen araçların model yılları ve araç bilgileri ..... 26
Çizelge 4.2. 2008 model aracın malzeme ve ağırlık bilgileri ..... 26
Çizelge 4.3. 2008 model aracın sistem ana gruplarının ağırlıkları ..... 28
Çizelge 4.4. 2008 model aracın sistem ana grubu ve alt gruplarına göre PU parçaların formları ve ağırlıkları ..... 30
Çizelge 4.5. 2013 model aracın malzeme ve ağırlık bilgileri ..... 32
Çizelge 4.6. 2013 model aracın sistem ana gruplarının ağırlıkları ..... 34
Çizelge 4.7. 2013 model aracın sistem ana grubu ve alt gruplarına göre PU parçaların formları ve ağırlıkları ..... 36
Çizelge 4.8. 2020 model aracın malzeme ve ağırlık bilgileri ..... 38
Çizelge 4.9. 2020 model aracın malzeme ve ağırlık bilgileri ..... 39
Çizelge 4.10. 2013 model aracın sistem ana grubu ve alt gruplarına göre PU parçaların formları ve ağırlıkları ..... 41
Çizelge 4.11. Poliüretan döküm bacasındaki kirleticiler ..... 46
Çizelge 4.12. Paspas üretimi sırasında oluşan atıklar ..... 48
Çizelge 4.12. Paspas üretimi sırasında oluşan atıklar ..... 49

# 1. GİRİŞ

Hayatımızın vazgeçilmez parçalarının üretildiği otomotiv sektörü, 19. yüzyıl itibariyle değişen bileşenleri ile tarih sahnesindedir. Geçmişten itibaren birçok değişiklikle günümüze gelen otomotiv sektörü, hem etki hacmi nedeniyle dünyanın en önemli endüstri alanlarından biridir.

20. yüzyılın ilk yarısı ikinci sanayi devrimine geçerken, üçüncü sanayi devrimi 1970'li yılların başına tarihlenmektedir. Bu yıllar Dünya Enerji krizi ile aynı dönemde gerçekleşmekle birlikte global düzeyde yenilenebilir enerji kaynakları arayışına yol açmıştır. 70'li yıllar itibariyle 2010'lu yıllara kadar üçüncü sanayi devrimi, üretim otomasyonları, bu otomasyonları daha ileriye taşıyan elektroniğe ve bilgi teknolojilerine dayalı süreçler başlamıştır. Otomotiv sektöründe, üretim, dağıtım, AR-GE süreçlerinde olduğu gibi ürünün kendisinde de, bu dönemde farklılaşma oluşmuştur.

Son zamanlarda sıklıkla kullanılan sürdürülebilirlik kavramı ise ilk defa 1972 yılında Stockholm'de gerçekleşen "İnsan Çevre Konferansı" ile kullanılmıştır (Yeni, 2014). 1987 yılında Birleşmiş Milletler'in Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu'yla yayınladığı Ortak Geleceğimiz (Brundtland Raporu) Raporu ile 'Bugünün gereksinimlerini, gelecek kuşakların gereksinimlerini karşılama yeteneğinden ödün vermeden karşılayan kalkınma" olarak tanımlanmıştır (Yeni, 2014). Birleşmiş Milletler'in Devletlerarası İklimsel Değişimler Paneli (IPCC) kapsamında 2007 yılında yaptılan çalışmalara göre ise, artık geri dönüşü olmayan noktada olunduğu belirtilerek, iklim değişikliğine en büyük katkının karbondioksit gaz salınımlarından kaynaklandığını ortaya koymuştur (IPCC, 2007). Aynı raporda, bu gaz salınımındaki artış nedeninin neredeyse tamamının insan faaliyetleriyle oluştuğu belirtmiştir.

Mevcut yakıtların, daha ekonomik doğal kaynak kullanımıyla iyileştirilmesi gerekliği ve sera gazı emisyonlarının azaltılması gerekliliği, otomobil üreticilerini daha hafif otomobiller üretmeye zorunlu kılmıştır (Zhang ve Xu, 2022).

Avrupa Parlamentosu ve Konsey'i, 19 Nisan 2023 tarihinde, yeni binek otomobiller ile yeni hafif ticari araçlar için (AB) 2023/851 sayılı Tüzüğü kabul ederek, 2030 yılı itibaren geçerli olan emisyon hedeflerini zorlaştırmakta ve 2035'ten itibaren %100 azaltımı hedefi koymaktadır. $CO_2$ emisyon standartlarını, Avrupa Birliği'nin artan emisyon performans standartlarıyla uyumlu hale getirmek amacıyla (AB) 2019/631 sayılı Tüzüğün revizyonuyla oluşan bu yeni tüzüğe göre, binek araçlar için 2024 yılına kadar 95 g $CO_2$/km, 2029 yılına kadar 93,6 g $CO_2$/km, 2035 yılına kadar ise 49,5 93,6 g $CO_2$/km hedeflenmektedir.

Otomotiv sektörü, 2023'de 35 milyar dolarlık ihracatla, tüm ülkedeki sektörler arasında %16'lık oranla 1.sıradadır. İhracatımızın 2/3'sinden fazlasını AB'ne yapan otomotiv sektörü, AB hedeflerine bağlı olarak, $CO_2$ emisyonlarını azaltmak için çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışmalar yıllar boyunca ülkemiz ve dünyanın odak noktası olmakla birlikte, yeni çözümler bulunması gerekliği doğurmuştur.

Otomobil parçalarının tasarımında kullanılan malzemelerindeki yönelimler ve gelişmeler her geçen gün değişmektedir. 1977 yılında belirlenen araç kompozisyonunda polimer oranı %5 olarak belirlenmişken (Mishra, 2020) bu oran 30 yıl içerisinde %15 seviyesine çıkmıştır (Patil ve ark., 2017). Polimer malzeme grubu içerisinde Polipropilen (PP) %32, Poliüretan (PU) %17 ve Polivinilklorür (PVC) %16 oranındadır (Patil ve ark., 2017).

Otomotiv endüstrisinin gelişim geçmişine göre, şu anda yaygın olarak kullanılan otomotiv malzemeleri ağırlıklı olarak; yüksek mukavemetli çelik, titanyum alaşımlı malzemeler, magnezyum alaşımlı malzemeler, alüminyum ve alüminyum alaşımlı malzemeler ve plastik ve kompozit malzemelerdir.

Otomotiv endüstrisinde kullanılan çok sayıda malzemenin sınıflarına göre farklı mekanik özellikleri bulunmaktadır. İşlev, malzeme, şekil ve üretim yöntemleri bir bütün olarak düşünülmekle birlikte, seçilen malzemenin tasarımına göre işlevini yerine getirmesi, şekillendirme ilkelerine, montaj ve imalata uyumlu olması, maliyetinin ekonomik olması ve çevresel etkilerinin belirlenmiş gerekliliklere ve standartlara uygun

olması beklenmektedir. Bu nedenle beklenti ve gereklilikler birlikte değerlendirilmeli ve seçimler bu doğrultuda yapılmalıdır.

Kullanımı, çevresel boyutları nedeniyle tartışma konusu olan ve her geçen gün üretim ve tüketim miktarı artan plastik malzemelerin aşağıda açıklanan tercih edilme sebepleri ile kullanımı söz konusudur,

- Daha uzun araç ömrü için minimum korozyon
- Yenilik ve yaratıcılık için tasarımda özgürlük
- Bileşimlerdeki estetiklik
- Güvenlik, konfor ve ekonomi
- Geri dönüştüm imkanları

AB Ömrünü Tamamlamış Araçlar Direktifi'ne göre ise araç yapımında kullanılan plastiğin en az %25' inin geri dönüşüm ile sağlanması gerekmektedir.

Son yıllarda tercih edilen yüksek yoğunluklu polimerlerin yerine, yaklaşık olarak %50-75 oranında daha düşük yoğunluktaki poliüretan malzemelerin kullanılması ise, otomobil ağırlığının daha da azaltılması amacıyla kullanılan yönetmelerin başında gelmektedir (Yetkin ve ark).

Araç hafifletme çalışmalarında poliüretan malzemeler, çeşitli avantajları nedeniyle önemli bir rol oynar. Bu malzemeler, otomotiv endüstrisinde araçların ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırmak, performansı iyileştirmek ve emisyonları azaltmak gibi hedeflere ulaşmada öneme sahiptir. Üretiminin kolaylığı ve kullanım avantajlarından dolayı, poliüretan esaslı malzemelerin kullanımı hem Türkiye'de hem de dünyada hızla artmaktadır.

Tüm malzemelerde olduğu gibi, poliüretan malzeme kullanımın da avantajları ve tercih edilme sebepleri yanı sıra değerlendirilmesi gereken çevresel etkileri mevcuttur. Bunları değerlendirmek aşağıdaki hipotezler kurulmuş ve yapılan analizlerle cevap bulunmaya çalışılmıştır.

- Otomotiv PÜR kullanımının yaygın olduğu sektördür ve PÜR üretiminin çevresel yükü fazladır.
- Otomotiv sektöründe zamana bağlı değişen trendler araçların hafifletilmesi yönünde olmaktadır.
- Araç hafifletme çalışmalarında düşük yoğunluğa sahip olması, ses ve titreşim absorbe etme özellikleri nedeniyle poliüretan malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Poliüretan termoset malzeme olması nedeniyle geri dönüştürülemez.
- Otomotiv koltuklarında poliüreatan kullanımı ile karbon ayak izi azalır.

Bu çalışmada, dünyanın önde gelen endüstrisi otomotiv sektöründe kullanılan malzemelerden poliüretanın,

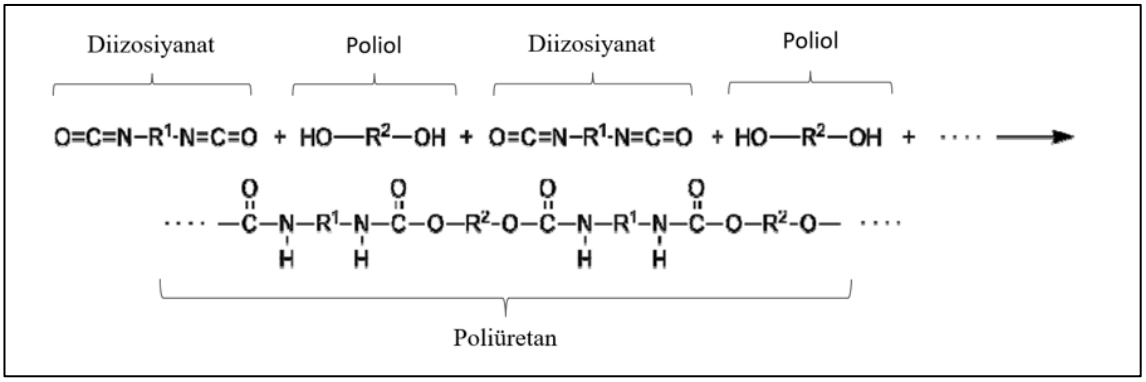
- Tercih edildiği otomobil parçaları
- Zamana göre değişen kullanım trendleri
- Üretim proseslerindeki çevresel etkileri
- Geri dönüşüm ve yeniden kullanım imkanları
- Alternatif olarak çevreci hammaddelerle üretilmeleri
- Zamana göre poliüretan hammadde kullanımındaki değişimler ile emisyon miktarı

değerlendirilmesi sayesinde literatüre özgün bir çalışma olarak katkı sağlamaya çalışılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Poliüretan Malzemeler, Gelişimi ve Kullanım Alanları

Polimer malzeme grubundaki poliüretanlar (PU'lar), poiol ve izosiyanatın karışımı sonucu elde edilmektedirler. Dizosiyanat (OCN-R-NCO) ve poliol (HO-R-OH) reaksiyonu ile, polioldeki hidrojen atomu, izosiyanat ile birleşerek üretan meydana getirmektedir (Kaur ve ark., 2022, Gama ve ark., 2018). Molekül içerisinde çapraz bağlarla oluşan PU'ın, poliol ile diizosiyanatın reaksiyonu Şekil 2.1´de gösterilmektedir.



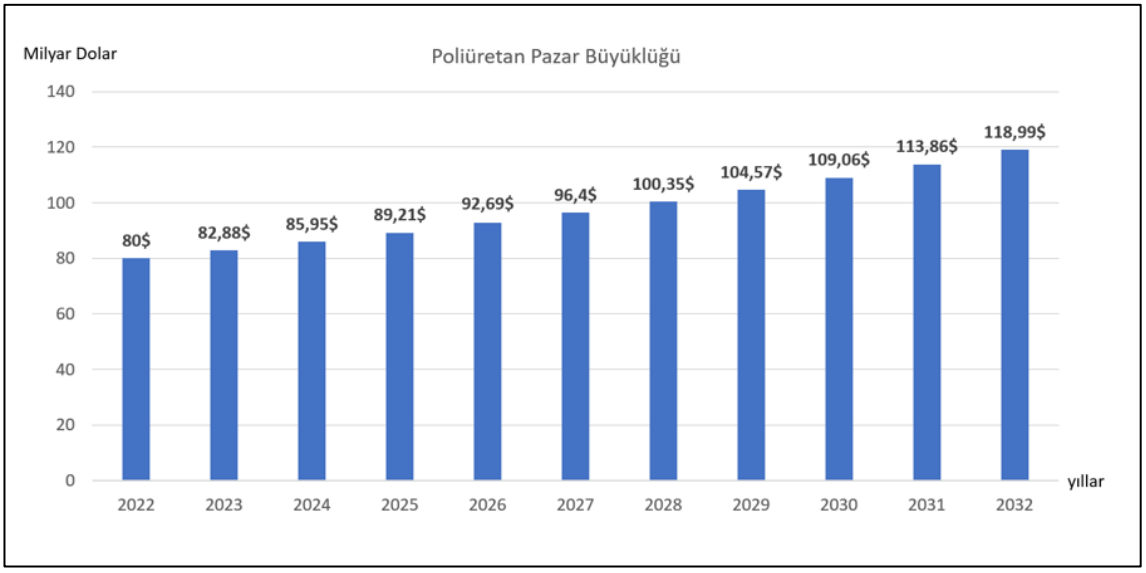

**Şekil 2.1**. Poliol ve diizosiyanat ile poliüratanın oluşum reaksiyonu (Gama ve ark. 2018)

Poliüretanın temel bileşenleri isosiyanat ve poliolün yanı sıra, nihai üründe beklenen özelliklerin sağlanabilmesi için çeşitli katkı maddeleri eklenmektedir. Bu maddeler Çizelge 2.1'de kazandırdıkları etkiler ile birlikte açıklanmıştır.

**Çizelge 2.1.** Poliüretan bileşenleri ve katkıları ile etkileri (Das ve Ark. 2020)

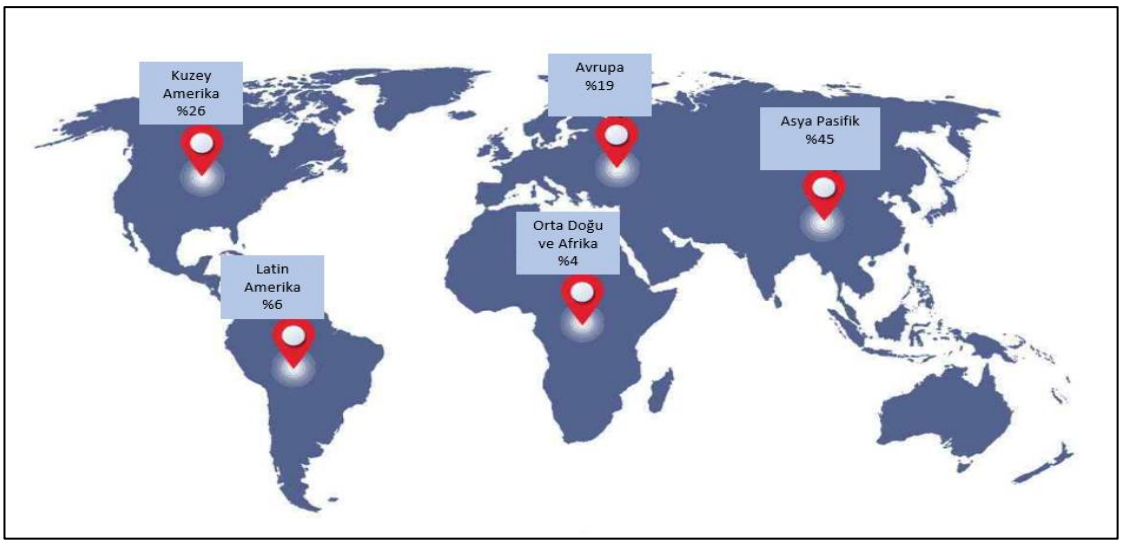
| Poliüretan Bileşeni | Etkisi |
|---|---|
| İsosiyanat | PU reaktivitesinden ve kürleşme özelliklerinden sorumludur |
| Poliol | Esnek uzun segmentlere katkıda bulunur, elastik polimerler üretiri |
| Katalizörler | Düşük sıcaklıklarda reaksiyonu hızlandırır. |
| Plastikleştiriciler | Malzeme sertliğini azaltırlar. |
| Pigmentler | Malzemenin estetiğini sağlar, renk verir. |
| Çapraz bağlayıcılar/zincir uzatıcılar | Poliüretanın yapısal modifikasyonu ile çekme mukavemetini ve sertliği arttırmak için mekanik destek sağlar. |
| Şişirme maddeleri ve yüzey aktif maddeler | PU köpüklerin üretimine yardımcı olurlar. |
| Dolgu maddeleri | Sertliği ve çekme mukavemetini arttırmak ve maliyeti azaltır. |
| Alev Geciktiriciler | Malzemenin yanıcılığını azaltır. |

PU'lar günlük yaşam ürünleri olarak kullanılmakta olup insan yaşamının kalitesini sürekli değiştiren en önemli polimerlerden biri olarak görülmektedir (Gama ve ark., 2018). Dünya çapında PU tüketimi 2017 yılında 60,5 milyar ABD dolarıyken, 2021 yılında 79 milyar ABD dolarının üzerinde olacağı öngörülmüştür (Gama ve ark., 2018). 2023 yılında 82,88 milyar ABD doları pazar hacmine ve 25.78 milyon metrik ton üretime sahip PU'ın yıllık %4,5 üretim artışı öngörülmektedir. 2030 yılında ise küresel poliüretan üretiminin yaklaşık 29.6 milyon metrik ton (29.6 megaton) olması beklenmektedir. Bu üretimin ekonomik değeri ise 110 milyar dolar civarında tahmin edilmektedir. Şekil 2.2'de 2022 yılı itibariyle mevcut durumu ve 2032 yılına kadarki öngörü gösterilmiştir.




**Şekil 1.2.** 2022-2032 yılları arasındaki poliüretan pazar büyüklüğü (www.precedenceresearch.com)

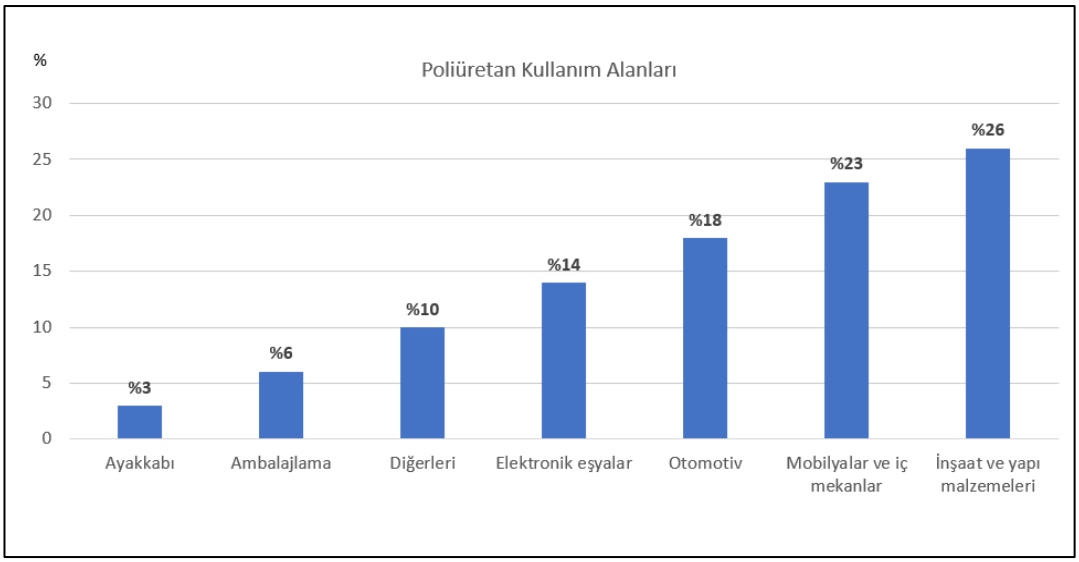
Global düzeydeki pazarın bölgesel dağılımı ise Şekil 2.3'de gösterilmiştir.




**Şekil 2.3.** Global düzeydeki pazarın bölgelere göre dağılımı (www.precedenceresearch.com)

Otomotiv bileşeni olarak kullanılan poliüretanlardan, rijit PU ilk kez 1967 yılında üretilmiştir. Düşük yoğunlukta bile iyi derecede ısıl kararlılık ve yanma direnci otomotiv sektöründeki temel beklentilerin karşılanmasını sağlamıştır (Metin, 2019).

Yapılan araştırmalara göre global düzeyde kullanım alanları Şekil 2.4.'de açıklanmıştır.




**Şekil 2.4.** Poliüretan Kullanım Alanları (Gama ve ark., 2018)

### 2.1.1. Poliüretan malzemelerin sınıflandırılması ve özellikleri

Poliol ve izosiyanatın karışımı sonucu elde edilen poliüretana katkı malzemesi olarak köpürtücü eleman, katalizör ve silikonlar eklenmektedir. Eklenen bu malzemelere göre farklı özelliklere sahip olan poliüretanlar çeşitli sınıflara ayrılırlar. Bu sınıflar; köpükler, elastomerler, rijit poliüretanlar ve poliüretan kaplamalar olmak üzere 4 ana grupta toplanmıştır.

- **Poliüretan köpükler**

Esnek poliüretan köpükler farklı kalıplar yardımıyla otomobil koltukları gibi çok farklı şekillerde üretilebilmektedir. İnşaat, beyaz eşya ve otomotiv sektörlerinde önemli miktarlarda kullanılmaktadır (Akovalı, 1984)

- **Esnek (Fleksi) poliüretanlar**

Esnek poliüretan köpükler tek aşamalı diizosiyanat ile poliollerin köpük yapıcı maddeler varlığında polimerleştirilmesi ile elde edilmektedir. Poliol bileşeni olarak polieterler ve esnek zincirli poliesterler kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan poliol

yaklaşık 3000 molekül ağırlıklı gliserin ve propilenoksit esaslı polieterdir (Çobanoğlu, 2008). Çizelge 2.2'de esnek poliüretan köpüklerin bazı özellikleri verilmektedir.

**Çizelge 1.2** Esnek poliüretan köpüklerin özellikleri (Çobanoğlu, 2008).

| **Esnek poliüretan köpüklerin özellikleri** | |
|---|---|
| Yoğunluk (g/cm$^3$) | 0,032 |
| Modül (MPa) | 0.068 |
| Çekme Mukavemeti (MPa) | 0.19 |
| Uzama (%) | 300 |

Köpük yapımında, silikon polimerleri reaksiyon sırasında köpük kararlılığının sağlanması ve gözenek çaplarının kontrolünü sağlamak amacıyla küçük miktarlarda kullanılmaktadır (Çobanoğlu, 2008).

- **Sert (Rijit) Poliüretanlar**

Sert poliüretan köpükler esnek köpüklere göre yapım tekniği açısından oldukça benzerdir. En önemli farklılık kullanılan poliol bileşenindedir. Sert yapının oluşması için molekül başına üçten fazla hidroksil grubu içeren polieterler kullanılmaktadır. Çizelge 2.3´ de sert poliüretan köpüklerin bazı özellikleri verilmektedir (Chalter, 2006).

**Çizelge 2.2.** Sert Poliüretan köpüklerin özellikleri (Çobanoğlu, 2008)

| **Sert Poliüretan Köpüklerin Özellikleri** | |
|---|---|
| Yoğunluk (g/cm$^3$) | 0,032 |
| Eğilme Modülü (MPa) | 0.482 |
| Çekme Mukavemeti (MPa) | 0.344 |
| Eğilme Mukavemeti (MPa) | 0.413 |
| Basma Mukavemeti (MPa) | 0.344 |

- **Poliüretan elastomerler**

Dökme poliüretan elastomerler, reaktif bir sıvı karışımın karıştırılıp bir kalıba dökülmesiyle elde edilmektedirler. Bu malzemeler yüksek aşınma dirençlerinin yanı sıra yağ, petrol ve polar olmayan solventlere karşı da dayanıklıdırlar. Çizelge 2.4′ de PU ve doğal kauçuk gibi elastomerlerin bazı özellikleri verilmektedir.

**Çizelge 2.3.** Elastomerlerin özellikleri (Charter, 2006)

| Özellik | Elastomer PU | Doğal Kauçuk |
|---|---|---|
| Sertlik (Shore A) | 81 | 71 |
| Modül (MPa) | 13.78 | 15.15 |
| Çekme Gerilmesi (MPa) | 43.43 | 26.20 |
| Uzama (%) | 600 | 440 |

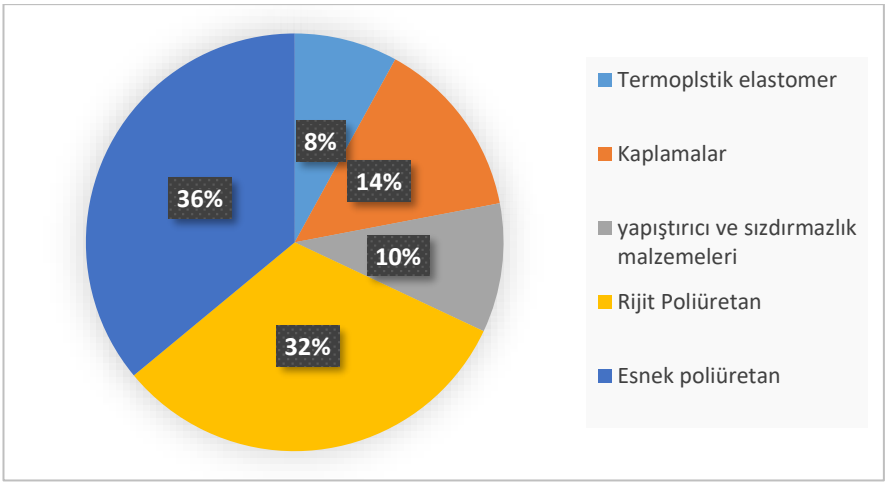
Poliüretan elastomer fiberler ise iki ana yöntemle elde edilmektedir. Birinci solvent (genellikle solvent olarak DMF denilen dimetil form amine kullanılmaktadır) ile spin edilerek ya da belli ekstrüderlerde eritme prosesine tabi tutularak yapılmaktadırlar. Genellikle solvent yöntemi kullanılmakta olup, bu yöntemde kendi içerisinde iki gruba ayrılmaktadır. Birincisinde poliüretan hazır halde solventte çözülüp sisteme ilave edilirken, diğerinde ise poliollar ve izosiyanatların içerisine ilave edilip poliüretan elde edilmesine dayanmaktadır (Charter, 2006)

- **Termoplastik Poliüretan (TPU)**

Dünya poliüretan pazarının büyük bir kısmını oluşturmakla beraber poliüretan plastikler denebilecek katı poliüretanlar, çok yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Bunlar granüller halinde enjeksiyon kalıplamada ya da ekstrüder kullanılarak eriyik prosesle şekillendirilmektedir (Çobanoğlu, 2008). Bu polimerler yüksek mukavemet ve yüksek aşınma direncinin yanı sıra çevre direnci denilen solvent ve benzeri etkilerden de etkilenmeyerek çok önemli bir polimer grubunu oluşturmaktadır. Kablo ve hortum gibi uygulamalarda, ayakkabılar ve yüksek aşınmalı mühendislik uygulamaları kullanım alanlarından bazılarıdır (Lokensgard, 2003).

- **Poliüretan kaplamalar**

Poliüretan kaplamalar, boru hatlarının korozyona karşı korunmasında, suni deride, esnek tekstil kaplamalarında ve film yapıştırıcılarında da kullanılmaktadır (Çobanoğlu, 2008). Boya ve kaplamalarda poliüretan çok yüksek aşınma direnci ile havacılık ve otomotiv sektörünün en önemli hammaddelerinden biri olmaktadır. (Lokensgard, 2003). Farklı yapılı poliüretan malzemelerin pazar payı Şekil 2.5'de açıklanmıştır.




**Şekil 2.2.** Farklı poliüretan ürünlerinin pazar payı (Kemona ve ark., 2020)

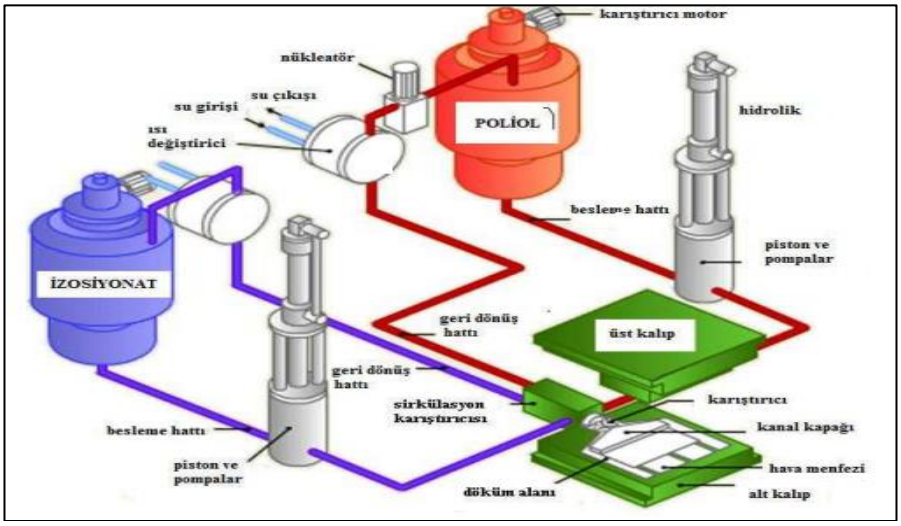
### 2.1.1. Poliüretan Malzemelerin Otomotiv Yan Sanayinde Üretim Prosesleri

Poliüretan malzeme bileşenleri ile çeşitli yöntemlerle üretim yapılabilmektedir. Poliüretan üretim yöntemleri, nihai ürünün özellikleri ve kullanım alanlarına göre belirlenir. Üretim ve proses kurgusu, hammadde seçimi, kullanılacak katkı maddeleri reaksiyon türleri, üretim metodları, proses koşulları, gerekirse yüzey işlemi faktörleri değerlendirilerek yapılır. Farklı poliüretan malzemeler için farklı üretim yöntemleri ve üretim aşamaları mevcuttur. Bunlardan otomotiv sektöründe en çok kullanılan reaksiyon enjeksiyon kalıplama (RIM) ve blok döküm ile üretim yöntemleri;

- Reaksiyon enjeksiyon kalıplama (RIM) ile üretim

RIM parça üretiminde, hazırlanan poliol ve izosiyanatın yüksek basınçlı makineler vasıtasıyla bir kalıba enjeksiyonuyla oluşur. Genellikle termoplastik poliüretanların

üretimi bu şekilde yapılmaktadır (Akdoğan, 2011). Bayer tarafından 1960 yılında geliştirilen bu yöntem, farklı endüstriyel alanlarda da gelişerek büyümüştür. Bu uygulama teknolojisi, dizaynda serbestlik sağlamakta, farklı ebatlarda zor ve karmaşık şekilli parçaların üretimini sağlamaktadır (Çobanoğlu, 2008). Bunların yanı sıra farklı komponentleri birleştirerek kompozit malzeme yapılma taleplerine uygundur. Proseste üretilen ürünün yüzey kalitesi iyi olmakla birlikte elde kullanılan diğer komponentler nihai ürüne hafiflik ve mukavemet kazandırmaktadır. Poliüretan RIM parçalar, ısıl direngenlik, termal izolasyon, boyutsal kararlılık ve yüksek dinamik özellikleri yanı sıra inorganik, organik asitler, diğer potansiyel zarar verici malzemeler ve kimyasallar içeren çözeltilere karşı iyi direnç göstermektedirler. (Saçak, 2005). PU´ı oluşturan sıvılardan biri olan poliol kalıp parçasının fiziksel özelliklerini belirlemektedir. Yoğunluk, sıkışma gücü, elastik modül, renk ve diğer özellikler poliol tarafından belirlenmektedir (Çobanoğlu, 2008). Yeniden dolaşım pompaları ve karıştırıcılar ilk baştaki bileşenlerin homojen bir şekilde karışımını sağlamaktadır. Isı değiştiriciler sıcaklığı sabit tutar, yüksek basınç silindirleri veya pompaları izosiyonat ve poliol karıştırıcı tarafından uygun oranlarda ölçülmektedir. Akış hızı, basınç ve sıcaklık kaliteli kalıp parçaları elde etmek için sürekli kontrol edilmektedir. Şekil 2.6´ da RIM prosesi şematik olarak gösterilmektedir (Çobanoğlu, 2008). Otomobil parçalarından taban ve tavan kaplamaları, kalıpla üretilen NVH grubu parçalar, koltuk içerisindeki sünger parçalar bu şekilde üretilmektedir.

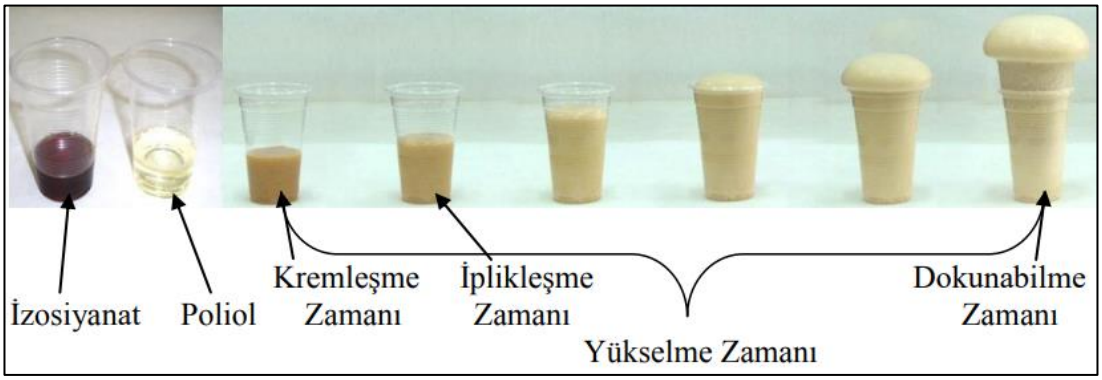



**Şekil 2.3.** RIM prosesi gösterimi (Çobanoğlu, 2008).

Şekil 2.7’ de ise aracın tavan ve taban parçalarının üretim proseslerinin görselleri bununmaktadır.

**Şekil 2.4.** RIM prosesi ile parça üretimi (Akdoğan, 2011)

Poliüretan malzeme ile kullanılacak diğer komponentler öncesinde yada proses sırasında formanır ve kalıp içerisinden PU’ın akması ile gerekli bekleme süresi sonrasında nihai ürün oluşur. Köpük formuna dokunulduğunda yapışmadığı an dokunabilme zamanı yani prosesin tamamlandığı andır. Şekil 2.8’te PU hammaddelerinin sıvı hallerinden katı hale geçişleri (kürleşmesi) açıklanmıştır.

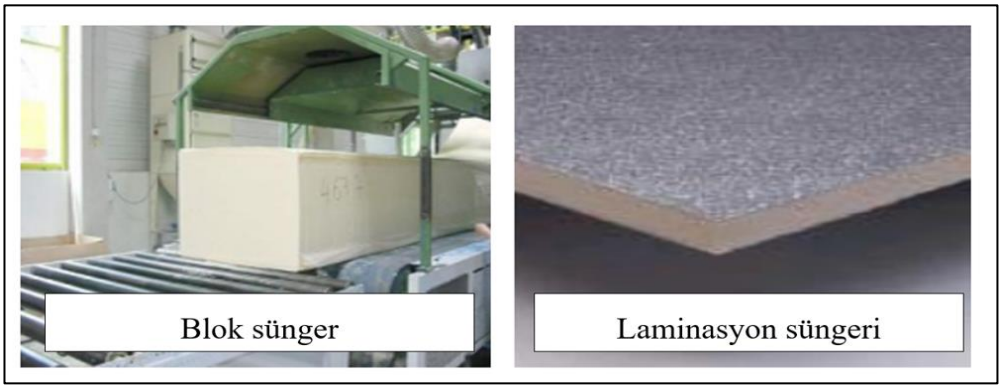



**Şekil 2.5.** Poliüretanın zamana bağlı değişimi (Akdoğan, 2011)

- Blok döküm ile üretim

Poliüretan blok dökümü, poliüretan köpüğün büyük bloklar halinde üretilmesi işlemidir (Akdoğan, 2011). Üretim prosesinde, poliüretan hammadde karışımı, farklı yoğunluklarda, uygun proses parametrelerinde, büyük ebatlı sandık kalıplara veya uzun

blok hatlara pompalarla boşaltılır. Poliüretanın kürleşmesi tamamlandığında proses tamamlanmış olmaktadır. Bu bloklar daha sonra çeşitli endüstriyel ve ticari uygulamalar için kesilir ve şekillendirilir. Buradaki ince tabakalar halinde kesilmiş süngerle, farklı ekstüzyon ürünü polimer parçalar ve tekstil ürünleri ile laminasyon prosesine girebilmektedir. Üretilen parçalar, otomotiv sektöründe, taban ve tavan kaplamalarında, kübik yada prizma şekillerinde kesilerek NVH grubu parçalarda, koltuk içerisindeki kumaşlarda kullanılmaktadır. Şekil 2.9'de blok döküm prosesinden çıkan sünger ve laminasyon sonrası görünümü paylaşılmıştır.




**Şekil 2.6.** Blok sünger ve kesilmiş laminasyon süngeri (Akdoğan, 2011)

## 2.2. Otomotiv Sektöründe Poliüretan Malzeme Kullanımı

Otomotiv sektöründe poliüretan kullanımının bazı nedenleri bulunmaktadır. Bunlar;

- Hafiflik ve Dayanıklılık: Poliüretan, hafif bir malzemedir ve bu da araçların toplam ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırmaktadır. Aynı zamanda dayanıklı ve uzun ömürlü olması nedeniyle araç bileşenlerinin uzun süre dayanıklılığını sağlamaktadır.
- Esneklik ve Mukavemet: Poliüretan, esnek ve güçlü bir malzemedir. Bu özellikleri sayesinde darbelere karşı dayanıklıdır ve araçların çeşitli parçalarında kullanılabilmektedir.
- Yalıtım Özellikleri: Poliüretan, mükemmel ısı ve ses yalıtımı sağlar. Bu nedenle, otomotiv sektöründe motor bölmeleri, kapı panelleri ve zemin kaplamaları gibi

alanlarda kullanılmaktadır. Böylelikle hem yolcu konforunu artmakta hem de enerji verimliliğini sağlanmaktadır.

- Estetik ve Konfor: Poliüretan, otomobil iç mekanlarında yaygın olarak kullanılır. Koltuk döşemeleri, direksiyon simidi kaplamaları ve gösterge panelleri gibi parçalarda estetik bir görünüm ve konfor sağlar. Ayrıca, poliüretan köpükler koltuklarda ergonomik destek sunmaktadır.
- Kimyasal Direnç: Poliüretan, çeşitli kimyasallara karşı dirençlidir. Bu özellik, otomotiv sıvıları ve yağlarıyla temas eden parçalar için idealdir. Örneğin, yakıt hortumları ve contalar poliüretandan yapılabilmektedir.
- Kolay İşlenebilirlik: Poliüretan, farklı şekil ve boyutlarda kolayca üretilebilir. Bu, otomotiv parçalarının tasarımında büyük esneklik sağlar ve karmaşık şekillerin ve detayların üretilmesine olanak tanımaktadır.
- Maliyet Etkinliği: Poliüretan malzemeler genellikle maliyet açısından etkilidir. Üretim süreçleri genellikle hızlı ve ekonomiktir, bu da otomobil üreticilerinin maliyetleri düşürmesine yardımcı olmaktadır.

## 2.3. Poliüretan Kullanımının Çevresel Değerlendirilmesi

Geniş bir kullanım yelpazesine sahip olan poliüretanın üretimi ve kullanımı çevresel etkiler açısından endişeye yol açmaktadır. Poliüretan kullanımının çevresel etkileri;

Üretim Süreci: Poliüretan üretiminde kullanılan hammaddeler genellikle petrolden türetilir. Bu durum, fosil yakıtların çıkarılması ve işlenmesi sırasında çevresel zararlar yaratmaktadır. Ayrıca, üretim sürecinde yüksek enerji tüketimi ve sera gazı salınımı söz konusudur.

Kimyasal Bileşenler: Poliüretan üretiminde kullanılan izosiyanatlar, insan sağlığına zararlı olabilen kimyasal bileşenlerdir. Bu maddeler, üretim sırasında çalışanların sağlığını tehdit etmektedir ve uygun şekilde yönetilmediğinde çevresel alıcı ortamlara

salınma riski bulunmaktadır. Kimyasallarla çalışırken veya bu kimyasalları kullanırken sağlığın ve güvenliğin korunmasını sağlamak amacıyla hazırlanan güvenlik bilgi formları (GBF), poliüretan hammaddelerinden isosiyanat Şekil 2.10 ve poliyol Şekil 2.11 deki unsurlara sahiptir.

| Poliüretan Hammaddelerinden İsosiyanat etiket unsurları (Güvenlik Bilgi Formu) |
|---|
| Piktogram: |
| |
| Sinyal kelime: Tehlikeli / Sağlığa zararlı |
| Zararlılık İfadeleri: |
| H315 Cilt tahrişine neden olur. |
| H317 Alerjik deri reaksiyonuna neden olabilir. |
| H319 Ciddi göz hasarına neden olur. |
| H332 Solunduğunda sağlığa zararlıdır |
| H334 Solunması halinde alerji, astım belirtilerine veya solunum güçlüğüne neden olabilir. |
| H335 Solunum sistemini tahriş edebilir. |
| H351 Kanserojen etki şüphesi |
| H373 Uzun süreli veya tekrarlanan soluma yoluyla maruz kalma ile organlarda hasar meydana getirebilir. |

**Şekil 2.7**. İsosiyanat Güvenlik Bilgi Formu tehlike unsurları

| Poliüretan Hammaddelerinden Poliol tehlike etiket unsurları (Güvenlik Bilgi Formu) |
|---|
| Piktogram: |
| |
| Sinyal kelime: Tehlikeli |
| Zararlılık İfadeleri: |
| H302 Yutulması halinde zararlıdır. |

**Şekil 2.8**. Poliol Güvenlik Bilgi Formu tehlike unsurları

Atık Yönetimi: Poliüretan ürünlerin ömrü sona erdiğinde, genellikle biyolojik olarak parçalanamazlar ve atık depolama alanlarına gönderilirler. Bu durumun, atık yönetimi sorunlarına yol açma ve uzun vadede çevreye zarar verme riski bulunmaktadır.

Geri Dönüşüm Zorlukları: Poliüretanların geri dönüştürülmesi termoplastik malzemelere göre zordur. Mekanik geri dönüşüm yöntemleri, malzemenin kalitesini düşürebilmektedir. Kimyasal geri dönüşüm yöntemleri ise karmaşık ve maliyetli olabilmektedir.

Toksik Emisyonlar: Üretim prosesleri, yanma veya yanlış bertaraf edilme durumunda, poliüretan ürünler toksik gazlar salabilmektedir. Bu gazlar hava kirliliğine neden olmakta ve insan sağlığı için tehlike oluşturmaktadır.

### 2.3.1. Poliüretan üretiminde alternatif çevreci hammaddelerin kullanımı

Sentetik poliüretan malzemeler biyolojik olarak parçalanamaz, pahalıdır, zehirlidir ve artık tükenmekte olan petrokimya bazlı hammaddelere sahiptir.

Biyo bazlı poliüretanlar, atıkların azaltılması ve sürdürülebilirliğin desteklenmesine yönelik çevresel hedeflerin desteklenmesinde önemli bir rol oynayabilen günümüzün en esnek malzemelerinden biridir. PU malzemelerin geleneksel petrol bazlı ham hammaddelerin yanı sıra kullanılan alternatif hammaddeler son yıllarda önemli gelişme göstermiştir (Kaur ve ark., 2022).

Alternatif hammaddeler; yağ asitleri, proteinler, karbonhidratlar, bitkisel yağlar, nişasta, selüloz, polisakkaritler ve çeşitli tarm ürünleri ile bunların yan ürünleridir (Kaur ve ark., 2022).

Poliüretan üretmek için alternatif hammadde kullanımı yenilenemeyen petrol türevli kaynakların kullanılmasındaki olumsuz etkileri azaltır ve sürdürülebilir çözümler sunar. Son on yılda, çeşitli araştırma grupları biyopoliol bazlı poliüretanların sentezine yönelik ödüllendirici çabalar sarf etmiştir (Peyton ve ark., 2020). Polioller yumuşak segmentler gibi davranır, esnekliği iletir ve poliüretanlarda elastomerik özellikler sergiler (De Souza ve Ark., 2021). Bitkisel yağlardan elde edilen polioller kapsamlı araştırmaların konusu olmuştur. Yapılan araştırmalarla istenen özelliklere sahip poliolü başarıyla sağlamış olup, biyo bazlı izosiyanat petrokimyasal bazlı izosiyanatların yerine

kullanıldığında toksisite ortadan kaldırılır. Ayrıca bu malzemeler unlar PU'a su direnci, iyi mekanik mukavemet ve esneklik kazandırır (Valero ve ark.,2012).

Poliüretan üretiminden kaynaklanan katı atık kirliliği, ekonomik değerlendirmeler ve hammaddelerin kolay bulunabilirliği gibi zorlukları çözmek için geliştirilen biyo bazlı poliüretan malzemelerin petrol bazlı Poliüretanlarla kıyaslananması oluşturuldu. Biyo bazlı PU ve petro bazlı PUpu'nun özelliklerinin karşılaştırması çizelge 2.5.'te verilmiştir.

**Çizelge 2.4.** Biyo bazlı ve petrol bazlı PU özellikleri (Kaur ve ark., 2022)

| Özellik | Biyo Bazlı Poliüretan | Petrol Bazlı Poliüretan |
|---|---|---|
| Yoğunluk ($kg/m^3$) | 112-181 | 141-181 |
| Isı İletkenliği ($Wm^{-1}*K^{-1}$) | 0,06-0,0540 | 0,054 |
| Uçucu Organik Bileşik ($\mu g*m^{-3}$) | 61–91 ◦C'de algılanmadı | 61–91 ◦C'de algılanmadı |
| Basınç Dayanımı ($N*mm^{-2}$) | 111-171 | 58 |
| Çekme Dayanımı ($N*mm^{-2}$) | 1,4-1,6 | 0,84 |
| Eğilme Mukavemeti ($N*mm^{-2}$) | 2,7-3,5 | 1,88 |
| Eğilme Gerilimi ($N*mm^{-2}$) | 1,55 | 1,5 |
| Su Absorbsiyonu ($kg*m^{-3}$) | 0,3 | 0,24 |

Geliştirilen biyo bazlı poliüretan malzemeler, günümüzde farklı mühendislik ve ev uygulamalarında kullanılmaktadır. Yalıtım malzemeleri, otomotiv sektörü, yatak ve mobilyalar, ayakkabılar, rafting botları, ambalaj köpükleri, biyo bazlı poliüretan malzemelerin kullanıldığı alanlardır (Kaur ve ark., 2022). PU köpükleri sağlık sektöründe biyomedikal uygulamalarda da yerini almıştır. PU köpüklerin yara pansumanı amacıyla kullanılmaktadır (Agrawal ve ark., 2019). Biyoaktif özellikleri arttırmak için, tanınmış bir bitkisel yara iyileştirici ajan olan asiaticoside ve antibakteriyel aktiviteye yönelik gümüş nanopartiküller kullanılmaktadır (Agrawal ve ark., 2019). Dermal yanıklar veya aşınma yaraları olan insan hastalarda yapılan deneyler sonucunda enfekte olmayan ve daha hızlı iyileşen yaralar olduğu sonucuna varılmıştır (Agrawal ve ark., 2019).

### 2.3.2. Poliüretan geri dönüşümü, geri kazanımı ve bertarafı

Poliüretan üretimi, her gün 1 milyon $m^3$'ten fazla gerçekleşmesi nedeniyle, ticari başarısının yanı sıra, çok miktarda atık üretiliyor olması ve prosesindeki yönetsel riskler nedeniyle, çevresel çözüm ihtiyacı olan alanlardan biridir (Kaur ve ark., 2022).

Poliüretanların uzun yaşam döngüleri (>10 yıl) nedeniyle, bunların atık depolanma faaliyetleri hakkında sınırlı bilgi mevcuttur. Günümüz dünyasının plastik malzemelerin karşı karşıya olduğu sorunlardan, atık halinin karlı hale dönüştürülmesi amacıyla geri dönüştürülmesi poliüretan için de söz konusudur (Kaur ve ark., 2022).

Bunun için en yaygın kullanılan yöntem, polimerin yapısal özelliklerini değişmediği fiziksel geri dönüşüm işlemidir. Polimerik atıklar, fiziksel proseslerde yeni malzeme üretiminde kullanılmak üzere toza, pullara veya granüllere dönüştürülür. Aşağıda sıralanmış yöntemler, poliüretan için fiziksel geri dönüşüm işlemleridir;

1. Yeniden yapıştırma: Esnek PU köpük daha küçük parçalara kesilerek spor matları ve halı döşemelerinin imalatında kullanılır (Simon ve ark., 2018).

2. Yeniden öğütme veya toz haline getirme: Toz haline getirilmiş PU atığı, yeni PU ürünleri oluşturmak için işlenmemiş reaktiflerden biriyle (genellikle ağırlıkça %30'a kadar poliol ile) harmanlanır (Simon ve ark., 2018).

3. Sıkıştırmalı Kalıplama: Toz halindeki PU atığı kalıp içerisinde yüksek ısı ve basınca maruz bırakılır. Yaklaşık %100’e kadar geri dönüştürülmüş madde elde edilmesini sağlayabilir. Bu fiziksel prosedürler termoplastik polimerler için faydalıdır ancak termoset PU'un termostabil doğası nedeniyle bunlar üzerinde etkisizdir. Bu süreç, poliüretan (PU) artıklarının yastık dolgusu olarak yeniden değerlendirilmesine yönelik ilk çabalardan, geri dönüşüm maddelerini içeren en yeni kimyasal işlemlerden birine kadar benimsenmiştir yeşil ve sürdürülebilirdir (Kaur ve ark., 2022).

Kimyasal geri dönüşüm ise, petrokimya endüstrisinde üretim kaynağı ve kimyasal sentez malzemeleri olarak kullanılabilecek monomerler (üçüncül geri dönüşüm) adı

verilen temel hidrokarbon varlıklarının üretimini sağlar. Bu yöntemi kullanarak ek değere sahip öğeler elde etmek mümkün olmaktadır (Kaur ve ark., 2022).

Kimyasal poliüretan geri dönüşüm yöntemleri, uygulama metodu, sistem girdi ve çıktıları ile büyük ölçeklerde uygulama imkanları değerlendirilerek Çizelge 2.6' da sunulmuştur.

**Çizelge 2.5**. Kimyasal poliüretan geri dönüşüm yöntemlerinin kıyaslanması

| Metod | Girdi | Çıktı | Büyük ölçekte uygulama |
|---|---|---|---|
| Hidroliz | EOL ürünleri - üretim artıkları | Polyol, amin ara ürünleri | Yok |
| Hidroglikoliz | EOL ürünleri - üretim artıkları | Polyol | Yok |
| Aminoliz | Sadece sünger | İki veya çok fonksiyonlu aminler ve alkoller | Yok |
| Fosforoliz | Üretim artıkları | Fosfor içeren poliüretanlar | Yok |
| Glikoliz | Sünger (rijit ve esnek olarak ayrılmış) | Poliol | Var |
| Gazifikasyon | EOL ürünleri - üretim artıkları | Singaz (sentez gazı) | Var |
| Piroliz | EOL ürünleri - üretim artıkları | Yağ, gaz, kül | Yok |
| Hidrojenasyon | EOL ürünleri - üretim artıkları | Gaz, yağ | Yok |

Biyobozunma, organik maddelerin canlı organizmalar veya onların enzimleri tarafından parçalanması anlamına gelir. Polimer zincirlerinin kısalmasına ve bazı kısımlarının ortadan kalkmasına neden olur. Bu, moleküler ağırlığının azalmasına yol açar ve uygun koşullarda, bozunmuş malzemenin tamamen mineralleşmesine bile yol açabilir. Bununla birlikte, daha büyük polimerlerin tamamen bozunması genellikle birkaç farklı organizmanın iş birliğini gerektirir. Birkaç aşamadan oluşabilen bu durum polimerin

monomerlere dönüştürülmesi, bunların daha basit bileşiklere indirgenmesi ve nihai olarak karbondioksit, su ve metana parçalanması (anaerobik koşullar altında) ile oluşur.

Biyolojik bozunma, yüksek sıcaklıklar ve karmaşık reaktifler gerektirmediği için genellikle kimyasal bozunmaya göre daha çevre dostu olarak görülmektedir (Shah ve ark 2020) Biyolojik bozunma; fungal biyolojik bozunma, bakteriyel biyolojik bozunma ve enzimatik bozunma olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadır.

Polyester poliüretanlar biyolojik bozulmaya polieter olanlardan çok daha duyarlıdır. Mantar uygulanmasıyla yapılan araştırmalar, polieterlere göre daha iyi sonuçlar sağmıştır (Kemona ve ark 2020)

Poliüretanlar büyük parçacıklardan oluştuğundan ve oldukça dirençli oldukları bilindiğinden, poliüretanların bozunmasını incelemek için geçerli olan sistemler, çöp sahası sızıntı suyunda, polimer fabrikalarının kanalizasyon suyunda ve toprakta bulunabilen mikrobiyal topluluklardan yararlanmaktadır. Çeşitli poliüretan numunelerinin farklı bozunma modelleri, farklı PU'ların, kristallik, moleküler yönelim veya çapraz bağlanma gibi enzimatik bozunma için kimyasal bağların erişilebilirliğini belirleyen spesifik özelliklerinden kaynaklanır. Poliüretanların amorf bölgeleri, daha iyi erişilebilirliklerinden dolayı kristal bölgelere göre bozunmaya daha duyarlıdır (Howart ve ark 2002). PU bölünmesinden sorumlu olduğu belirlenen enzimlerin çoğu hidrolaz sınıfına aittir.

Poliüretandan enerji geri kazanımı ise, hammadde geri kazanımında daha az kazanç sağladığı için, sadece herhangi bir geri dönüşüm yöntemiyle işlenemeyen poliüretanlar için, uygulanmaktadır (Kemona ve ark., 2020). Bu prosesin en önemli avantajı kontamine olmuş, freon ile köpürtülmüş veya ahşap, deri veya kumaşa kalıcı olarak bağlanmış poliüretanlara uygulama imkânı sağlamasıdır. Yakma işlemlerinden elde edilen malzemelerin geri kazanılması mümkün olmamakla birlikte yüksek %99'a kadar hacimsel azalmaya neden olur.

Bu yöntemin en önemli problemlerinden biri, poliüretan malzemelerde, kullanıcıların güvenliğini artırmak için uygulanan alev geciktiricilerin varlığıdır (Paabo ve ark., 1987). Bu katkı maddeleri enerji geri kazanımını zorlaştırmakta, hatta imkansız hale getirmektedir (Kemona ve ark., 2020). Ayrıca, yüksek sıcaklıklar uygulandığında PU köpükler karbon monoksit, hidrojen siyanür ve nitrojen oksitler gibi toksik bileşikleri ve kanserojenleri açığa çıkarabilmektedir (Paabo ve ark., 1987). Poliüretan malzemeler aerobik koşullar altında termal bozulma ile yüksek toksisite gösterir ve nitrojen oksit miktarı kabul edilebilir seviyelerin oldukça üzerine çıkabilmektedir (2,5 katına kadar), piroliz durumunda ise 550 $^{0}$C'deki eşiği yalnızca biraz aşar ve daha yüksek sıcaklık standartları korunur (Yang ve ark., 2012) Yanma sonucu oluşan gazlar aynı zamanda yüksek toksisiteye sahip bileşikler olan izosiyanatları da içerebilir. Bunlara maruz kalmak ciltte, gözlerde ve solunum sistemi tahrişe neden olabilmektedir. Bu durum 0,02 ppm'lik bir maruziyet bile izosiyanata bağlı astıma yol açabilmekte, daha yüksek seviyeler pnömotoraksa neden olabilmektedir (Kemona ve ark., 2020).

Enerji geri kazanımı sırasında toksik bileşikleri azaltacak yakma koşullarının belirlenmesine yönelik çalışmalar bulunsa da bunlar daha çok deneyseldir ve uygulamada oldukça zorlukları mevcuttur (Kemona ve ark., 2020). Yüksek sıcaklıklarda daha az poliklorodibenzeno-p-dioksin ve furan bulunurken, NO ve HCN gibi N içeren bileşiklerin yükü daha yüksek seviyelere ulaşır (Garrido ve ark., 2017).

Tüm zorluklarına rağmen, depolama yerine termal bozunmaya tabi tutulan poliüretan atık yüzdesindeki artışa ilişkin ciddi argüman, üretilen enerji miktarıdır. Bu miktar kömürün yakılmasıyla karşılaştırılabilir, akaryakıttan elde edilen enerjidense biraz daha düşük seviyededir (Kemona ve ark., 2020).

Poliüretanların yanması sırasında açığa çıkan enerji miktarı, malzemenin kimyasal bileşimine, yoğunluğuna ve diğer fiziksel özelliklerine bağlı olsa da genel olarak, poliüretan köpüğün yanması sırasında yaklaşık olarak 25-30 MJ/kg enerji açığa çıkar. Bu değer, poliüretanın yanması sırasında ortaya çıkan enerji miktarının, birçok diğer plastik malzemeye kıyasla oldukça yüksek olduğunu gösterir (www.nist.gov).

Poliüretan geri dönüşüm ve bozunma yöntemleri; uygulama metodu, reaksiyon koşulları, çevresel etkileri ile büyük ölçeklerde uygulama imkanları değerlendirilerek Çizelge 2.7'de sunulmuştur.

**Çizelge 2.6.** Poliüretan geri dönüşüm ve bozunma yöntemlerinin karşılaştırılması (Kemona ve ark., 2020)

| Metod | Büyük ölçekte uygulama | Reaksiyon koşulları | Çevresel etki |
|---|---|---|---|
| Depolama | Var | Orta zorlukta | *Yangın olasılığı<br>* Arazi kullanımı<br>*Çevrede kümülatif birikim riski<br>*Tüketim sonrası atıklar için uygulanabilir |
| Mekanik geri dönüşüm | Var | Zor | *Yalnızca üretim sonrası atıklara uygulanır<br>*Bazı prosesler yüksek sıcaklık ve basınç gerektirir |
| Kimyasal geri dönüşüm | Yanlızca glikoliz var | Çok zor | *Yüksek sıcaklık ve basınç gerektirir<br>*Organik solventler, katalizörler gibi potansiyel olarak tehlikeli kimyasallara ihtiyaç vardır<br>*Tüketim sonrası atıklar için uygulanabilir |
| Enerji geri kazanımı | Var | Çok zor | *Zehirli duman salınımı<br>*Küllerin depolanması gerekliliği<br>*Tüketim sonrası atıklar için uygulanabilir |
| Biyolojik bozunma | Var | Orta zorlukta | *Toksik bileşiklerin salınma olasılığı<br>*Tüketim sonrası atıklar için uygulanabilir<br>* Atıkların tamamen mineralleşmesine yol açabilir<br>*Mevcut depolama alanlarına uygulanabilir |

Poliüretan atık yönetiminde bir çok yol olmakla birlikte hepsinin gelişim alanı mevcuttur. Düzenli depolama şu anda poliüretan atıkların bertaraf edilmesinde en çok uygulanan yöntem olsa da çevresel tercih edilebilir değildir. Sıklıkla kullanılan bir diğer yöntem olan mekanik geri dönüşüm olmakla birlikte uygulama zorlukları ve yüksek enerji gerekliliği mevcuttur. Kimyasal geri dönüşüm ise yüksek sıcaklık ihtiyacı ve tehlikeli reaktiflere gerekliliği nedeniyle büyük ölçekte uygulanmaktadır. Biyolojik bozunma orta düzeyde bir sıcaklık gerektirmekte ve herhangi bir tehlikeli kimyasal gerektirmemektedir, ancak teknolojik ölçekte uygulanabilmesi için hala uzun bir yol vardır. Özellikle biyolojik bozunma, çok çeşitli olasılıklar ve mevcut modifikasyonlar

nedeniyle önü açık yöntem olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, PU sentezi sırasında uygun şekilde değiştirilmiş yapı taşlarının kullanılması, parçalanabilir polimerlerle sonuçlanır ve bu iki yaklaşımın birleştirilmesi, poliüretan atık yönetimi için uygun bir çözüm olarak düşünülebilmektedir.

## 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışmanın, aracın yıllar içerisindeki malzeme değişimi bölümünde, ülkemizde geniş kullanım kitlesine sahip modelinde, 2008-2013-2020 yılları analiz edilmiştir. Bunun için otomotiv sektöründe tercih edilen bir benchmarking (kıyaslama) programı kullanılmıştır. Program ile 3 yılda da yeni tasarımla piyasaya çıkan binek araçta, öncelikle aracın ana bölümlerine göre malzemeler gruplandırılmıştır. Her ana gruptaki PU malzeme kullanımları ayrı ayrı değerlendirilmiş, zamana bağlı değişimler her bir PU içerikli parça ile ortaya konmuştur.

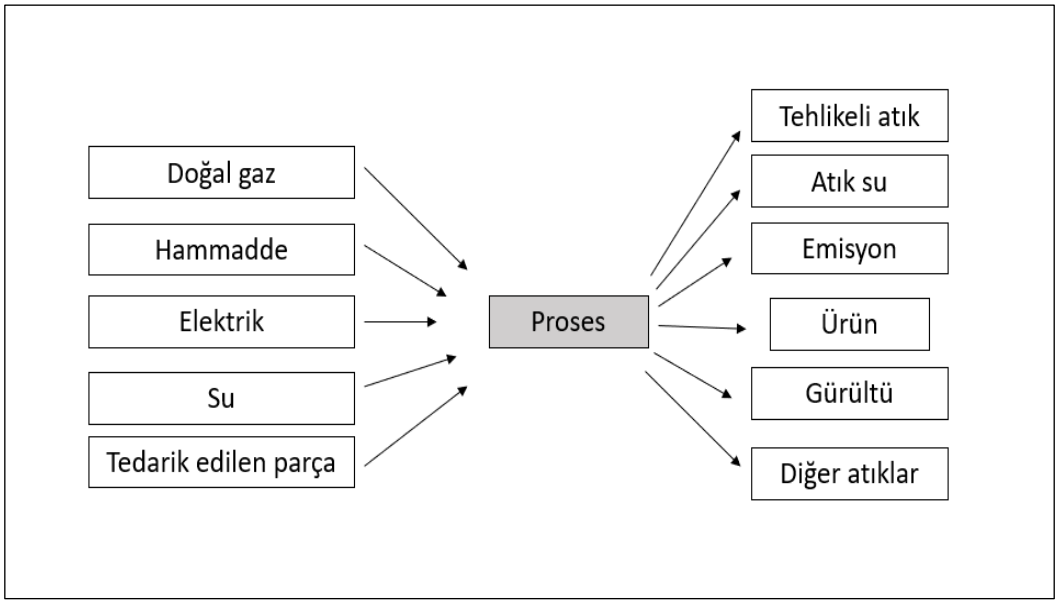
Her bir PU içerikli malzemelerin bağlı oldukları araç ana gruplarından en fazla kütlesel orana sahip olan parçaların detaylı proses akış şemaları oluşturulmuş, çevresel boyutları değerlendirilmiştir.

En fazla PU kütlesel oranına ait koltuk üretim proseslerinden edilen firma ve proses bilgileri Çizelge 3.1'deki gibi sunulmaktadır.

**Çizelge 3.1.** En fazla PU kütlesel oranına sahip koltuk üretim proseslerine ait bilgiler

| Firma Bilgisi | Araç Ana grubu | Proses |
|---|---|---|
| Firma A | Koltuk üretimi | Kılıf üretimi |
| | | Sünger üretimi |

Koltuk üretimi gruplarına ait tüm prosesler için Şekil 3.1.'deki girdilerle çevre boyutları değerlendirilmiştir.




**Şekil 3.1.** En fazla PU kütlesel oranına koltuk parçaların proseslerine ait bilgiler

PU kütlesel oranına ikinci sırada sahip olan iç mekan parçalarından taban paspası üretimindeki proses atıkları ve termal formlama sırasında açığa çıkan emisyonlar ayrıca değerlendirilmiştir.

2008-2013-2020 yılları içerisindeki PU malzemenin kullanımına göre Simapro 9.5.0.2 programında Ecoinvent 3.9.1 veri tabanı ile PU hammadde kaynaklı emisyon miktarını hesaplanmıştır.

## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Poliüretan malzeme kullanımının zamana bağlı değişimini analiz etmek için aynı aracın 2008, 2013 ve 2020 yıllarında çıkan modelleri değerlendirilmiştir. 3 araç modeli de binek ve SUV gövdeye sahiptir. 2008 ve 2013 yıllarında çıkan modeller dizel araç olup, 2.0 motor kapasitesine sahipken, 2020 model hibrit benzin + elektrikli yakıt tipine ve 2.5 motor kapasitesine sahiptir. Çizelge 4.1'de araçların genel özellikleri paylaşılmıştır.

**Çizelge 4.1.** Analiz edilen araçların model yılları ve araç bilgileri

| Model Yılı | 2008 | 2013 | 2020 |
|---|---|---|---|
| Araç tipi | Binek araç | Binek araç | Binek araç |
| Pazarı | Avrupa | Avrupa | Avrupa |
| Gövde tipi | SUV | SUV | SUV |
| Yakıt tipi | Dizel | Dizel | Hibrit benzin + elektrikli |
| Motor kapasitesi ($cm^3$) | 1997 (2.0) | 1997 (2.0) | 2500 (2.5) |
| Emisyon standardı | - | Euro 5 | Euro 6 |
| $CO_2$ Emisyonu (g/km) | - | 154 | 32 |

### 4.1. 2008 Model Araç Analizi

2008 model aracın tamamı analiz edilmiş, araçtaki malzeme gruplarına göre malzeme türleri, ağırlıkları ve tüm araç içerisindeki ağırlık oranları Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

**Çizelge 4.2.** 2008 model aracın malzeme ve ağırlık bilgileri

| Malzeme Grubu | Malzeme | Ağırlık (kg) | Ağırlık % |
|---|---|---|---|
| Plastik | ABS | 4,978 | 0,30% |
| Elastomer | EPDM | 12,879 | 0,79% |
| Plastik | PA | 15,357 | 0,94% |
| Plastik | PBT-PET | 2,685 | 0,16% |
| Plastik | POM | 0,055 | 0,00% |
| Plastik | PP | 72,709 | 4,45% |
| Plastik | PU | 13,467 | 0,82% |

**Çizelge 4.1.** Analiz edilen araçların model yılları ve araç bilgileri (devam)

| | | | |
|---|---|---|---|
| Plastik | PE | 11,065 | 0,68% |
| Plastik | ASA-SMA | 0,426 | 0,03% |
| Akışkan | Akışkanlar | 69,516 | 4,25% |
| Metal | Çelik | 809,884 | 49,55% |
| Metal+Diğerleri | Metal+Plastik | 49,378 | 3,02% |
| Kaplama | Halı | 12,134 | 0,74% |
| Cam | Cam | 27,136 | 1,66% |
| Plastik | PVC | 0,75 | 0,05% |
| Plastik | PPO-PPE-PPS | 0,013 | 0,00% |
| Plastik | PC | 7,176 | 0,44% |
| Plastik | Diğer plastikler | 11,294 | 0,69% |
| Kaplama | Kumaş | 3,997 | 0,24% |
| Yalıtım malzemeleri | Elyaf | 4,24 | 0,26% |
| Elastomer | Diğer elastomerler | 1,115 | 0,07% |
| Diğer | Çeşitli bileşenler | 257,818 | 15,77% |
| Plastik | ABS-PC | 1,525 | 0,09% |
| Plastik | TPV-TPE | 0,116 | 0,01% |
| Elastomer | CR | 0,922 | 0,06% |
| Elastomer | NR | 0,775 | 0,05% |
| Metal | Alaşım | 87,172 | 5,33% |
| Metal+Diğerleri | Metal+Elastomerler | 70,67 | 4,32% |
| Yalıtım malzemeleri | Halılar ve ses yalıtımı | 0,291 | 0,02% |
| Diğer | Kablolar | 21,796 | 1,33% |
| Metal | Döküm demir | 57,45 | 3,51% |
| Diğer | Elektrik motoru | 5,692 | 0,35% |
| Malzeme toplamı (kg) | | 1634,48 | |
| Bağlantı elemanları (kg) | | 31,62 | |
| TOPLAM (kg) | | 1666,10 | |

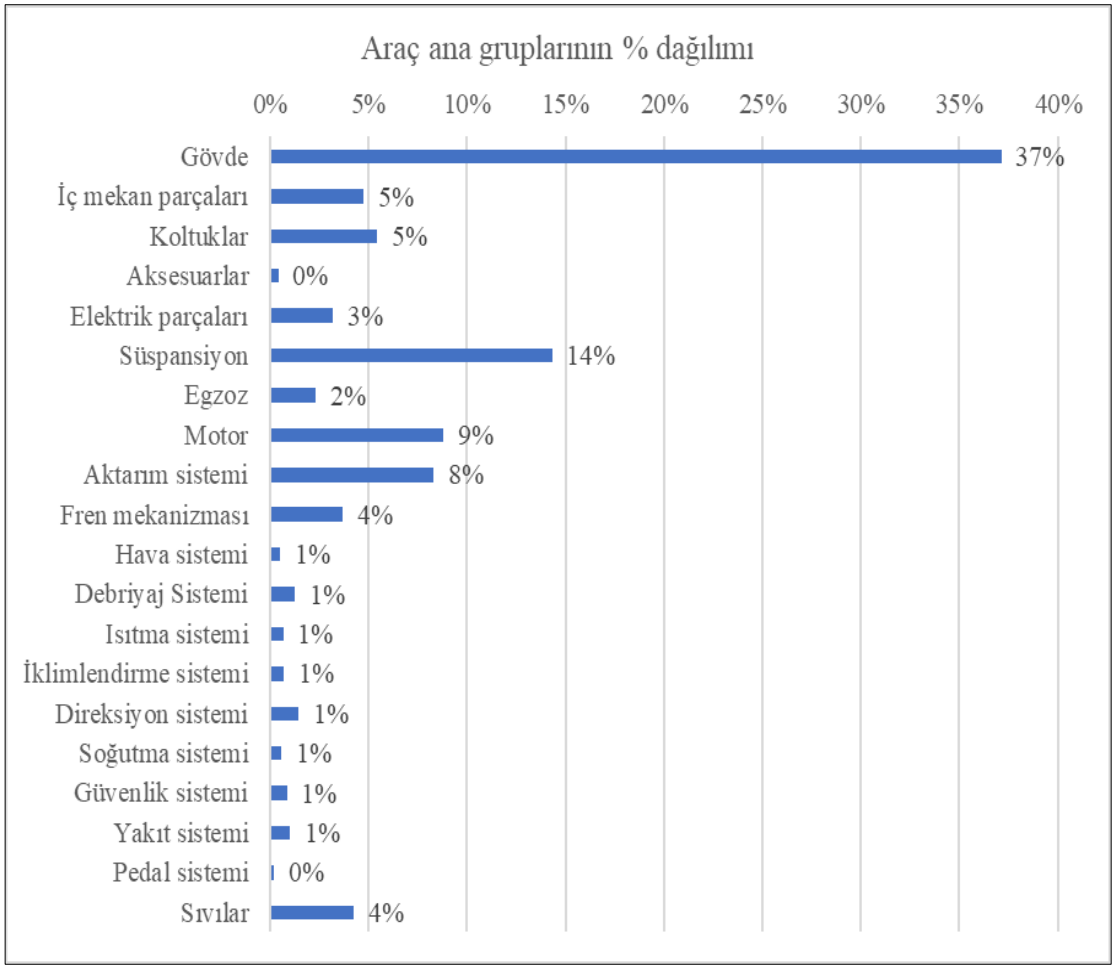
En yüksek ağırlığa sahip malzeme 809,884 kg ve 49,55% oranla çelikken ikinci sırada 257,818 kg ve 15,77% oranla çeşitli bileşenler olarak sınıflandırılan, içeriği net olarak sınıflandırılmayan malzemelerdir. Poliüretan malzeme ise tüm araç değerlendirildiğinde 13,467 kg ile %0,82 orana sahiptir.

Aracı meydana getiren sistem ana gruplarına göre ağırlıklar değerlendirildiğinde Çizelge 4.3 elde edilmiştir. Buna göre en ağır ana grup 607,42 kg'a sahip gövdeyken ikinci sırada 234,56 kg'la süspansiyon sistemi yer almaktadır.

**Çizelge 4.3.** 2008 model aracın sistem ana gruplarının ağırlıkları

| Sistem ana grubu -2008 | Ağırlık (kg) |
|---|---|
| Gövde | 607,42 |
| İç mekan parçaları | 77,39 |
| Koltuklar | 89,11 |
| Aksesuarlar | 7,03 |
| Elektrik parçaları | 52,06 |
| Süspansiyon | 234,56 |
| Egzoz | 38,11 |
| Motor | 143,73 |
| Aktarım sistemi | 135,41 |
| Fren mekanizması | 60,77 |
| Hava sistemi | 8,44 |
| Debriyaj Sistemi | 20,55 |
| Isıtma sistemi | 10,98 |
| İklimlendirme sistemi | 11,54 |
| Direksiyon sistemi | 23,89 |
| Soğutma sistemi | 9,84 |
| Güvenlik sistemi | 14,15 |
| Yakıt sistemi | 16,63 |
| Pedal sistemi | 3,46 |
| Sıvılar | 69,45 |
| Araç ağırlığı | 1634,48 |

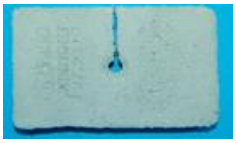
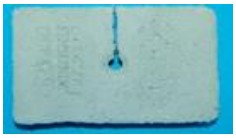
Şekil 4.1'de ise araç ana gruplarının aracın tamamına ağırlık oranları verilmiştir. Gövde %37, süspansiyon %14 ağırlık oranına sahiptir.




**Şekil 4.1.** 2008 model aracın sistem ana gruplarının ağırlıkları

Araç içerisinde 13,467 kg poliüretan malzemenin hangi sistemde, hangi ağırlıklarda ve hangi formlarda bulunduğu analiz edilerek Çizelge 4.4 oluşturulmuştur. Buna göre 9,987 kg'la, sistem ana grubu ağırlığına göre en yüksek orana sahip (%11) koltuk, ikinci en yüksek orana sahip grup ise 3,282 kg ve % 4 oranla iç mekan parçaları olmuştur.

**Çizelge 4.4.** 2008 model aracın sistem ana grubu ve alt gruplarına göre PU parçaların formları ve ağırlıkları

| Sistem ana grubu | Alt Grup | PU parça görseli | Parçanın PU Ağırlığı (kg) | Ana Sistemin PU Ağırlığı (kg) | Ana Sistem Ağırlığı (kg) | PU Dağılımı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| İç mekan parçaları | Ses Yalıtımı → Ön Çamurluk Yalıtımı → Arka Sol | | 0,16 | 3,282 | 77,385 | 4% |
| | Ses Yalıtımı → Ön Çamurluk Yalıtımı → Arka Sağ | | 0,16 | | | |
| | Ses Yalıtımı → Ön Çamurluk Yalıtımı → Sol → Üst |  | 0,028 | | | |
| | Ses Yalıtımı → Ön Çamurluk Yalıtımı → Sağ → Üst |  | 0,029 | | | |
| | Trim Parçaları → Tavan Kaplaması Dolgusu | | 2,905 | | | |
| Süspansiyon | Amortisörler → Ön → Süspansiyon takozu | | 0,045 | 0,12 | 234,56 | 0% |
| | Amortisörler → Arka → Süspansiyon takozu | | 0,075 | | | |
| Isıtma sistemi | Isıtma Sistemi → Radyatör Sistemi → Tampon | | 0,075 | 0,075 | 10,976 | 1% |

**Çizelge 4.4.** 2008 model aracın sistem ana grubu ve alt gruplarına göre PU parçaların formları ve ağırlıkları (devam)

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Koltuklar | Sürücü → Sırt → Ped | | 1,096 | 9,987 | 89,106 | 11% |
| | Sürücü → Oturak → Ped | | 1,051 | | | |
| | Yolcu → Sırt → Ped | | 1,094 | | | |
| | Yolcu → Oturak → Pedi | | 1,023 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 1-3 → Oturak → Pedi | | 1,155 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 2-3 → Baş Desteği → İç Taraf → Dolgu | | 0,063 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 1-3 → Sırt → Pedi | | 0,939 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 2-3 Dış Baş Desteği → Dolgu | | 0,091 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 2-3 → Oturak → Pedi | | 1,936 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 2-3 → Sırt → Pedi | | 1,539 | | | |

### 4.2. 2013 Model Araç Analizi

2013 model aracın analizine göre, araçtaki malzeme grupları, malzeme türleri, ağırlıkları ve tüm araç içerisindeki ağırlık oranları Çizelge 4.5'de sunulmuştur.

**Çizelge 4.5**. 2013 model aracın malzeme ve ağırlık bilgileri

| Malzeme Grubu | Malzeme | Ağırlık (kg) | Ağırlık % |
|---|---|---|---|
| Elastomer | Elastormerler | 0,2544 | 0,01% |
| Plastik | ABS | 6,048 | 0,35% |
| Elastomers | EPDM | 3,525 | 0,21% |
| Plastik | PA | 11,286 | 0,66% |
| Plastik | PBT,PET | 2,5 | 0,15% |
| Plastik | POM | 2,483 | 0,14% |
| Plastik | PP | 74,337 | 4,33% |
| Plastik | PU | 17,927 | 1,04% |
| Plastik | PE | 10,154 | 0,59% |
| Plastik | ASA-SMA | 0,624 | 0,04% |
| Akışkan | Akışkanlar | 75,792 | 4,41% |
| Metal | Çelik | 824,824 | 48,00% |
| Metal+Diğerleri | Metal+Plastik | 33,311 | 1,94% |
| Kaplama | Halı | 12,769 | 0,74% |
| Cam | Cam | 34,727 | 2,02% |
| Plastik | PMMA | 0,383 | 0,02% |
| Plastik | PVC | 9,859 | 0,57% |
| Plastik | PC | 0,709 | 0,04% |
| Plastik | Diğer plastikler | 4,7732 | 0,28% |
| Kaplama | Kumaş | 7,6 | 0,44% |
| Elastomer | Diğer elastomerler | 1,2492 | 0,07% |
| Ahşap | Ahşap | 0,36 | 0,02% |
| Diğer | Çeşitli bileşenler | 357,279 | 20,79% |

**Çizelge 4.5**. 2013 model aracın malzeme ve ağırlık bilgileri (devam)

| | | | |
|---|---|---|---|
| Plastik | TPV-TPE | 2,2862 | 0,13% |
| Elastomer | ACM-CSM | 0,084 | 0,00% |
| Elastomer | NBR | 0,024 | 0,00% |
| Elastomer | NR | 0,804 | 0,05% |
| Metal | Alaşım | 59,795 | 3,48% |
| Metal+Diğerleri | Metal+Elastomerler | 43,002 | 2,50% |
| Yalıtım malzemeleri | Halılar ve Ses Yalıtımı | 5,842 | 0,34% |
| Yalıtım malzemeleri | Yapıştırılmış Ses Yalıtımı | 2,413 | 0,14% |
| Diğer | Kablolar | 26,43 | 1,54% |
| Metal | Çelik+Alaşım | 34,561 | 2,01% |
| Diğer | Elekronik bileşenleri | 23,489 | 1,37% |
| Diğer | Electrik motoru | 15,865 | 0,92% |
| Plastik | UP | 2,773 | 0,16% |
| Yalıtım malzemeleri | Sentetik elyaflar | 0,325 | 0,02% |
| Yalıtım malzemeleri | Geri dönüştürülmüş elyaflar | 0,886 | 0,05% |
| Elastomer | Elastomerler+Plastikler | 2,082 | 0,12% |
| Malzeme toplamı (kg) | | 1718,52 | |
| Bağlantı elemanları (kg) | | 28,847 | |
| Toplam (kg) | | 1747,36 | |

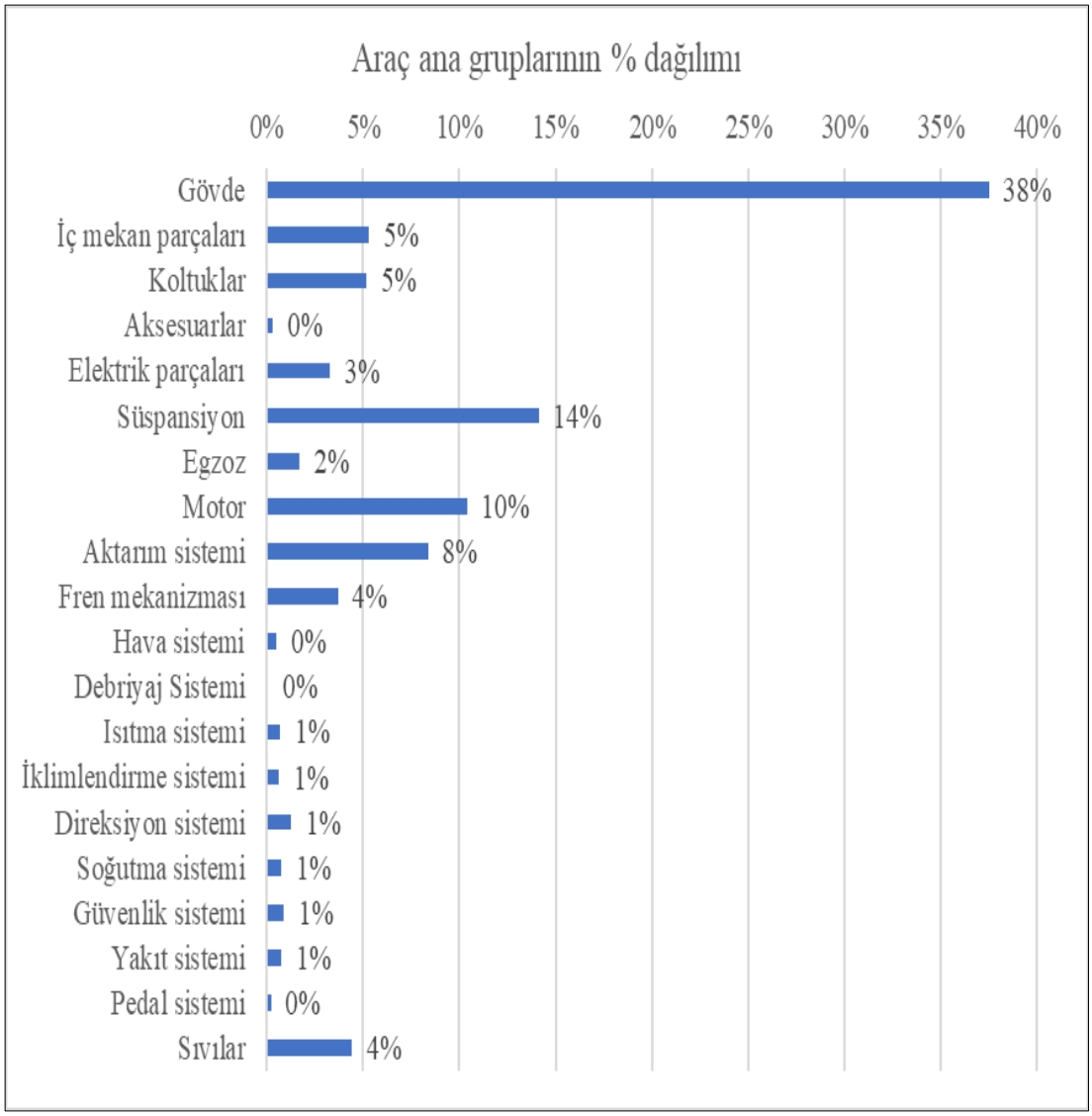
En yüksek ağırlığa sahip malzeme 824,824 kg ve 48% oranla çelik iken ikinci sırada 357,279 kg ve 20,79% oranla çeşitli bileşenler olarak sınıflandırılmış olan malzemelerdir. Poliüretan malzeme ise tüm araç değerlendirildiğinde 17,927 kg'la 1,04% orana sahiptir.

Aracı meydana getiren sistem ana gruplarına göre ağırlıklar değerlendirildiğinde Çizelge 4.6 elde edilmiştir. Buna göre en ağır ana grup 645,57 kg'a sahip gövdeyken ikinci sırada 242,98 kg'la süspansiyon sistemi yer almaktadır.

**Çizelge 4.6.** 20013 model aracın sistem ana gruplarının ağırlıkları

| Sistem ana grubu | Ağırlık (kg) |
|---|---|
| Gövde | 645,57 |
| İç mekan parçaları | 90,95 |
| Koltuklar | 88,65 |
| Aksesuarlar | 5,03 |
| Elektrik parçaları | 55,96 |
| Süspansiyon | 242,98 |
| Egzoz | 29,31 |
| Motor | 178,85 |
| Aktarım sistemi | 143,86 |
| Fren mekanizması | 63,47 |
| Hava sistemi | 8,28 |
| Debriyaj Sistemi | 0,88 |
| Isıtma sistemi | 11,98 |
| İklimlendirme sistemi | 10,47 |
| Direksiyon sistemi | 21,90 |
| Soğutma sistemi | 12,86 |
| Güvenlik sistemi | 15,07 |
| Yakıt sistemi | 13,22 |
| Pedal sistemi | 3,65 |
| Sıvılar | 75,60 |
| Araç ağırlığı | 1718,52 |

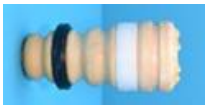
Şekil 4.2'de ise araç ana gruplarının aracın tamamına ağırlık oranları verilmiştir. Gövde %38, süspansiyon %14 ağırlık oranına sahiptir.



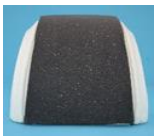
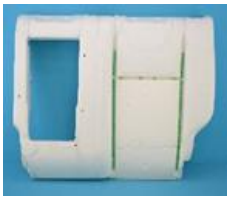

**Şekil 4.2**. 2013 model aracın sistem ana gruplarının ağırlıkları

Araç içerisinde 17,927 kg poliüretan malzemenin hangi sistemde, hangi ağırlıklarda ve hangi formlarda bulunduğu analiz edilerek Çizelge 4.7 oluşturulmuştur. Buna göre 10,117 kg'la, sistem ana grubu ağırlığına göre en yüksek orana sahip (%10) koltuk, ikinci en yüksek orana sahip grup ise 7,574 kg ve % 8 oranla iç mekan parçaları olmuştur.

**Çizelge 4.7**. 2013 model aracın sistem ana grubu ve alt gruplarına göre PU parçaların formları ve ağırlıkları

| Sistem ana grubu | Alt Grup | PU parça görseli | Parçanın PU Ağırlığı (kg) | Sistemin PU Ağırlığı (kg) | Sistem Ağırlığı (kg) | Sistem PU Oranı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| İç mekan parçaları | Ses Yalıtımı → Motor Tarafı Ses Yalıtımı | | 0,175 | 7,574 | 90,952 | 8% |
| | Ses Yalıtımı → Ön Çamurluk Yalıtımı → Arka Sol | | 0,407 | | | |
| | Döşeme Parçaları → Zemin Halı Kaplaması → Gövde → Çıkarılabilir Zemin Sistemi → Ana Zemin | | 3,237 | | | |
| | Trim Parçaları → Zemin Halı Kaplaması → Bagaj → Bagaj kapağı | | 3,559 | | | |
| Süspansiyon | Amortisörler → Ön → Süspansiyon takozu | | 0,05 | 0,132 | 242,98 | 0% |
| | Amortisörler → Arka → Süspansiyon takozu |  | 0,082 | | | |
| Isıtma sistemi | Isıtma Sistemi → Radyatör Sistemi → Tampon | | 0,087 | 0,087 | 11,98 | 1% |

**Çizelge 4.7**. 2013 model aracın sistem ana grubu ve alt gruplarına göre PU parçaların formları ve ağırlıkları (devam)

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Koltuklar | Sürücü→ Başlık → Ped |  | 0,196 | 10,117 | 88,646 | 11% |
| | Sürücü → Sırt → Pedi | | 1,643 | | | |
| | Sürücü → Oturak → Ped | | 0,948 | | | |
| | Yolcu → Sırt → Ped | | 1,677 | | | |
| | Yolcu → Oturak → Ped | | 0,949 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 1-3 → Oturak → Ped | | 0,657 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 1-3 → Sırt → Ped | | 1,139 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 2-3 → Oturak → Pedi | | 1,066 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 2-3 → Sırt → Pedi |  | 2,038 | | | |

### 4.3. 2020 Model Araç Analizi

2020 model aracın analizine göre, araçtaki malzeme grupları, malzeme türleri, ağırlıkları ve tüm araç içerisindeki ağırlık oranları Çizelge 4.8.'de sunulmuştur.

**Çizelge 4.8.** 2020 model aracın malzeme ve ağırlık bilgileri

| Malzeme Grubu | Malzeme | Ağırlık (kg) | Ağırlık (%) |
|---|---|---|---|
| Cam | Cam | 12,401 | 0,69% |
| Metal | Döküm demir | 21,072 | 1,17% |
| Diğer | Çeşitli bileşenler | 772,9247 | 42,83% |
| Plastik | PP | 63,45 | 3,52% |
| Metal | Çelik+Alaşım | 2,806 | 0,16% |
| Metal | Çinko | 0,332 | 0,02% |
| Plastik | ASA-SMA | 1,486 | 0,08% |
| Metal | Çelik+Alaşım | 680,388 | 37,70% |
| Elastomer | SBR | 0,1932 | 0,01% |
| Elastomer | Diğer Elastomerler | 0,64 | 0,04% |
| Akışkan | Akışkanlar | 61,933 | 3,43% |
| Plastik | Diğer plastikler | 2,991 | 0,17% |
| Plastik | PBT-PET | 10,371 | 0,57% |
| Diğer | Kablolar | 32,006 | 1,77% |
| Plastik | POM | 0,466 | 0,03% |
| Plastik | PA | 15,527 | 0,86% |
| Plastik | TPV-TPE | 1,6991 | 0,09% |
| Elastomer | EPDM | 2,575 | 0,14% |
| Plastik | ABS-PC | 1,921 | 0,11% |
| Metal | Alaşım | 105,3 | 5,83% |
| Elastomer | NR | 0,103 | 0,01% |
| Plastik | PE | 2,495 | 0,14% |
| Plastik | PC | 1,535 | 0,09% |
| Plastik | PU | 8,651 | 0,48% |
| Plastik | PMMA | 0,15 | 0,01% |
| Plastik | ABS | 1,359 | 0,08% |
| Malzeme toplamı (kg) | | 1804,78 | |
| Bağlantı elemanları (kg) | | 37,46 | |
| Toplam (kg) | | 1842,23 | |

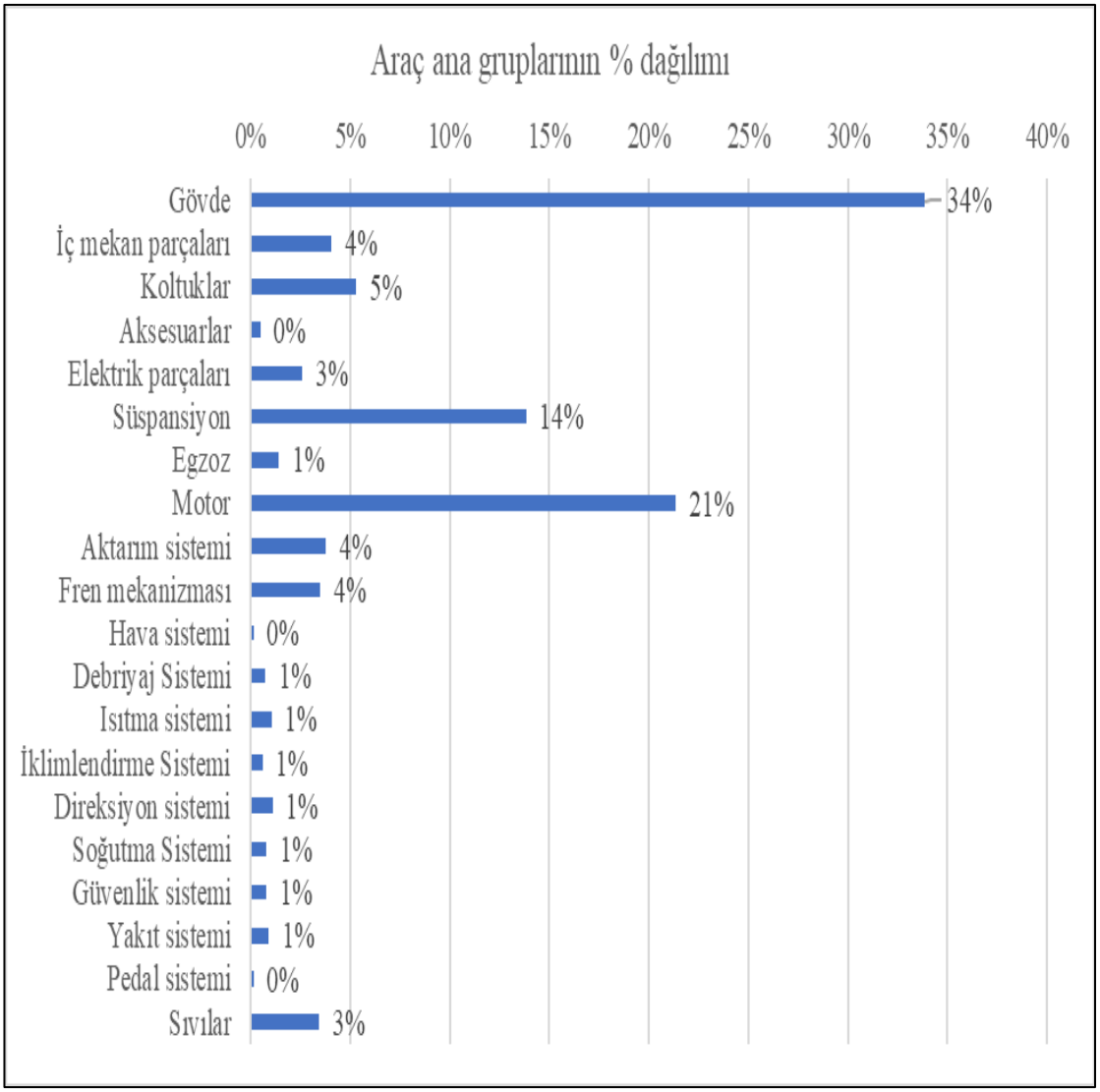
En yüksek ağırlığa sahip malzeme 680,388 kg ve 37,70% oranla çelik+alaşım olarak sınıflandırlımış olup, ikinci sırada 772,9247 kg ve 42,83% oranla çeşitli bileşenler olarak sınıflandırılmış olan malzemeler bulunmaktadır. Poliüretan malzeme ise tüm araç değerlendirildiğinde 8,651 kg'la 0,48%orana sahiptir.

Aracı meydana getiren sistem ana gruplarına göre ağırlıklar değerlendirildiğinde Çizelge 4.9 elde edilmiştir. Buna göre en ağır ana grup 611,05 kg'a sahip gövdeyken ikinci sırada 249,71 kg'la süspansiyon sistemi yer almaktadır.

**Çizelge 4.9**. 2020 model aracın malzeme ve ağırlık bilgileri

| Sistem ana grubu | Ağırlık (kg) |
|---|---|
| Gövde | 611,05 |
| İç mekan parçaları | 73,22 |
| Koltuklar | 95,66 |
| Aksesuarlar | 8,80 |
| Elektrik parçaları | 47,07 |
| Süspansiyon | 249,71 |
| Egzoz | 25,79 |
| Motor | 385,66 |
| Aktarım sistemi | 68,01 |
| Fren mekanizması | 63,39 |
| Hava sistemi | 2,86 |
| Debriyaj Sistemi | 13,61 |
| Isıtma sistemi | 19,13 |
| İklimlendirme Sistemi | 10,72 |
| Direksiyon sistemi | 19,84 |
| Soğutma Sistemi | 14,65 |
| Güvenlik sistemi | 14,22 |
| Yakıt sistemi | 16,55 |
| Pedal sistemi | 2,67 |
| Sıvılar | 62,18 |
| Araç ağırlığı | 1804,78 |

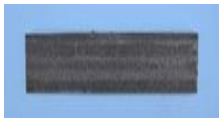
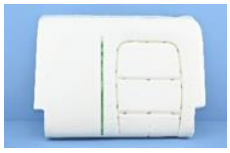
Şekil 4.3'de ise araç ana gruplarının aracın tamamına oranı verilmiş olup gövde %34, süspansiyon %21 ağırlık oranına sahiptir. Diğer araçlardaki %10 oranın yanında 2020 modeldeki %21 ağırlık aracın elektrikli olmasından kaynaklanmaktadır. Süspansiyon ise diğer modellerde olduğu gibi %14 orana sahiptir.



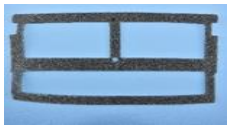

**Şekil 4.3** 2020 model aracın sistem ana gruplarının ağırlıkları

Araç içerisinde 8,651 kg poliüretan malzemenin hangi sistemde, hangi ağırlıklarda ve hangi formlarda bulunduğu analiz edilerek Çizelge 4.10 oluşturulmuştur.

**Çizelge 4.10.** 2020 model aracın sistem ana grubu ve alt gruplarına göre PU parçaların formları ve ağırlıkları

| Sistem ana grubu | Alt Grup | PU parça görseli | Parçanın PU Ağırlığı (kg) | Sistemin PU Ağırlığı (kg) | Sistem Ağırlığı (kg) | Sistem PU oranı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| İç mekan parçaları | Ses Yalıtımı → Ön Uç Modül Yalıtımı |  | 0,056 | 0,056 | 73,222 | 0,1% |
| Koltuklar | Sürücü → Başlık → Ped | | 0,156 | 7,37 | 95,655 | 7,7% |
| | Sürücü → Oturak → Ped | | 1,203 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 1-3 → Oturak → Ped | | 0,974 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 1-3 → Sırt → Pedi | | 1,206 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 2-3 → Baş Desteği → İç Taraf → Dolgu | | 0,107 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 2-3 → Baş Desteği → Dış Taraf → Dolgu | | 0,089 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 2-3 → Oturak → Pedi | | 1,395 | | | |
| | Arka Koltuk → Koltuk 2-3 → Sırt → Ped |  | 2,24 | | | |

**Çizelge 4.10.** 2020 model aracın sistem ana grubu ve alt gruplarına göre PU parçaların formları ve ağırlıkları (devam)

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Süspansiyon | Amortisörler → Arka → Süspansiyon takozu | | 0,059 | 0,059 | 249,713 | 0,0% |
| Motor | Motorda Stil Kapağı → Stil Kapağı | | 1,058 | 1,058 | 385,658 | 0,3% |
| Isıtma sistemi | Ön Hava Kanalı → Isıtıcı Sızdırmazlığı | | 0,005 | 0,016 | 19,127 | 0,1% |
| | Ön Hava Kanalı → 2. Isıtıcı Contası |  | 0,007 | | | |
| | Yan Buz Çözücü Sistemi → Isıtıcı Sızdırmazlığı | | 0,001 | | | |
| | Ön Cam Buz Çözücü Havalandırma Kanalları → Isıtıcı Sızdırmazlığı | | 0,003 | | | |
| Yakıt sistemi | Başlangıç Konumu Durdurucusu → Yakıt Deposu Durdurucusu | | 0,025 | 0,063 | 16,549 | 0,4% |
| | Yakıt Tankı Sistemi → 2. Gaz Tankı Stoperi | | 0,033 | | | |
| | Yakıt Tankı Sistemi → 3. Gaz Tankı Stoperi | | 0,005 | | | |
| Pedal sistemi | Fren pedalı → Tapa | | 0,001 | 0,001 | 2,665 | 0,0% |

Buna göre 7,37 kg'la, sistem ana grubu ağırlığına göre en yüksek orana sahip (%7,7) koltuk, ikinci en yüksek orana sahip grup ise 0,063 kg ve %0,4 oranla yakıt sistemine ait parçalar olmuştur.

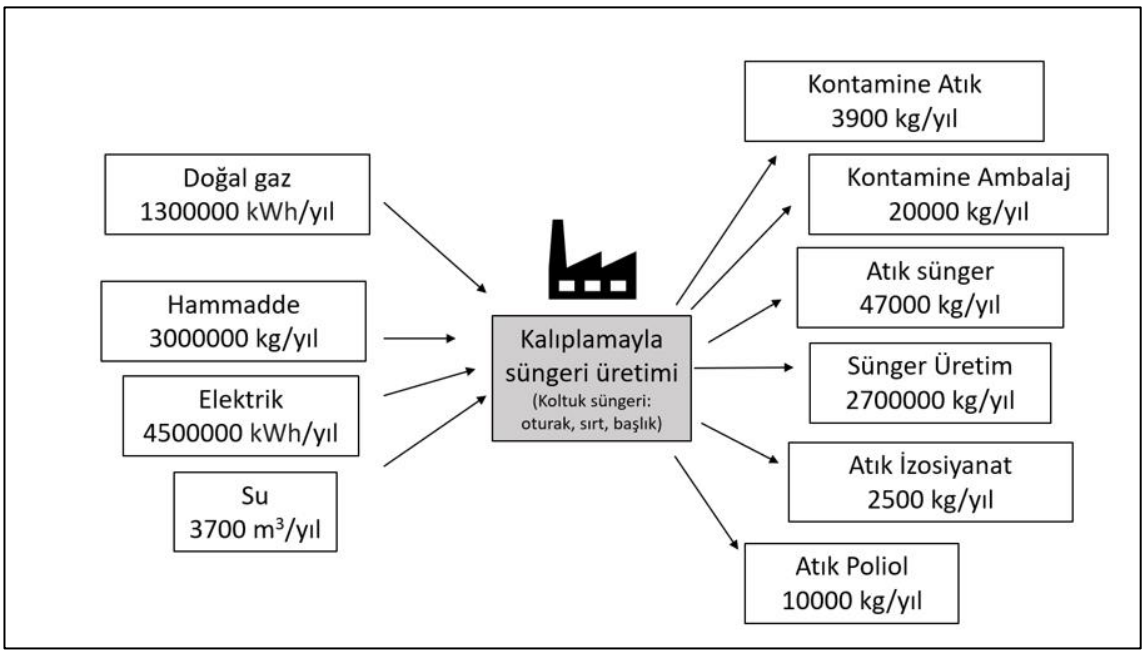
### 4.5. Koltuk Üretimindeki Poliüretan Proseslerinin Çevresel Değerlendirilmesi

Aracın üç farklı model yılında yapılan değerlendirmeye göre koltuk 2008, 2013 ve 2020 yıllarına göre sırasıyla %10,%10 ve %7,7 oranla en yüksek poliüretan malzemeye sahip bileşendir. Bu oranlar literatürde verilen %10 oran ile uyumludur (Karpat ve ark. 2024). Şekil 4.6'de ön koltuk ve Şekil 4.7'de arka koltuk bileşenleri patlatılmış datalar ile yer almaktadır. Kütlesel olarak koltuğun %10'unu oluşturan süngerin, hacmen en yüksek oranda görülmektedir.

**Şekil 4.6**. Ön koltuk bileşenleri

**Şekil 4.7.** Arka koltuk bileşenleri

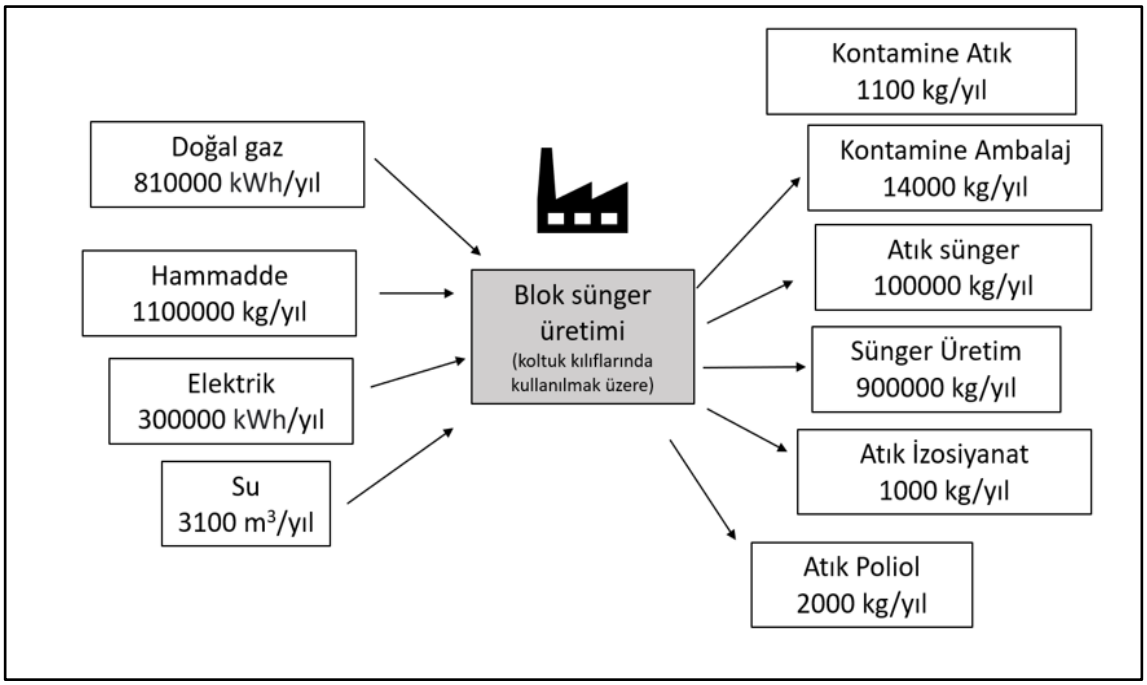
Koltuk içerisindeki poliüretan malzemeler, kalıplanarak üretilen, oturak, sırt ve başlık süngerleri ile blok dökümle üretilen ve kılıf içerisinde kullanılan süngerlerdir. Kalıplama ile sünger üretim prosesinin çevresel unsurları Şekil 4.8'de açıklanmıştır.




**Şekil 4.8.** Kalıplama ile sünger üretim prosesi ve çevresel unsurları

Kalıplamayla sünger üretim prosesi yılda 3000 ton hammadde kullanılmakta, 2700 ton sünger üretilmekte ve 47 ton atık sünger oluşmaktadır.

Koltuk içerisindeki kılıfların arasında kullanılan ve blok döküm ile üretilen poliüretan malzemelerin ise üretim prosesinin çevresel unsurları Şekil 4.9'de açıklanmıştır.




**Şekil 4.9**. Blok sünger üretim prosesi ve çevresel unsurları

Blok döküm prosesi ile yılda 1100 ton hammadde kullanılırken, 900 ton sünger üretilmekte ve 100 ton atık sünger oluşmaktadır.

### 4.6. İç Mekan Parçalarının Poliüretan Proseslerinin Çevresel Değerlendirilmesi

Araçlar içerisinde kullanılan iç mekan parçalarından, poliüretan parça kullanımının en fazla olduğu grup paspas parçalarıdır. Yolcu ve sürücü konforu ve NVH özelliklerinden dolayı kullanılan poliüretan malzemeler, farklı polimer malzemeler, cam elyaflar, tekstil malzemeler ile çeşitli kompozisyonlarda üretilebilir. Farklı polimer malzemelerle ısıl işlem gören poliüretan malzemelerin RIM prosesi, PU döküm bacasından ölçülen kirleticiler Çizelge 4.11'de açıklanmıştır.

**Çizelge 4.11.** Poliüretan döküm bacasındaki kirleticiler

| Kaynak Adı | PU döküm bacası |
|---|---|
| Ölçüm tarihi | 2023 |
| Parametreler | Gaz Sıcaklığı ($^0$C) |
| | Basınç (hPA) |
| | Nem (%) |
| | Baca gazı hızı (m/sn) |
| | Baca gazı debisi (m3/saat) |
| | N.Ş'da baca gazı debisi (Nm3/saat) |
| | N.Ş'da kuru bacada baca gazı debisi (Nm3/saat) |
| Konsantrasyonu ölçülen kirleticiler (mg/Nm$^3$) | Toz |
| | Benzen |
| | Toluen |
| | Tetrakloroetilen |
| | Klorobenzen |
| | Etilbenzen |
| | m-ksilen&p-ksilen |
| | Stiren |
| | o-ksilen |
| | İzopropilbenzen |
| | n-propilbenzen |
| | 1,3,5-Trimetilbenzen |
| | 1,4-Diklorobenzen |
| | 1,2-Diklorbenzen |

Konsantasyonu ölçülen kirleticilerin oluşum mekanizmaları incelendiğinde, benzen, toluen, etil benzen ve ksilen (BTEX) grubundaki, havadaki toksik uçucu organik bileşikler görülmektedir. Bunların oluşum mekanizmaları;

**Kullanılan Hammaddelerden Kaynaklanan Emisyonlar:**

Toluene Diisocyanate (TDI) kullanıldığında, bu kimyasalın yapısında bulunan toluen molekülü, işlemler sırasında serbest kalabilmektedir. Yüksek sıcaklık veya diğer zorlayıcı proses koşullarında, TDI'nin termal bozunması veya yan reaksiyonlar sonucu toluen oluşabilir ve baca gazına karışabilmektedir.

Çözücüler: Poliüretan üretiminde, özellikle çözücü bazlı sistemlerde, benzen, toluen ve ksilen gibi aromatik çözücüler kullanılır. Bu çözücüler, düşük kaynama noktalarına sahiptir ve bu nedenle üretim süreci sırasında buharlaşarak atmosfere karışabilir. Özellikle açık sistemlerde veya yetersiz kapalı sistemlerde çözücüler direkt olarak baca gazlarına geçer. Poliüretan üretim süreçlerinde, benzenin doğrudan kullanılmaması genellikle tercih edilir; ancak kullanılan hammaddeler ve proses koşulları, termal bozunma, eksik yanma veya diğer kimyasal reaksiyonlar sonucu benzenin oluşmasına ve atmosfere salınmasına neden olabilmektedir.

**Yanma ve Termal Bozunma Reaksiyonları:**

Termal Bozunma: Poliüretan üretiminde kullanılan organik bileşikler (özellikle polioller ve diizosiyanatlar) yüksek sıcaklıklarda termal bozunmaya uğrayabilir. Bu süreçte, karbon iskeletinin parçalanması sonucu benzen, toluen ve ksilen gibi aromatik bileşikler oluşabilir. Bu tür bileşikler, özellikle eksik yanma veya düşük oksijen koşullarında meydana gelmektedir.

Yanma Reaksiyonları: Eğer üretim sürecinde enerji sağlamak için yakıt kullanılıyorsa veya poliüretan ürünlerinin yanması söz konusuysa, yanma sırasında eksik yanma koşullarında (oksijen yetersizliği) aromatik hidrokarbonlar oluşabilir. Benzen, ksilen ve toluen, özellikle hidrokarbon bazlı yakıtların yanması sırasında, eksik yanma ürünleri olarak ortaya çıkabilmektedir.

**Yan Ürünler ve Reaksiyon Ara Maddeleri:**

Reaksiyon Ara Ürünleri: Poliüretan üretiminde, özellikle kompleks organik reaksiyonlar sırasında çeşitli yan ürünler oluşabilir. Bazı durumlarda, bu yan ürünler arasında benzen, toluen ve ksilen gibi aromatik bileşikler de yer alabilir. Örneğin,

polimerizasyonun tamamlanmaması veya reaksiyon koşullarının ideal olmaması durumunda bu tür yan ürünler ortaya çıkabilir.

Bu bileşiklerin baca gazlarında bulunması, çevreye zararlı olabileceği için kontrol altına alınması önemlidir. Bunun için üretim süreçlerinin optimize edilmesi, baca gazı arıtma sistemlerinin kullanılması ve çözücülerin mümkün olduğunca kapalı sistemlerde işlenmesi gereklidir.

Yine aynı prosesten çıkan atıklar, atık kodu ve miktarı ile Çizelge 4.12'de açıklanmıştır.

**Çizelge 4.12.** Paspas üretimi sırasında oluşan atıklar

| ATIK KODU | ATIK ADI | MİKTAR (kg) |
|---|---|---|
| 040222 | İşlenmiş tekstil elyafı atıkları | 115760 |
| 070215 | 07 02 14 dışındaki katkı maddelerinin atıkları | 750540 |
| 080317 | Tehlikeli maddeler içeren atık baskı tonerleri | 28 |
| 80415 | Organik çözücüler ya da diğer tehlikeli maddeler içeren sulu yapışkan veya dolgu macunlarının sıvı atıkları | 160 |
| 120105 | Plastik yongalar ve çapaklar | 4891613 |
| 130113 | Diğer hidrolik yağlar (I. Kategori) | 600 |
| 150101 | Kağıt ve karton ambalajı | 3320 |
| 150102 | Plastik ambalaj | 38662 |
| 150103 | Ahşap ambalaj | 60242 |
| 150110 | Tehlikeli maddelerin kalıntılarını içeren ya da tehlikeli maddelerle kirlenmiş ambalajlar | 22430 |
| 150202 | Tehlikeli maddelerle kirlenmiş emiciler, filtre malzemeleri (başka şekilde tanımlanmamış ise yağ filtreleri), temizleme bezleri, koruyucu giysiler | 840 |
| 160506 | Laboratuvar kimyasalları karışımları dahil tehlikeli maddelerden oluşan ya da tehlikeli maddeler içeren laboratuvar kimyasalları | 1700 |
| 200121 | Fluoresan lambalar ve diğer civa içeren atıklar | 28 |

Yıl içerisinde en çok çıkan 4892 ton atığın ‘Plastik yongalar ve çapaklar’ adıyla tanımlı poliüretan parçaları olduğu görülmüştür. Düzenli depolama alanlarında nihai bertarafı yapılan bu atıkların dış kısımlarının sert olması nedeniyle farklı bir keri gönüşüm – geri kazanım teknolojisi ne yazık ki tercih edilememektedir.

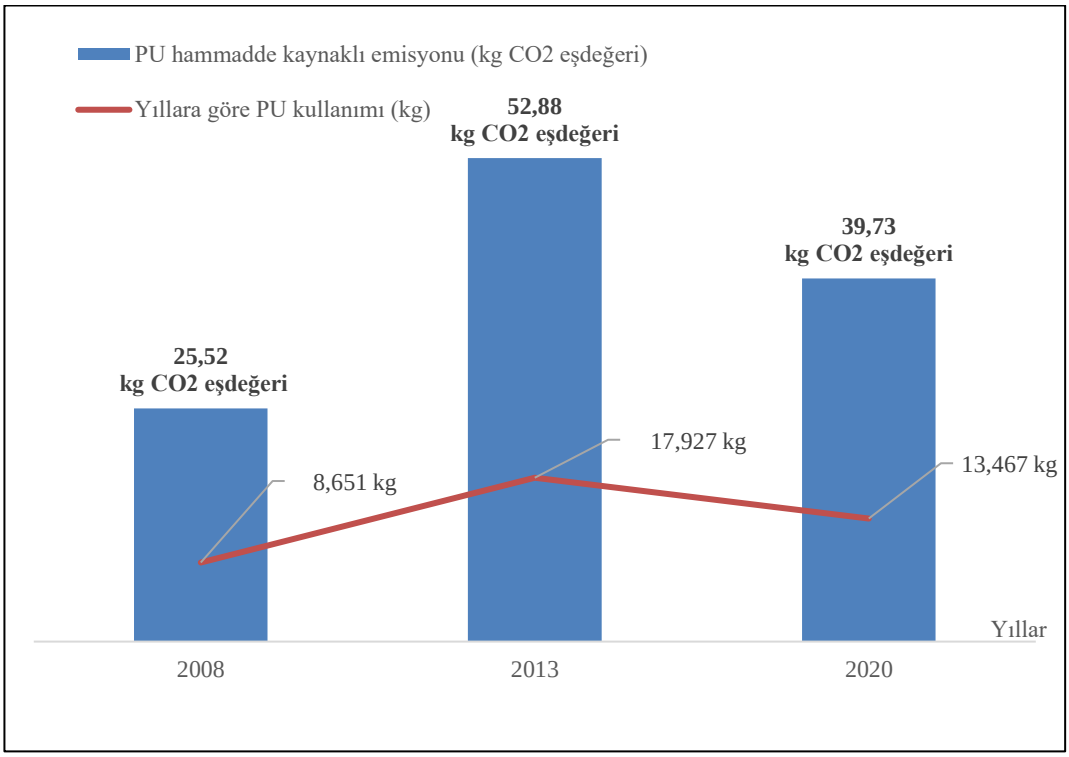
### 4.7. Poliüretan Hammadde Kaynaklı Emisyonların Yıllara Göre Değerlendirilmesi

2008-2013 ve 2020 yıllarında çıkan araçlar için poliüretan hammadde kaynaklı emisyonlar değerlendirilmiş olup bunun için SimaPro -Ecoinvent 3.9.1 veri kaynağı kullanılmıştır. Çizelge 4.13’de belirlenen hammaddeye göre veri tabanından alınan emisyon faktörleri, kıyaslama amaçlı diğer plastik malzemelerle birlikte verilmiştir. En yüksek emisyon faktörüne sahip plastiğin 9,16 kg$CO_2$eşdeğeri/kg ile PA6’ya ait olduğu görülmektedir. Poliol:izosyanat 2:1 oranda karışım kabulü yapılan poliüretanın ise emisyon faktörü 2,95 kg $CO_2$eşdeğeri/kg’dır.

**Çizelge 4.13**. Paspas üretimi sırasında oluşan atıklar

| Tür | Hammadde | Emisyon Faktörü (kg$CO_2$eşdeğeri/kg) | Veri Kaynağı |
|---|---|---|---|
| Hammadde | PP | 2,27 | SimaPro -Ecoinvent 3.9.1 |
| | PE,low density | 2,46 | |
| | PE, high density | 2,30 | |
| | PA6, cam elyaf | 7,13 | |
| | PA6 | 9,16 | |
| | PVC | 5,05 | |
| | PP+TD | 2,08 | |
| | PP+GF+TD | 2,02 | |
| | PP+TD+PCR | 1,46 | |
| | PP+WF | 1,72 | |
| | R-PP+TD | 0,51 | |
| | İzosiyanat | 4,24 | |
| | Poliol | 3,80 | |
| | Poliüretan (Poliol:izosyanat 2:1) | 2,95 | |

2,95 kg $CO_2$eşdeğeri/kg emisyon faktörüne sahip poliüretanın 3 farklı model yıla ait araçta, PU hammadde kaynaklı emisyonu hesaplanmıştır. Şekil 4.10'de görüldüğü gibi, en fazla poliüretan hammadde kaynaklı emisyon değeri 52,88 kg $CO_2$ eşdeğeri ile 2013 yılına aittir.




**Şekil 4.10.** Blok sünger üretim prosesi ve çevresel unsurları

Bir bütün olarak aracın kg $CO_2$ eşdeğeri ile emisyon hesaplaması firmaların sürdürülebilirlik raporlarında paylaşılmaktadır. 2022 yılına ait verilere göre ülkemiz otomobil üreticilerinden Ford firmasının sera gazı emisyonu 300 kg $CO_2$ eşdeğeri, Tofaş firmasının sera gazı emisyonu 249 kg $CO_2$ eşdeğeri olarak raporlanmıştır (Şumnulu ve Salihoğlu. 2024). Bu değerler otomobil üreticisinin kendi proseslerinden kaynaklanan değerler olsa da, bir aracın sürdürülebilir olarak üretilebilmesi için analiz edilmesi gereken faktörler çok fazladır. Nitekim sırf poliüretan malzeme kullanımı kaynaklı emisyon değerinin 2020 yılında 39,73 kg $CO_2$ eşdeğeri olması bunun göstergesidir. Bu gibi çok fazla bileşen bir bütün olarak değerlendirilmeli ve malzeme seçimleri bu doğrultuda yapılmalıdır.

Otomotiv ana sanayi ve yan sanayiler tarafından sunulan sürdürülebilirlik raporlarında ürettikleri ürünlerin sera gazı emisyonlarını sunmaktadırlar. Ağırlıklı olarak binek araç üreten bir otomobil üreticisinin 2022 yılındaki sürdürülebilirlik raporuna göre araç başına ortalama sera gazı emisyonu 249 kg $CO_2$eşdeğeri/araç'tır. Raporlarda araç üretimi proseslerinden kaynaklı hesaplama yapıldığından, hammaddelerden kaynaklı emisyonlar yer almamaktadır. Koltuk üretimi örnek olarak alındığında ise sürücü koltuğu özelinde 80,2 kg $CO_2$eşdeğeri literatürde yer almaktadır. (Kılıç, 2017). Hacimsel hesapla tüm binek araca oranlandığında ise 370 kg $CO_2$eşdeğeri bulunmaktadır. Buradan aracın sadece koltuklarının üretimi sırasında oluşan sera gazı emisyonları, aracın tamamın yarattığı emisyondan fazladır sonucu çıkmaktadır.

## 5. SONUÇ

Otomotiv sektöründe poliüretan kullanımı, bu malzemenin sunduğu çok yönlü avantajlar sayesinde giderek artmaktadır. Hem araç performansını artırmak hem de üretim maliyetlerini düşürmek için kullanılan poliüretanın üretim prosesleri ve kullanımlarından kaynaklanan çevresel etkileri nedeniyle sürdürülebilirliği sorgulanmaktadır.

Hayatımızın vazgeçilmez parçalarından olan otomobillerin üretimi, global rekabet koşulları ve giderek zorlaşan yasal şartlara uyum nedeniyle sündürülebilir çözümler üretilmesi gereken alanların başında gelmektedir. Otomobilde plastik kullanımı, üretim ve tasarım kolaylıkları yanı sıra aracı hafifletmesi, beraberinde yakıt ekonomisinde iyileşme ve $CO_2$ salınımında azalma meydana getirmektedir. Bu çalışmada geri dönüşümü yaygın olmayan plastik malzeme gruplarından poliüretan malzemenin otomotiv sektöründe kullanımı değerlendirilmiştir. Otomobil içindeki poliüretan malzemeler, 2008-2013-2020 yıllarında piyasaya yeni çıkan aynı model araç içerisinde analiz edilmiştir. 3 yıl içerisinde değişen poliüretan kullanımına göre SimaPro-Ecoinvent 3.9.1 veri tabanından alınan emisyon faktörleri ile, poliüretan hammadde kaynaklı araç emisyonu hesaplanmıştır. Araç ana grupları içerisinde en çok poliüretan malzemeye sahip bölüm koltuk, ikinci sırada iç mekan parçaları bulunmaktadır. En çok poliüratan malzeme onanına sahip koltuk grubunun poliüretan malzemeler içeren bilenlerinin prosesleri incelemiş olup bu koltuk süngeri ve koltuk kılıf süngeri proseslerinin girdi ve çıktıları çevresel unsurlarla birlikte ortaya konmuştur. İkinci en yüksek poliüretan malzeme onanına sahip iç mekan parçalarından taban paspası ürerim prosesindeki baca gazı emisyon ölçümünde tespit edilen kirleticiler ve konsantrasyonları değerlendirilmiştir. 2017 yılında poliüretan kullanımına bağlı olarak en fazla poliüretan hammadde kaynaklı emisyon değeri 52,88 kg $CO_2$ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Poliüretan kullanımının çevresel etkilerini azaltmak için, üretim süreçlerinde daha sürdürülebilir malzemeler kullanmak, geri dönüşüm tekniklerini geliştirmek ve atık yönetimi konusunda daha etkili stratejiler benimsemek gerekmektedir.

Önceki yüzyılda enerji üretimi ve otomotiv sektörü toplumsal devrim yaratırken günümüzde beraberinde getirdiği çevresel yükleri nedeniyle, sürdürülebilir kalkınma çözümleri, otomobil üreticileri, yan sanayiler, devletler, uluslararası kuruluşlar, üniversiteler ve AR-GE merkezleri tarafından birlikte çalışarak ve önem verilmesi gereken konulardan olmalıdır. Yapılan raporlamalar standartların getirilmesi ve detay beklentilerin artmasıyla gelişse de tüm paydaşların dahil edilerek analizi, hesaplanması ve şeffaf şekilde ortaya konması gerekmektedir.

## KAYNAKLAR


Anonim. (2020). *Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği*. Mevzuat Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğü, 6/11/2020 tarih ve 31296 sayılı Resmi Gazete.

Agrawal, A., Kaur, R., Walia, R. (2019). *Development of vegetable oil-based conducting rigid PU foam*. e-Polymers, 19, 411–420. doi: 10.1515/epoly-2019-0042

Agrawal, A., Kaur, R., Walia, R.S. (2019). *Flame retardancy of ceramic-based rigid polyurethane foam composites*. Journal of Applied Polymer Science 136(48):48250. doi: 10.1002/app.48250

Akovalı, G. (1984). *Temel ve Uygulamalı Polimer*, ODTÜ yayını, pp.85, Ankara

Charler, H. (2006). *Handbook of Plastics Technologies*, Technology Seminars, Lutherville, Maryland, pp.254.

De Souza, F.M.; Kahol, P.K.; Gupta, R.K. (2021) Introduction to Polyurethane Chemistry. ACS Symp. Ser. 1380, 1–24. doi: 10.1021/bk-2021-1380.ch001

Karpat, F., Yuce, C., Yavuz, N. ve Sendeni, G. (2014). A Case Study: *Designing for Sustainability and Reliability in an Automotive Seat Structure*. Sustainability 2014, 6, 4608-4631; doi: 10.3390/su6074608

Garrido, M.A.; Gerecke, A.C.; Heeb, N.; Font, R.; Conesa, J.A. (2017*). Isocyanate emissions from pyrolysis of mattresses containing polyurethane foam.* Chemosphere. 168, 667–675. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.11.009

Garrido, M.A.; Font, R.; Conesa, J.A. (2017). *Pollutant emissions from the pyrolysis and combustion of viscoelastic memory foam.* Sci. Total Environ. 577, 183–194. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.159

Howard, G.T. (2002). *Biodegradation of polyurethane: A review.* Int. Biodeterior Biodegrad. 49, 245–252. doi: 10.1016/S0964-8305(02)00051-3

https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/end-life-vehicles_en

https://purpanpanel.com/wp-content/uploads/2020/02/sandvic-Cati-Paneli-1.png

https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/polyurethane-pu-market

https://www.nist.gov/programs-projects/reduced-ignition-and-flame-spread-nano-engineered-foam-project

https://www.precedenceresearch.com/polyurethane-market. *Polyurethane Market Size, Trends, Share, Growth, Report 2032*

https://www.teknikbelgeler.com/2016/makale.php?id=40

Kaur, R., Singh, P., Tanwar, S., , Varshney, G. ve Yadav S. (2022). *Assessment of Bio-Based Polyurethanes: Perspective on Applications and Bio-Degradation Raminder.* Macromol, 2(3), 284-314. doi: 10.3390/macromol2030019

Kemona, A. ve Piotrowska, M. (2020). *Polyurethane Recycling and Disposal: Methods and Prospects*. Polymers 12(8):1752. *doi: 10.3390/polym12081752*

Kılıç, E. E. (2017). *Bir araç koltuğunun yaşam döngüsü değerlendirmesi ile çevresel etkilerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Lif ve Polimer Mühendisliği Ana Bilim Dalı.

Peyrton, J., Chambaretaud, C., Sarbu, A., Avérous, L. (2020) *Biobased Polyurethane Foams Based on New Polyol Architectures from Microalgae Oil*. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 8, 12187–12196. doi: 10.1021/acssuschemeng.0c03758

Simón, D., Borreguero, A.M., de Lucas, A., Rodríguez, J.F. (2018). *Recycling of polyurethanes from laboratory to industry, a journey towards the sustainability.* Waste Management. 2018, 76, 147–171. doi: 10.1016/j.wasman.2018.03.041

Paabo, M.; Levin, B.C. (1987). *A review of the literature on the gaseous products and toxicity generated from the pyrolysis and combustion of rigid polyurethane foams. Fire Mater.* 11, 1–29. doi: 10.1002/fam.810110102

Nuno V. Gama , Artur Ferreira and Ana Barros-Timmons (2018)., *Polyurethane Foams: Past, Present, and Future.* doi.org/10.3390/ma11101841

Saçak, M., (2005) "Polimer Teknolojisi", Gazi kitabevi, pp.89-90.

Seydioğlu, M. Ö., (2007) "*Poliüretanlar*", Plastik Dergisi, Sayı 95, pp. 126-132 Kasım – Aralık

Shah, A.A., Hasan, F., Hameed, A.; Ahmed, S. (2008). *Biological degradation of plastics: A comprehensive review. Biotechnol. Adv.,* 26, 246–265. 10.1016/j.biotechadv.2007.12.005

Valero, M., Gonzalez, A. (2012) *Polyurethane adhesive system from castor oil modified by a transesterification reaction.* J. Elastomers Plast. 44, 433–442. doi: 10.1177/0095244312437155

Yang, W., Dong, Q., Liu, S., Xie, H., Liu, L., Li, J. (2012). *Recycling and Disposal Methods for Polyurethane Foam Wastes.* Procedia Environ. Sci. 16, 167–175. doi: 10.1016/j.proenv.2012.10.023

# ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nihan Şumnulu
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa, 1990
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Cumhuriyet Lisesi, 2008
Lisans : Kocaeli Üniversitesi, Çevre Mühendisliği, 2014
Yüksek Lisans :

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Tübitak, 2014-2016
Otoplast Otomotiv 2017-2018
Formfleks A.Ş, 2019-2021
Martur Fompak International, 2022-Halen

İletişim (e-posta) : nihansumnulu@gmail.com

Yayınları :

Durak, N., Esen F., Sakın, E.A., Taşdemir, Y. (2016). PAH Determınatıons by the Passıve Aır Sampler and Pıne Components in Bursa. *1st Internatıonal Black Sea Congress on Envıronmental Scıences* Giresun, Turkey 31 August-03 September 03 2016

Çalışkan, B., Şumnulu, N. (2017). Determınatıon of Atmospheric PCB Concentrations in a Semi-Rural Area of Bursa. *8th Atmospheric Sciences Symposium,* İstanbul-Türkiye, 01-04 Kasım 2017

Şumnulu, N., Salihoğlu G. (2024) *Otomotiv Sektöründeki Araç Hafifletme Çalışmaları ve Çevresel Etkileri.* Serüven Yayınevi: Mühendislik Alanında Uluslararası Çalışmalar Mart 2024, sf: 217-230