



**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

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 sürdürülebilir çözümler üretilmesi gereken alanların başında gelmektedir. Otomobilde plastik kullanımı, üretim ve tasarım kolaylıkları yanı sıra aracı hafifletmesi, beraberinde yakıt ekonomisinde iyileşme ve CO₂ salınımlarında 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 poliüretan malzeme oranına sahip koltuk grubunun poliüretan malzemeler içeren bileşenlerinin prosesleri incelenmiş olup bu koltuk süngeri ve koltuk kılıf süngeri proseslerinin girdi ve çıktıları çevresel unsurlarla birlikte ortaya konmuştur. İkinci en yüksek poliüretan malzeme oranına sahip iç mekan parçalarından taban paspası üretim 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 alımasam 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 Evcı'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	Hidrosiyamik asit
IPCC	Devletlerarası İklimsel Değişimler Paneli
MDI	Metilen difenilizosiyanatın
NO	Azot monoksit
NR	Doğal kauçuk
NVH	Gürültü, titreşim ve sertlik
PA	Polyamid
PBT	Polibütillen tereftalat
PC	Polikarbonat
PCR	Tüketim sonrası geri dönüştürülmüş plastik
PE	Polietilen
PET	Polietilen tereftalat
PMDI	Polimerik metilen difenilizosiyanat
PMMA	Polimetil metakrilat
POM	Polioksümetilen

PP	Polipropilen
PPE	Polifenilen eter
PPO	Polifenilen oksit
PPS	Polifenilen sülfid
PU	Poliüretan
PVC	Polivinilklorür
RIM	Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama
R-PP	Geri gönüştürölmüş 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. Poliöl ve diizosiyanat ile poliüretanın 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. İsosiyant Güvenlik Bilgi Formu tehlike unsurları.....	16
Şekil 2.11. Poliöl Güvenlik Bilgi Formu tehlike unsurları	16
Şekil 3.1 En fazla PU kütleli oranına koltuk parçalarının 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 kütleli 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 yapılan çalışmalara göre ise, artık geri dönüşü olmayan noktada bulunduğu belirtilerek, iklim değişikliğine en büyük katkının karbondioksit gaz salınımlarından kaynaklandığını ortaya koymuştur (IPCC, 2007). Aynı raporda, bu gaz salınımindaki artış nedeninin neredeyse tamamının insan faaliyetleriyle oluştuğu belirtmiştir.

Mevcut yakıtların, daha ekonomik doğal kaynak kullanımıyla iyileştirilmesi gerekliliği 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. CO₂ 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 CO₂/km, 2029 yılına kadar 93,6 g CO₂/km, 2035 yılına kadar ise 49,5 g CO₂/km hedeflenmektedir.

Otomotiv sektörü, 2023'de 35 milyar dolarlık ihracatla, tüm ülkedeki sektörler arasında %16'lık oranla 1.sıradadır. İhracatımızın 2/3'sünden fazlasını AB'ne yapan otomotiv sektörü, AB hedeflerine bağlı olarak, CO₂ emisyonlarını azaltmak için çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışmalar yıllar boyunca ülkemiz ve dünyanın odak noktası olmakla birlikte, yeni çözümler bulunması gerekliliği 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 alaşım malzemeler, magnezyum alaşım malzemeler, alüminyum ve alüminyum alaşım 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 düşünülmeyle 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 dönüşüm 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 yöntemlerin 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. Üretim sürecinin kolaylığı ve kullanım avantajlarından dolayı, poliüretan esaslı malzemelerin kullanımı hem Türkiye'de hem de dünyada hızla artmaktadır.

Tüm malzemelerde olduğu gibi, poliüretan malzeme kullanımının 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 poliüretan kullanımı ile karbon ayak izi azalır.

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

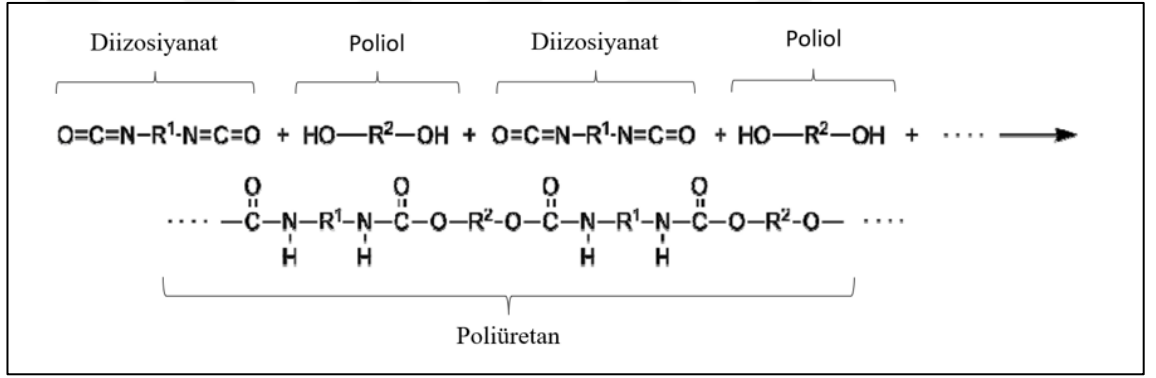
- Tercih edildiği otomobil parçaları
- Zamana göre değişen kullanım trendleri
- Üretim proseslerindeki çevresel etkileri
- Geri dönüşüm ve yeniden kullanım imkanları
- Alternatif olarak çevreci hammaddelerle üretilmeleri
- Zamana göre poliüretan hammadde kullanımındaki değişimler ile emisyon miktarı

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), poliol 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'nın, poliol ile diizosiyanatın reaksiyonu Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



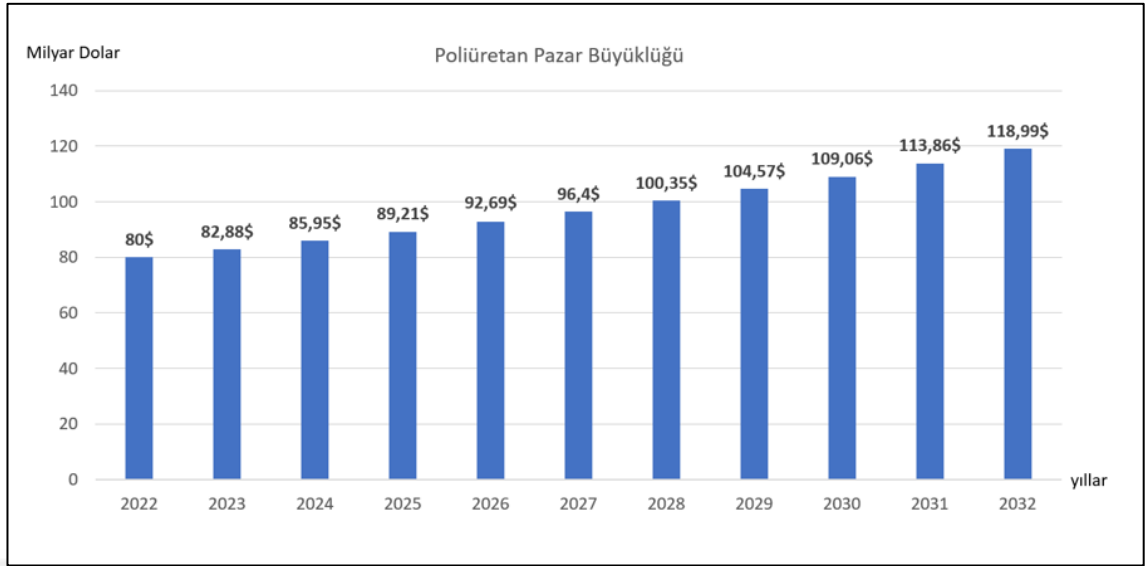
Şekil 2.1. Poliol ve diizosiyanat ile poliüretanın oluşum reaksiyonu (Gama ve ark. 2018)

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 dolaryken, 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'nun 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)

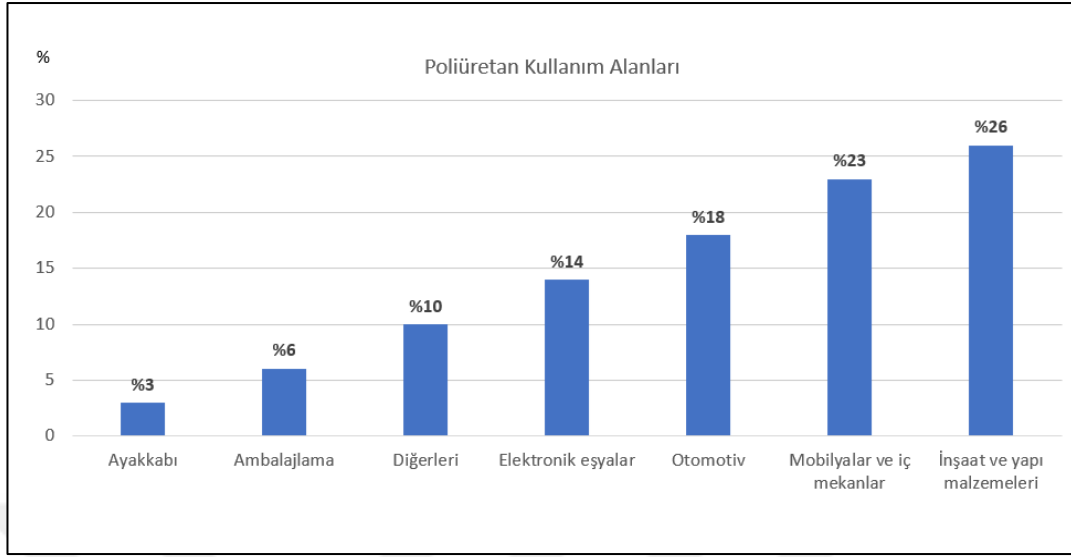
Global düzeydeki pazarın bölgesel dağılımı ise Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



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 zellikleri

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 Őekillerde retilabilmektedir. İnaşaat, 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 poliöl 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

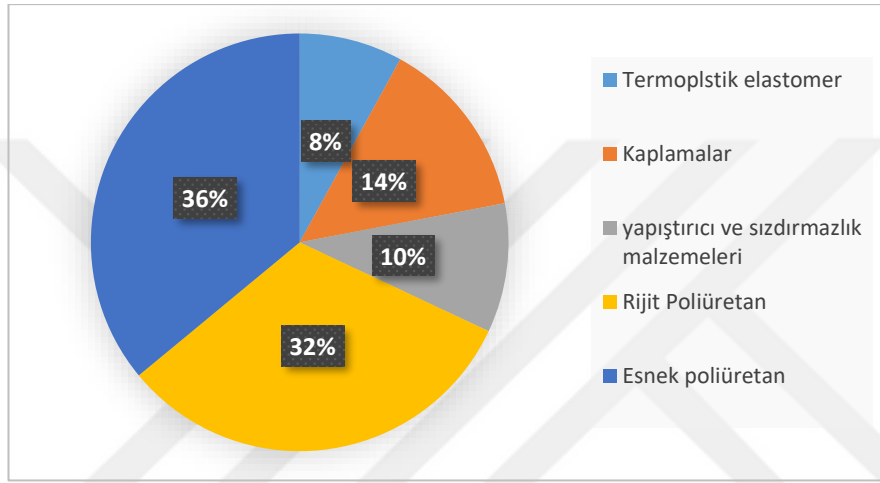
Poliüretan elastomer fiberler ise iki ana yöntemle elde edilmektedir. Birinci solvent (genellikle solvent olarak DMF denilen dimetil form amine kullanılmaktadır) ile spin edilerek ya da belli ekstrüderlerde eritme prosesine tabi tutularak yapılmaktadırlar. Genellikle solvent yöntemi kullanılmakta olup, bu yöntemde kendi içerisinde iki gruba ayrılmaktadır. Birincisinde poliüretan hazır halde solventte çözülüp sisteme ilave edilirken, diğerinde ise polioller ve izosiyanatların içerisinde 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 yapıli poliüretan malzemelerin pazar payı Şekil 2.5'de açıklanmıştır.



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

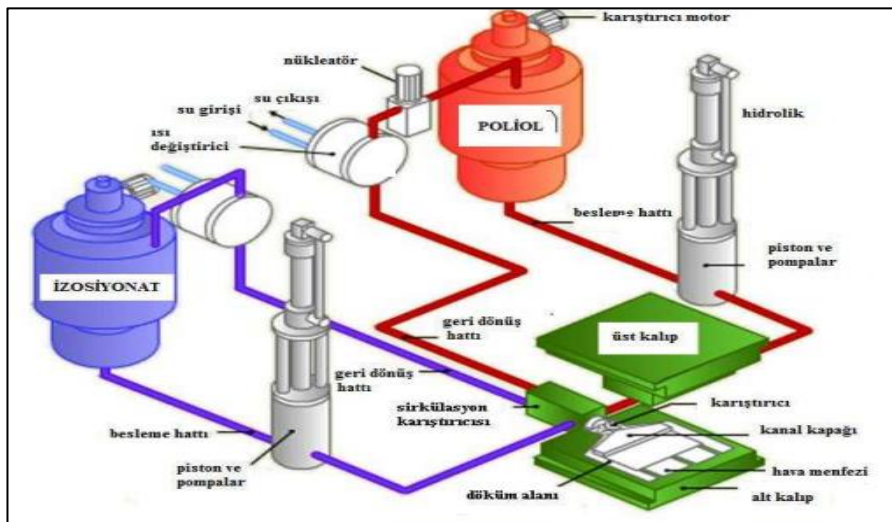
2.1.1. Poliüretan Malzemelerin Otomotiv Yan Sanayinde Üretim Prosesleri

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 işlemleri 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 poliöl 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, ısı direngelik, 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 poliöl kalıp parçasının fiziksel özelliklerini belirlemektedir. Yoğunluk, sıkışma gücü, elastik modül, renk ve diğer özellikler poliöl 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 poliöl 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.



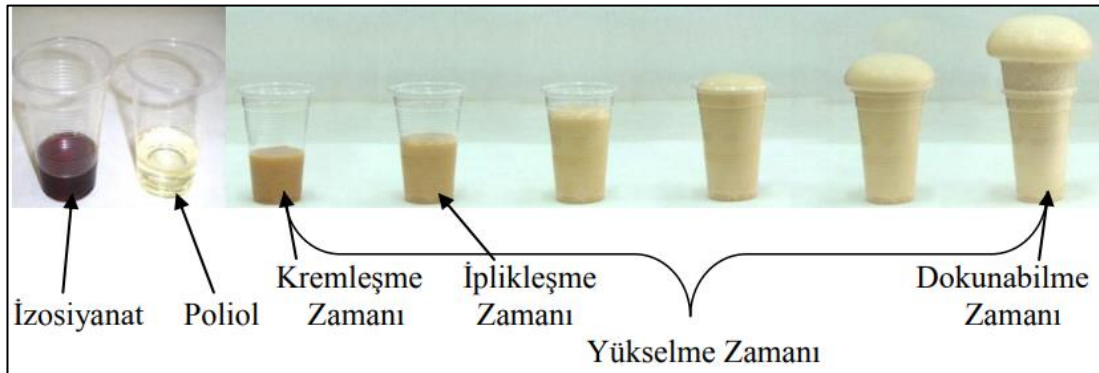
Şekil 2.3. RIM prosesi gösterimi (Çobanoğlu, 2008).

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



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

Poliüretan malzeme ile kullanılacak diğer componentler öncesinde yada proses sırasında formlanır ve kalıp içerisinden PU’nın 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.

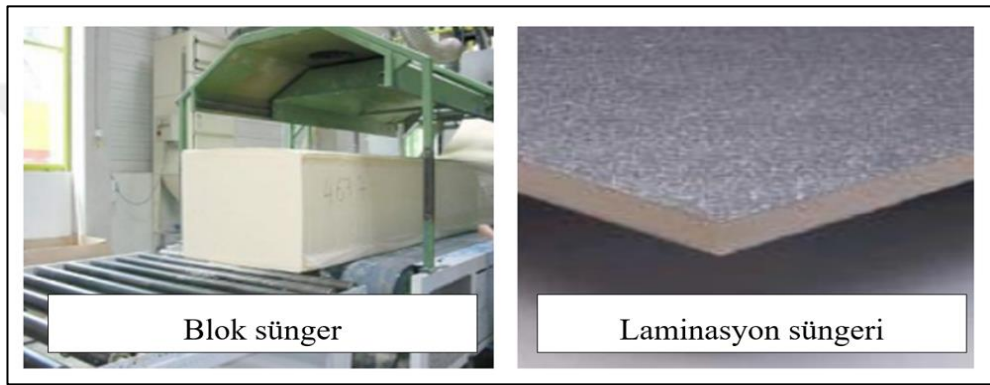


Şekil 2.5. Poliüretanın zamana bağlı değişimi (Akdoğan, 2011)

- 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 kullanılabilir.
- **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 İsoisyanat 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 solunum yoluyla maruz kalma ile organlarda hasar meydana getirebilir.

Şekil 2.7. İsoisyanat 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 poliollü 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 kıyaslanması 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 (µg*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 Absorpsiyonu (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 m³'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 poliöl ile) harmanlanır (Simon ve ark., 2018).
3. Sıkıştırılmalı 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 kullanılacak 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
Hidroglükoliz	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 sağlamıştır (Kemono 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 (Kemono 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 bileşikler 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 °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 bileşikler 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 enerjiden 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 (Kemono ve ark., 2020)

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

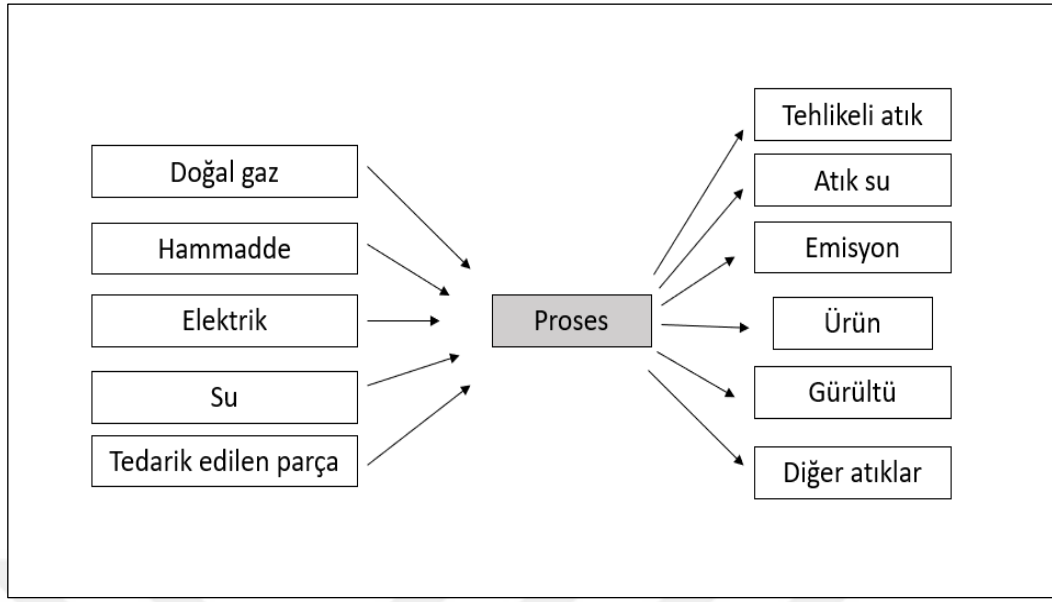
Her bir PU içerikli malzemelerin bağlı oldukları araç ana gruplarından en fazla kütleli orana sahip olan parçaların detaylı proses akış şemaları oluşturulmuş, çevresel boyutları değerlendirilmiştir.

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

Çizelge 3.1. En fazla PU kütleli 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 kütle oranına koltuk parçalarının proseslerine ait bilgiler

PU kütle oranına ikinci sırada sahip olan iç mekan parçalarından taban paspası üretimindeki proses atıkları ve termal formülasyon 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 sahiptirken, 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	

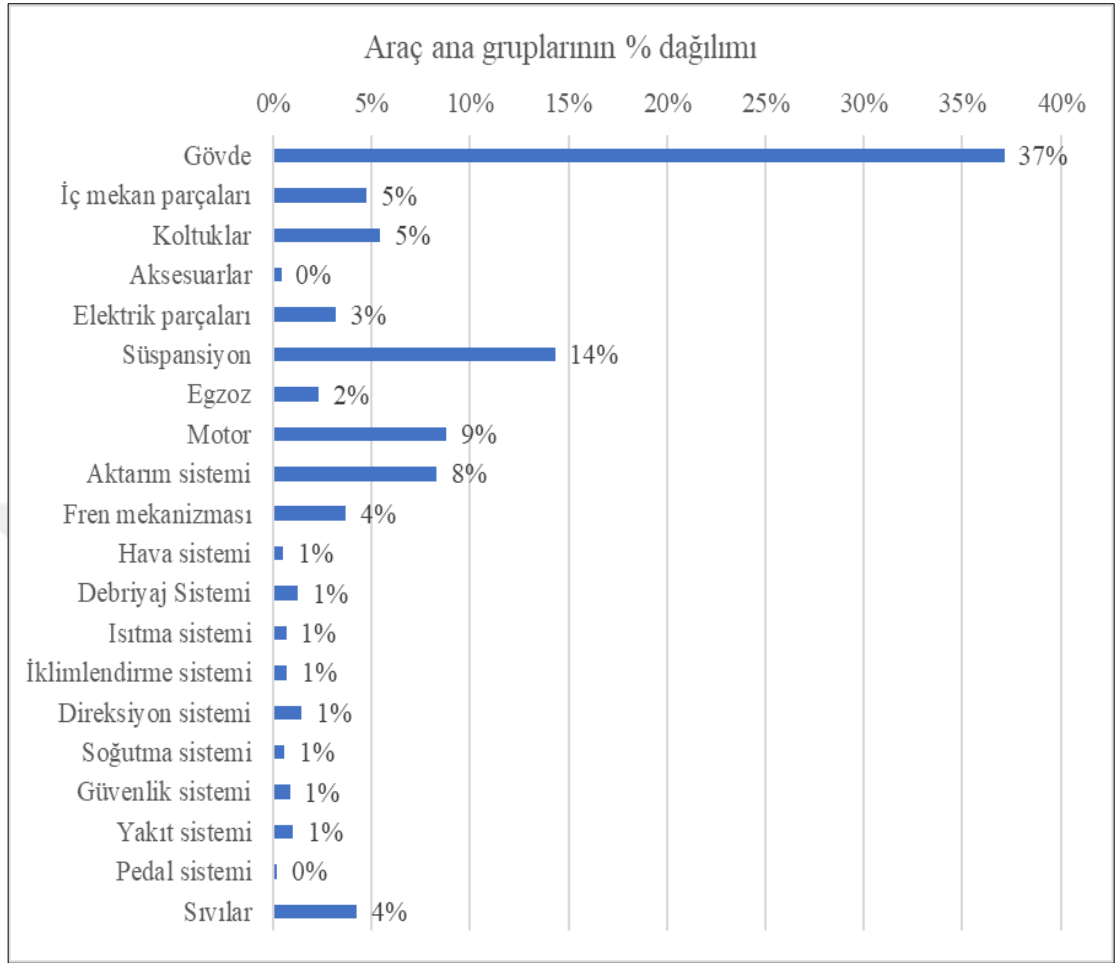
En yüksek ağırlığa sahip malzeme 809,884 kg ve 49,55% oranla çelikken ikinci sırada 257,818 kg ve 15,77% oranla çeşitli bileşenler olarak sınıflandırılan, içeriği net olarak sınıflandırılmayan malzemelerdir. Poliüretan malzeme ise tüm araç değerlendirildiğinde 13,467 kg ile %0,82 orana sahiptir.

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



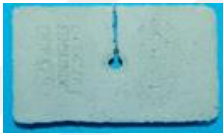
Şekil 4.1'de ise araç ana gruplarının aracın tamamına ağırlık oranları verilmiştir. Gövde %37, süspansiyon %14 ağırlık oranına sahiptir.













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	Elastomerler	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	Elektronik bileşenleri	23,489	1,37%
Diğer	Electric 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	

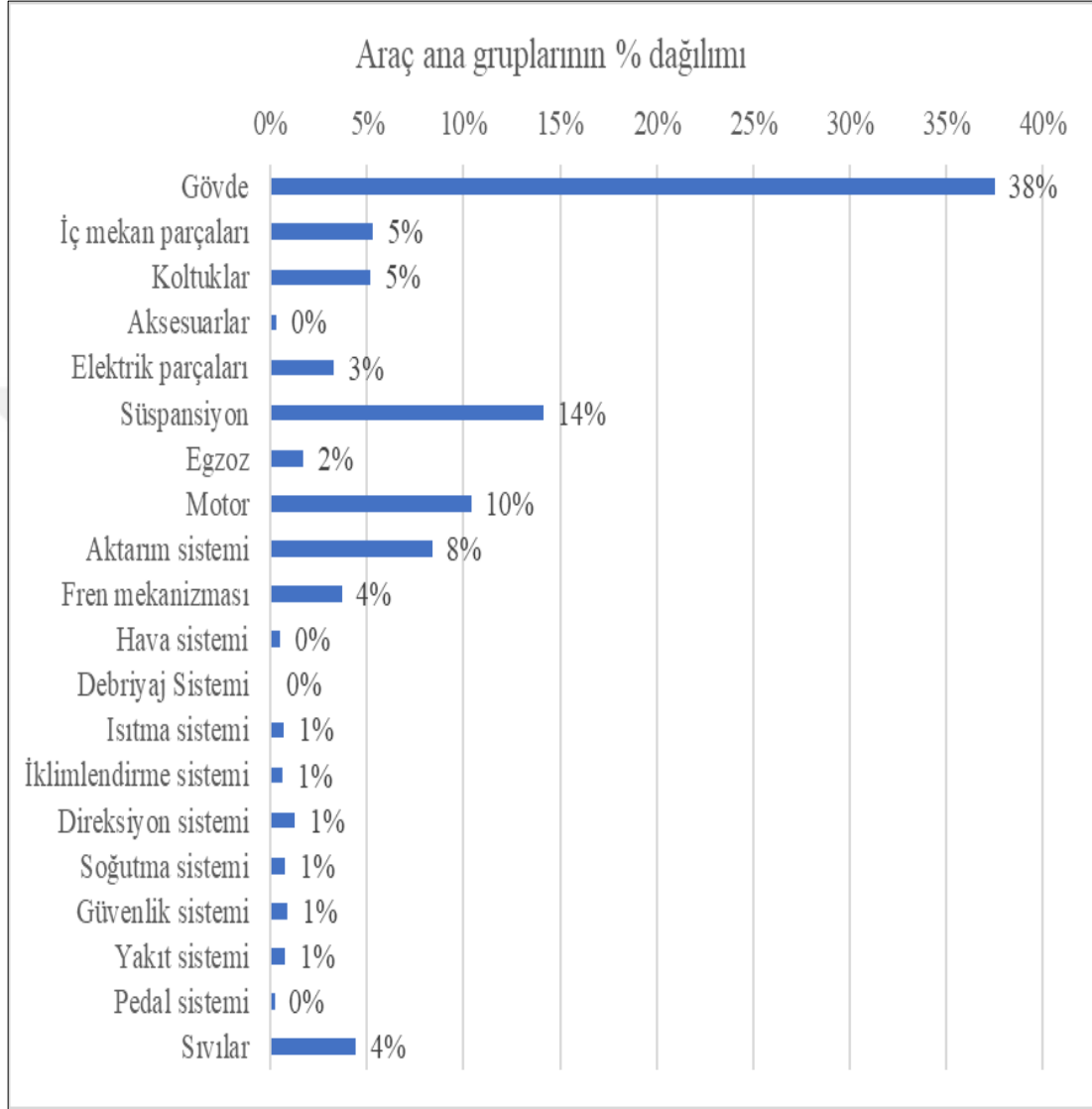
En yüksek ağırlığa sahip malzeme 824,824 kg ve 48% oranla çelik iken ikinci sırada 357,279 kg ve 20,79% oranla çeşitli bileşenler olarak sınıflandırılmış olan malzemelerdir. Poliüretan malzeme ise tüm araç değerlendirildiğinde 17,927 kg'la 1,04% orana sahiptir.

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 gövdeyen 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.



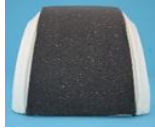





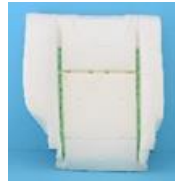


Şekil 4.2. 2013 model aracın sistem ana gruplarının ağırlıkları

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	

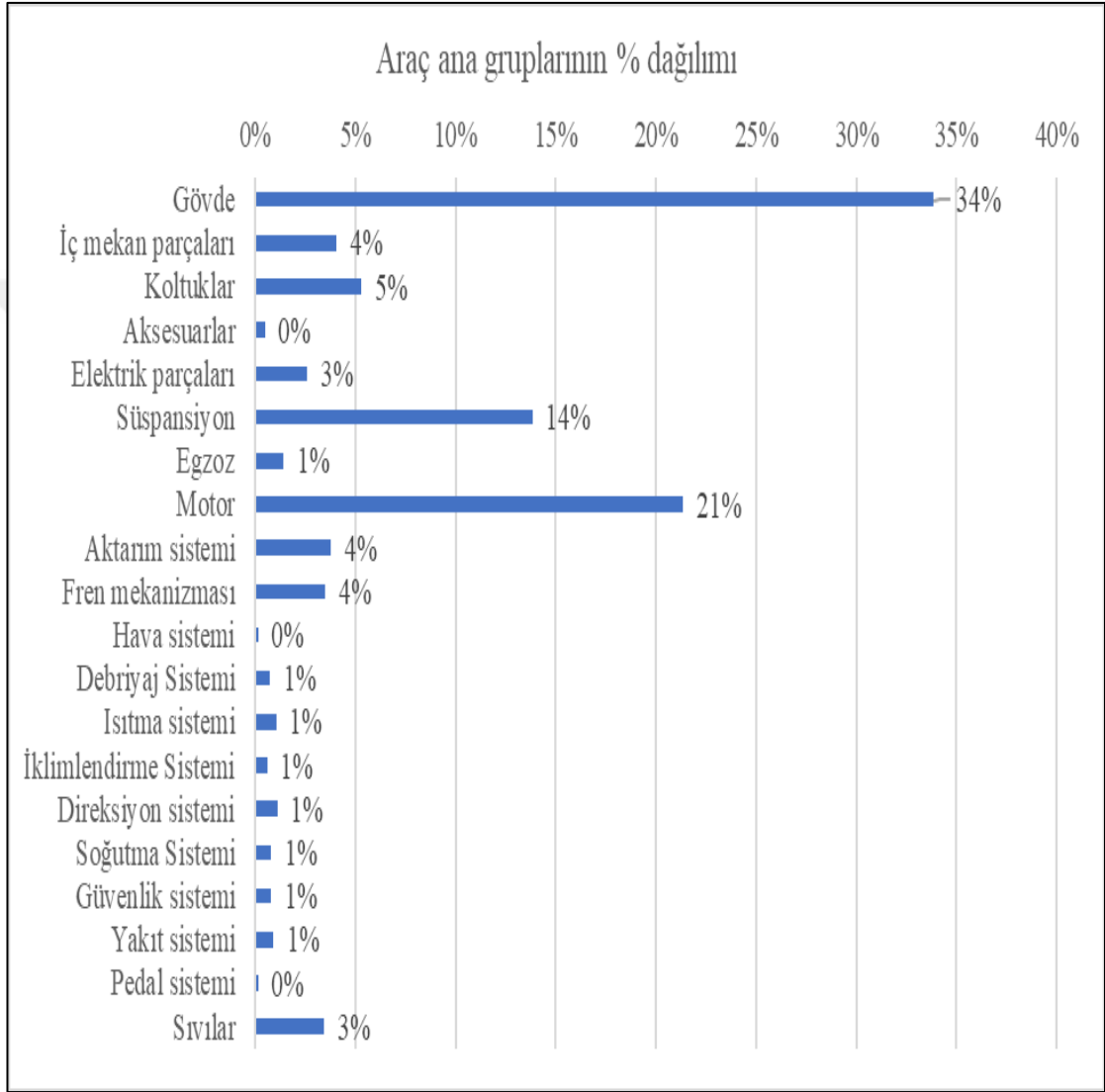
En yüksek ağırlığa sahip malzeme 680,388 kg ve 37,70% oranla çelik+alaşım olarak sınıflandırılmış olup, ikinci sırada 772,9247 kg ve 42,83% oranla çeşitli bileşenler olarak sınıflandırılmış olan malzemeler bulunmaktadır. Poliüretan malzeme ise tüm araç değerlendirildiğinde 8,651 kg'la 0,48% orana sahiptir.

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 oranının yanında 2020 modeldeki %21 ağırlık aracın elektrikli olmasından kaynaklanmaktadır. Süspansiyon ise diğer modellerde olduğu gibi %14 orana sahiptir.






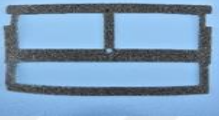






Şekil 4.3 2020 model aracın sistem ana gruplarının ağırlıkları

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. Kütleli olarak koltuğun %10'unu oluşturan süngerin, hacmen en yüksek oranda görülmektedir.

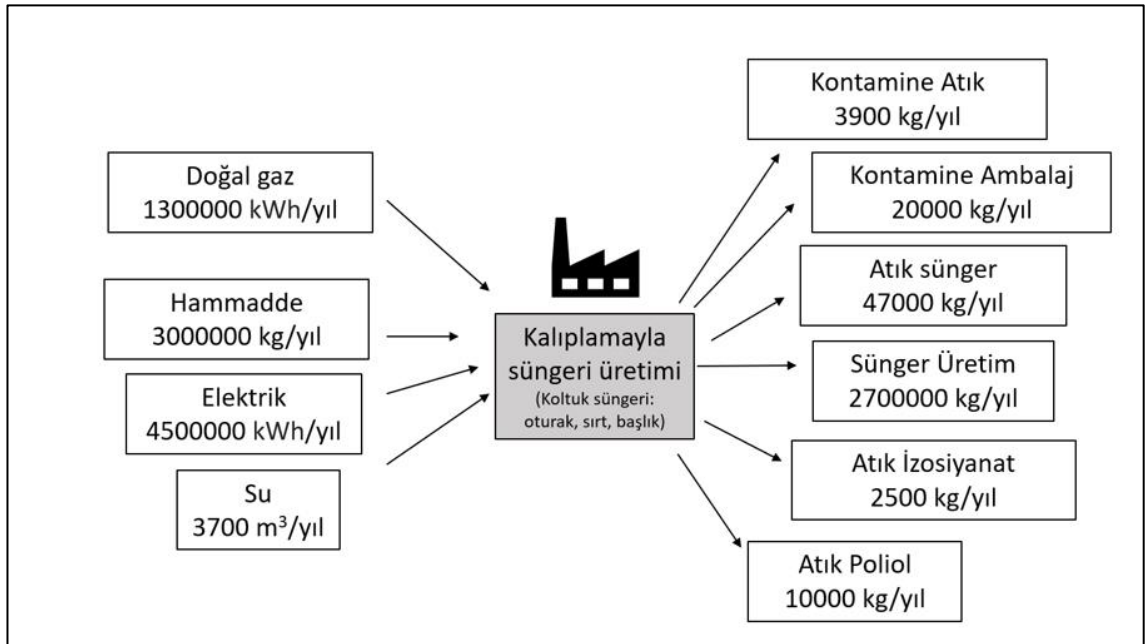


Şekil 4.6. Ön koltuk bileşenleri



Şekil 4.7. Arka koltuk bileşenleri

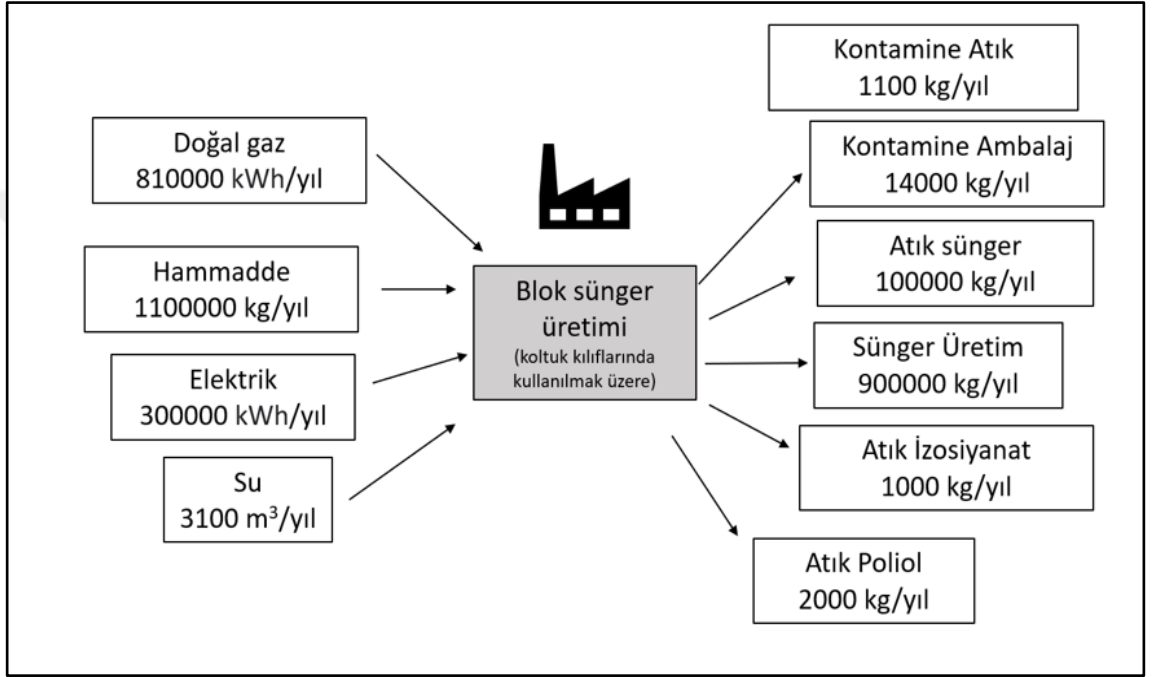
Koltuk içerisindeki poliüretan malzemeler, kalıplanarak üretilen, oturak, sırt ve başlık süngerleri ile blok dökümle üretilen ve kılıf içerisinde kullanılan süngerlerdir. Kalıplama ile sünger üretim prosesinin çevresel unsurları Şekil 4.8’de açıklanmıştır.



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 ısı 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 (°C)
	Basınç (hPA)
	Nem (%)
	Baca gazı hızı (m/sn)
	Baca gazı debisi (m ³ /saat)
	N.Ş'da baca gazı debisi (Nm ³ /saat)
	N.Ş'da kuru bacada baca gazı debisi (Nm ³ /saat)
	Konsantrasyonu ölçülen kirleticiler (mg/Nm ³)
Benzen	
Toluen	
Tetrakloroetilen	
Klorobenzen	
Etilbenzen	
m-ksilen&p-ksilen	
Stiren	
o-ksilen	
İzopropilbenzen	
n-propilbenzen	
1,3,5-Trimetilbenzen	
1,4-Diklorobenzen	
1,2-Diklorobenzen	

Konsantrasyonu 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 kerü gönüşüm – geri kazanım teknolojisi ne yazık ki tercih edilememektedir.

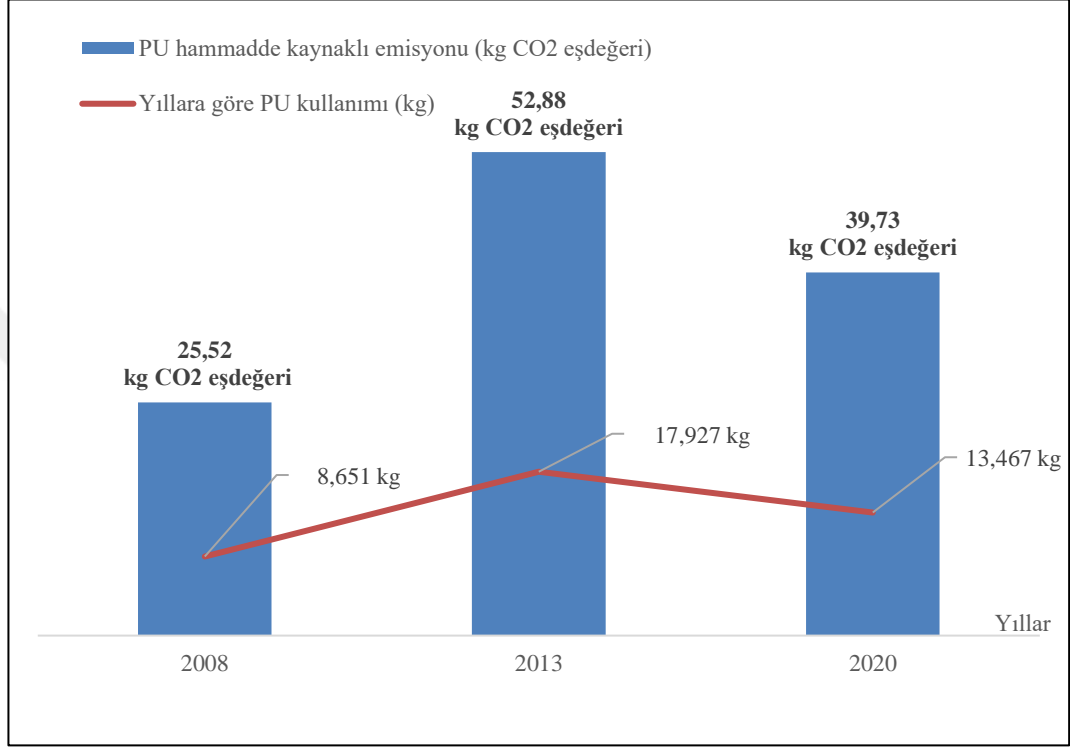
4.7. Poliüretan Hammadde Kaynaklı Emisyonların Yıllara Göre Değerlendirilmesi

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 kgCO₂eşdeğeri/kg ile PA6’ya ait olduğu görülmektedir. Poliöl:izosyanat 2:1 oranda karışım kabulü yapılan poliüretanın ise emisyon faktörü 2,95 kg CO₂eşdeğeri/kg’dır.

Çizelge 4.13. Paspas üretimi sırasında oluşan atıklar

Tür	Hammadde	Emisyon Faktörü (kgCO 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	
	İzosyanat	4,24	
	Poliöl	3,80	
	Poliüretan (Poliöl:izosyanat 2:1)	2,95	

2,95 kg CO₂eşdeğeri/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 CO₂ eşdeğeri ile 2013 yılına aittir.



Şekil 4.10. Blok sünger üretim prosesi ve çevresel unsurları

Bir bütün olarak aracın kg CO₂ eşdeğeri ile emisyon hesaplaması firmaların sürdürülebilirlik raporlarında paylaşılmaktadır. 2022 yılına ait verilere göre ülkemiz otomobil üreticilerinden Ford firmasının sera gazı emisyonu 300 kg CO₂ eşdeğeri, Tofaş firmasının sera gazı emisyonu 249 kg CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂eşdeğeri/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 CO₂eşdeğeri literatürde yer almaktadır. (Kılıç, 2017). Hacimsel hesapla tüm binek araca oranlandığında ise 370 kg CO₂eşdeğeri bulunmaktadır. Buradan aracın sadece koltuklarının üretimi sırasında oluşan sera gazı emisyonları, aracın tamamının yarattığı emisyonlardan 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 sürdürülebilir çözümler üretilmesi gereken alanların başında gelmektedir. Otomobilde plastik kullanımı, üretim ve tasarım kolaylıkları yanı sıra aracı hafifletmesi, beraberinde yakıt ekonomisinde iyileşme ve CO₂ 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 poliüretan malzeme onanına sahip koltuk grubunun poliüretan malzemeler içeren bileşenlerinin 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 üretim 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 CO₂ 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 gelişme 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
- Akoyalı, 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