

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AHŞAP-PLASTİK KOMPOZİTLERİN ENDÜSTRİYEL ÜRETİM SÜRECİNE  
İLİŞKİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖZDE ÇOLAK BAYRAM

TEZ DANIŞMANI

DOÇ.DR. BURÇİN ATILGAN TÜRKMEN

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

DOÇ.DR. GAMZENUR ÖZSİN

BİLECİK, 2024

10610332

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AHŞAP-PLASTİK KOMPOZİTLERİN ENDÜSTRİYEL ÜRETİM SÜRECİNE  
İLİŞKİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖZDE ÇOLAK BAYRAM

TEZ DANIŞMANI

DOÇ.DR. BURÇİN ATILGAN TÜRKMEN

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

DOÇ.DR. GAMZENUR ÖZSİN

BİLECİK, 2024

10610332

## BEYAN

‘‘Ahşap-Plastik Kompozitlerin Endüstriyel Üretim Sürecine İlişkin Yaşam Döngüsü Çevresel Sürdürülebilirlik Analizi’’ adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
<b>DESTEK ALINMIŞTIR</b>	<b>X</b>	<b>DESTEK ALINMAMIŞTIR</b>	
<b>Destek alındı ise;</b>			
<b>Destekleyen kurum;</b> Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi			
<b>Desteğin Türü</b>		<b>Proje Numarası</b>	
<b>1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)</b> X		2022-01.BŞEÜ.03-07	
<b>2- TÜBİTAK</b>			
<b>Diğer;</b> ..... .....			
<b>ETİK KURUL onayı var ise;</b>			
<b>ETİK KURUL karar tarih/sayı:</b>		...../..... .....	

**Gözde ÇOLAK BAYRAM**

**Tarih**

.../.../2024

**İmza**

.....

## ÖN SÖZ

Bu tez çalışması, ‘‘Ahşap-Plastik Kompozitlerin Endüstriyel Üretim Sürecine İlişkin Yaşam Döngüsü Çevresel Sürdürülebilirlik Analizi’’ üzerine yürütülen bir araştırmanın ürünüdür. Bu çalışma, TÜBİTAK 122N016 numaralı ve Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2022-01.BŞEÜ.03-07 numaralı projeler ile desteklenmiştir. Projeye sunulan destek, araştırmanın başarıyla tamamlanmasına önemli katkılar sağlamıştır. Bu nedenle, TÜBİTAK ve Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne sağladıkları değerli desteklerinden dolayı minnettarız.

Bu uzun ve zorlu süreç boyunca beni destekleyen, rehberlik eden ve tezimin gelişimine katkıda bulunan birçok kişiye teşekkür etmek istiyorum.

Öncelikle, tezimizin yönlendirilmesindeki değerli katkıları için Doç. Dr. Burçin ATILGAN TÜRKMEN ve Doç. Dr. Gamzenur ÖZSİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Beni bilgi ve deneyimleriyle donatarak, her adımda yanımda olan ve bu çalışmanın gerçekleşmesine öncülük eden değerli Hocalarım sizlerle çalışmak büyük bir onurdu.

Tezimde kaynak olarak kullanılan eserlerin yazarlarına da teşekkür etmeyi ihmal etmemeliyim. Onların özverili çalışmaları, bu tezin oluşturulmasında temel kaynaklar oluşturdu.

Son olarak, bu günlere ulaşmamdaki emekleri adına, değerli annem Şendağ ÇOLAK ve babam Feyzullah ÇOLAK' a; bu süreçte hiçbir şekilde desteğini esirgemeyen sevgili eşim Yakup BAYRAM' a teşekkürü bir borç bilirim.

**Gözde ÇOLAK BAYRAM**

**2024**

## ÖZET

### AHŞAP-PLASTİK KOMPOZİTLERİN ENDÜSTRİYEL ÜRETİM SÜRECİNE İLİŞKİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ

Günümüzde otomotiv endüstrisi, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir üretim uygulamalarının benimsenmesi konularında artan bir öneme sahiptir. Ahşap plastik kompozit (APK) malzemelerin yaşam döngüsü çevresel sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi aynı zamanda otomobil endüstrisinde daha sürdürülebilir üretim uygulamalarının benimsenmesine katkıda sağlayacaktır. Potansiyel iyileştirme fırsatlarının belirlenmesi ise sektörde çevresel etkilerin daha etkili bir şekilde azaltılmasına yönelik stratejilerin oluşturulmasına yardımcı olacaktır. Bu amaçla yürütülen çalışma polipropilen (PP) esaslı APK malzemelerin endüstriyel üretimi esnasında oluşan çevresel etkilerinin yaşam döngüsü boyutunda detaylı bir şekilde incelenmesi ve sürdürülebilirliğin geliştirilmesi için potansiyel fırsatların belirlenmesine odaklanmıştır. Çevresel etkilerin hesaplanması için Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) metodu kullanılmış ve analiz için ISO 14040 ve 14044 serisi standartları takip edilmiştir. Ayrıca incelenen malzeme taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve termogravimetrik analiz (TGA) analizleri ile karakterize edilmiştir. Çalışmanın sınırları ham madde elde edilmesi ve nakliyesi ile üretim süreci olarak belirlenmiş olup, fonksiyonel birimi 1 m<sup>2</sup> APK kullanılmıştır. Modelleme için GaBi versiyon 10.7 kullanılarak çevresel etkiler CML yöntemiyle analiz edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, APK'nin yaşam döngüsü çevresel etkileri incelendiğinde tatlı su eko-toksisite potansiyeli (TSEP), deniz eko-toksisite potansiyeli (DEP), ötrofikasyon potansiyeli (ÖP) dışındaki diğer dokuz etki kategorisinin en fazla ham madde eldesinden kaynaklandığı bulunmuştur. Bu sonuçlar temelinde, hammadde ve üretim basamakları için alternatif iyileştirme modelleri geliştirilmiş ve bu iyileştirmelerin hayata geçirilmesi durumunda APK üretiminden kaynaklanan çevresel etkilerin nasıl değişiklik göstereceği analiz edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, Sürdürülebilirlik, Ahşap Plastik Kompozit, Çevresel Etki

## ABSTRACT

### LIFE CYCLE ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY ANALYSIS OF INDUSTRIAL PRODUCTION PROCESS FOR WOOD PLASTIC COMPOSITES

The automotive industry is increasingly focusing on reducing environmental impact and implementing sustainable manufacturing practices. Assessing the life cycle environmental sustainability of wood plastic composite (WPC) materials will help the automotive industry adopt more sustainable manufacturing practices. The identification of potential improvement opportunities will aid in the development of strategies for more effective environmental impact mitigation in the sector. This study focuses on a detailed investigation of the environmental impacts of industrial production of polypropylene (PP)-based APK materials across the entire life cycle, as well as the identification of potential opportunities for improving sustainability. The environmental impacts were estimated using the Life Cycle Assessment (LCA) method, and the analysis was performed in accordance with ISO 14040 and 14044 standards. Scanning electron microscope (SEM) and thermogravimetric analysis (TGA) analyses were also used to characterize the material under study. The study's boundaries were determined as raw material extraction, transportation, and production processes, with a functional unit of 1 m<sup>2</sup> WPC. GaBi version 10.7 was used for modeling, and the environmental effects were analyzed using the CML method. According to the findings, when the WPC's life cycle environmental impacts were examined, it was discovered that the nine impact categories other than freshwater ecotoxicity potentials, marine ecotoxicity potentials, and eutrophication potential were primarily caused by raw material extraction. Based on these findings, alternative scenarios for raw materials and production steps were created, and the environmental impact of WPC production was examined if these improvements were implemented.

**Keywords:** Life Cycle Assessment, Sustainability, Wood-Plastic Composite, Environmental Impact

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT .....	iii
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
GRAFİKLER LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİSİ.....	2
2.1. Kompozit Malzemeler .....	2
2.1.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi .....	3
2.2. Dünya ve Türkiye’de Kompozitler .....	5
2.3. Ahşap Plastik Kompozitler .....	7
2.3.1. APK Malzemesi Kullanım Alanları.....	7
2.3.2. APK Malzeme Üretiminde Kullanılan Ham Maddeler .....	9
2.3.2.1. Lignosellülozik Biyokütle.....	9
2.3.2.2 Plastik Ham Maddeler .....	12
2.3.1.2.1. Polistiren (PS).....	13
2.3.1.2.2. Polipropilen (PP) .....	13
2.3.1.2.3. Polivinilklorür (PVC).....	14
2.3.2.3 Ahşap Plastik Kompozit Malzemelerin Üretiminde Kullanılan Dolgu Maddeleri ve Katkılar.....	15
2.4. Ahşap Plastik Kompozit Malzemelerin Sürdürülebilirliği .....	15
2.5 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi .....	17
2.5.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Tanımı ve Kullanım Alanları.....	17

2.5.2. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Metodolojisi .....	19
2.5.2.1. Amaç ve kapsam tanımı .....	19
2.5.2.2. Envanter Analizi .....	21
2.5.2.3. Etki Değerlendirmesi.....	22
2.5.2.4. Sonuçların yorumlanması .....	26
2.6. Ahşap Plastik Kompozitlerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinden Güncel Literatür Örnekleri.....	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
3.1. APK Malzeme Karakterizasyonu.....	33
3.1.1. Termogravimetrik Analiz ile Malzemenin Termal Stabilitesi ve Özelliklerinin Tespiti.....	33
3.1.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Malzemenin Morfolojik Analizi ..	33
3.2. Amaç ve Kapsam.....	33
3.3. Envanter Analizi .....	35
3.4. Etki Analizi .....	37
3.4.1. Çevresel Etki Kategorileri .....	37
3.5. Sonuçların Yorumlanması .....	42
4. BULGULAR .....	42
4.1. APK Malzeme Üretiminin Çevresel Etkileri .....	42
4.1.1. ATP Element.....	44
4.1.2. ATP (fosil) .....	44
4.1.3. AP .....	45
4.1.4. ÖP .....	45
4.1.5. TSEP.....	45
4.1.6. KIP.....	45
4.1.7. İTP .....	46
4.1.8. DEP.....	46

4.1.9. OTİP .....	46
4.1.10. FOOP.....	46
4.1.11. KEP.....	47
4.2. APK Malzeme Üretimini Çevresel Etkilerinin Azaltılması .....	47
4.2.1. Geri Dönüştürülmüş PP Kullanımı .....	47
4.2.2. Alternatif Ham Madde Seçeneklerinin Kullanılması .....	48
4.2.3. Alternatif Ulaşım Senaryolarının Değerlendirilmesi.....	49
4.2.4. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanılması.....	50
4.3. APK Malzeme Karakterizasyonu.....	51
4.3.1. APK Malzemesi için Termogravimetrik Analiz Sonuçları.....	51
4.3.2. SEM ile Ahşap-Plastik Kompozit Malzemenin Mikroyapısının İncelenmesi.....	53
5. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER .....	55
5.1. Sonuç .....	55
5.2 Tartışma.....	56
5.2.1. APK Yaşam Döngüsü Çevresel Etkileri.....	56
5.2.2. APK Malzeme Üretimini Çevresel Etkilerinin Azaltılması .....	58
5.3. Öneriler .....	61
KAYNAKÇA .....	64

## TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
<b>Tablo 1. 1.</b> Lignoselülozik biyokütlenin APK malzeme üretim süreçlerine katılmasının sunacağı avantajlar .....	12
<b>Tablo 2. 1.</b> Yaşam döngüsü analizi çalışmalarında sıklıkla kullanılan etki kategorileri .....	25
<b>Tablo 3. 1.</b> Ham madde ve ulaşım verileri .....	36
<b>Tablo 3. 2.</b> Enerji verileri.....	36
<b>Tablo 3. 3.</b> Küresel ısınma potansiyeli için bazı gazların emisyon faktörü.....	38

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1. APK malzeme uygulama alanları .....	8
Şekil 2. 2. Yumuşak odunsu (a) ve sert odunsu (b) biyokütle yapısı ile biyokütlenin biyokimyasal bileşimi (c).....	10
Şekil 2. 3. PS kimyasal yapısı.....	13
Şekil 2. 4. PP kimyasal yapısı.....	14
Şekil 2. 5. PVC kimyasal yapısı.....	14
Şekil 2. 6. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi yönteminin gelişim süreci.....	17
Şekil 2. 7. Yaşam Döngüsü Aşamaları .....	18
Şekil 2. 8. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Metodolojisi .....	19
Şekil 2. 9. Bir birim sürecin girdi ve çıktılarını gösteren yaşam döngüsü envanterinin şematik gösterimi.....	22
Şekil 3. 1. APK malzemesi .....	34
Şekil 3. 2. APK malzeme üretimi için belirlenen sistem sınırları.....	34

## GRAFİKLER LİSTESİ

Sayfa

<b>Grafik 2. 1.</b> Kullanılan polimerik matrise göre 2016 yılında dünya çapında ahşap plastik kompozitlerin pazar payı.....	<b>6</b>
<b>Grafik 4. 1.</b> APK malzeme için yaşam döngüsü çevresel etkiler.....	<b>43</b>
<b>Grafik 4. 2.</b> APK malzemesinin çevresel etkilerinin yaşam döngüsü basamaklarına göre yüzdesel dağılımı.....	<b>43</b>
<b>Grafik 4. 3.</b> APK malzemesi üretim aşamalarının çevresel etki kategorilerine göre dağılımı	<b>44</b>
<b>Grafik 4. 4.</b> Ana model ve geri dönüştürülmüş PP kullanımının APK malzemesi üretiminde KIP değerlerinin karşılaştırılması.....	<b>48</b>
<b>Grafik 4. 5.</b> APK malzemesi üretiminde ana model ve alternatif ham maddelerin çevresel etkilerinin karşılaştırılması.....	<b>49</b>
<b>Grafik 4. 6.</b> PP ham maddesi ulaşım senaryolarının çevresel etkilerinin karşılaştırılması.....	<b>50</b>
<b>Grafik 4. 7.</b> APK malzemesinin üretiminde yenilenebilir enerji kullanımının ana model ile karşılaştırılması .....	<b>51</b>

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

**N<sub>2</sub>O:** Nitröz oksit

**ACQ:** Alkaline Copper Quaternary (Alkali Bakır Kuaterner)

**APK:** Ahşap Plastik Kompozit

**AT:** Ahşap Tozu

**ATP element:** Abiyotik Tükenme Potansiyeli Element

**ATP fosil:** Abiyotik Tükenme Potansiyeli Fosil

**C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>:** Etilen

**CH<sub>4</sub>:** Metan

**CO<sub>2</sub>:** Karbondioksit

**CO<sub>2</sub>eşd.:** Karbondioksit Eşdeğeri

**DCB:** 1,4-diklorobenzen

**DDSA:** Damıtma-Tane ve Çözünürleri

**DEP:** Deniz Suyu Ekotoksitesitesi Potansiyeli

**EE:** Ekolojik Etki

**EPD:** Enviromental Product Declaration (Çevresel Ürün Beyanı)

**Fb:** Fonksiyonel Birim

**FOOP:** Fotokimyasal Ozon Oluşturma Potansiyeli

**HCL:** Hidrojen Klorür

**HDPE:** Yüksek Yoğunluklu Polietilen

**HFC'ler:** Hidroflorokarbonlar

**ISO:** International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)

**İTP:** İnsan Toksisitesi Potansiyeli

**KEP:** Karasal Ekotoksitesite Potansiyeli

**KIP:** Küresel Isınma Potansiyeli

**LDPE:** Düşük yoğunluklu polietilen

**MAPE:** Maleik Anhidrit Grafted Polietilen

**N:** Azot

**NH<sub>3</sub>:** Amonyak

**NO<sub>x</sub>:** Azot Oksitleri

**OTİP:** Ozon Tabakası İncelmesi Potansiyeli

**ÖP:** Ötrofikasyon Potansiyel

**P:** Fosfor

**PA:** Poliamid

**PAGEV:** Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı

**PC:** Polikarbonat

**PE:** Polietilen

**PET:** Polietilen Tereftalat

**PFC'ler:** Perflorokarbonlar

**PLA:** Polilaktik Asit

**PP:** Polipropilen

**PS:** Polistiren

**PVC:** Polivinilklorür

**SEM:** Taramalı Elektron Mikroskobu

**SF<sub>6</sub> :** Kükürt Heksaflorür

**SO<sub>2</sub>:** Kükürt Dioksit

**TGA:** Termogravimetrik Analiz

**TSEP:** Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli

**YDD:** Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

**YDED:** Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi

## 1. GİRİŞ

Günümüzde, dünya nüfusunun hızla artışı ve kaynaklarının sınırlılığı, su, hava, toprak ve yeraltı zenginlikleri gibi doğal kaynakların sürdürülebilirliği konusunda ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu durum, doğal kaynakların kapasite üstü kullanılması ve kirlenmesiyle birleşerek, gelecek nesillerin bu değerli kaynaklara kısıtlı erişimle karşılaşmasına neden olmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma, doğal kaynakların sürdürülebilirliğini sağlamak ve gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakmak için önemli bir yaklaşımdır. Bu kapsamda, doğal kaynakların etkin bir şekilde yönetilmesi ve kullanılması gerekmektedir. Birleşmiş Milletler'in Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri, çeşitli sektörlerde ve dünya genelinde sürdürülebilirliği teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Bu hedefler arasında sorumlu üretim ve tüketim, temiz su ve sanitasyon, iklim eylemi, sürdürülebilir şehirler ve topluluklar gibi alanlar yer almaktadır.

Çevre bilincinin artmasıyla birlikte, bir ürünün, sistemin ya da hizmetin kalite ve maliyet gibi geleneksel değerlendirme kriterlerinin yanı sıra, doğal kaynak kullanımı ve küresel çevre sorunları gibi etkiler de karar verme süreçlerinde önemli hale gelmiştir. Bu bağlamda, sürdürülebilir üretim kavramı, doğal kaynakların etkin ve uzun vadeli kullanımını sağlamak amacıyla giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu kavram, endüstrilerin, şirketlerin ve bireylerin sürdürülebilirlik ilkelerine dayalı çözümler arayarak, çevresel etkilerini minimize etmelerine yönelik bir rehberlik sunmaktadır (Hauschild vd., 2005).

Sürdürülebilir üretim kavramı, yaşam döngüsü yaklaşımını benimsemektedir. Bu yaklaşım, ham madde çıkarılmasından başlayarak, nakliye, üretim, tüketim, kullanım ve atık yönetimi aşamalarını içeren bütünsel bir sistemi temel almaktadır. Bu çerçevede, ürün ve üretim sistemlerinin çevresel etkileri, insanların sağlıklı bir yaşam sürmeleri ve çevre kalitesinin artırılması hedefleri doğrultusunda yaşamları boyunca değerlendirilmesi gerekmektedir.

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD), çevresel sürdürülebilirliğin değerlendirilmesi için 1990'lardan beri kullanılan bir çevresel etki analizi yöntemidir. Bu metodoloji, bir ürün veya üretim sisteminin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini sistematik olarak analiz etmeyi amaçlamaktadır. Ham madde çıkarılmasından başlayarak, ürünün kullanım sürecine ve atık yönetimine kadar olan tüm aşamaları içeren bu analiz, çevresel etkilerin tespit edilmesine ve değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca YDD, alternatiflerin değerlendirilmesi, geliştirme veya iyileştirme çalışmalarının yapılması için kullanılan bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem sayesinde, ürün ve üretim sistemlerinde çevresel sürdürülebilirliği

artırmak amacıyla çeşitli stratejiler geliştirilebilmekte ve uygulanabilmektedir. Bu şekilde, sürdürülebilir üretim kavramı, yaşam döngüsü yaklaşımıyla birleşerek çevresel etkilerin en aza indirilmesini ve kaynakların daha etkin bir şekilde kullanılmasını hedeflemektedir (Adisa Azapagic vd., 2010b; Sørensen, 2011).

YDD ve sürdürülebilir üretim kavramları, çevre bilincinin ve sürdürülebilirlik prensiplerinin vazgeçilmez birer parçası olmaktadır. Bu bağlamda, otomotiv sektörü de bu ilkelere uyum sağlama çabasında bulunmaktadır. Özellikle, günümüzde artan trafik sorunları, çevresel etkilerin minimize edilmesi ve kaynakların daha etkili kullanılması konularındaki baskıları artırmaktadır.

Bu tez çalışmasında Birleşmiş Milletler'in sürdürülebilir kalkınma hedeflerine paralel olarak otomotiv sektörü için üretilen APK malzemesinin çevresel etkilerinin yaşam döngüsü boyutunda incelenmesi ve seçilen ürün için potansiyel iyileştirme fırsatlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada ayrıca alternatiflere bağlı senaryolar analiz edilerek çevresel etkilerdeki değişiklikler değerlendirilerek yararlanıcılara tavsiyeler sunulmuştur.

Hazırlanan tezde ilk olarak kompozit malzemeler ile ilgili literatür bilgisi derlenerek, küresel ve ulusal boyutta APK üretim ve tüketim verileri ile APK'nin çevresel sürdürülebilirliği ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Çalışmamızın yöntem ve metot bölümünde, YDD metodolojisine uygun olarak çalışmanın amacı, kapsamı, modellenen sistemlere ait envanter analizi bilgileri sunulmuştur. APK üretim sistemi için yaşam döngüsü boyutunda hesaplanan 11 adet CML çevresel etki kategorisi ile sürdürülebilirlik değerlendirilmiştir ve ayrıca APK'nin SEM ve TGA analizleri yapılmıştır. PP esaslı APK'lerin endüstriyel üretimine ilişkin YDD analizi sonucunda hesaplanan çevresel etkilerin azaltılabilmesi için üretim sürecine ilişkin farklı senaryolar incelenen sisteme adapte edilmiştir. Bu amaçla, polimer ham maddelerin, geri dönüştürülmüş malzemenin, ulaşım mesafesinin etkisinin ve yenilenebilir enerjinin etkisinin incelendiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmamızın son kısmında ise elde ettiğimiz bulgular karşılaştırılarak en çevre dostu üretim sürecinin belirlenmesine yönelik sonuçlar sunulmuştur.

## **2. LİTERATÜR BİLGİSİ**

### **2.1. Kompozit Malzemeler**

Kompozit malzeme, önemli ölçüde farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşen malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşan, çeşitli kombinasyonlarla kendi yapısını oluşturan bileşenlerden farklı benzersiz özelliklere sahip bir malzeme olarak tanımlanabilmektedir (Clyne ve Hull, 2019). Kompoziti oluşturan maddeler arasında genellikle

birincil kimyasal etkileşimler bulunmaz ve sıkça kompozit içindeki bileşenlerin birbirleriyle temas ettikleri noktalar açıkça fark edilebilmektedir (Saçak, 2012). Kompozit malzemelerin hazırlanma süreci, çeşitli tür veya fazlardan her birinin tek başına sahip olmadığı özellikleri birleştirerek, üstün özelliklere sahip ileri teknoloji ürünlerin ortaya çıkmasına olanak sağlamaktadır. Bu yöntem, yeni oluşturulan ürünün, kendi bileşenlerinin özelliklerinden farklı bir sentez ürünü olma özelliğini taşımasına imkân vermektedir. Aynı zamanda, bileşenlerin istenmeyen özelliklerini ortadan kaldırarak, yeni ve farklı bir malzeme davranışını sergilemektedir (Dai ve Fan, 2014; Kaymakci, 2015). Böylelikle geleneksel malzemelerin özelliklerinin yetersiz kaldığı durumlarda bileşenlerin sinerjik etkilerinden de faydalanarak pek çok fiziksel ve kimyasal avantaj elde edilebilmektedir (Hale, 1976; Sahmaran vd., 2008). Örneğin, tokluk, hafiflik, korozyon direnci gibi malzeme özelliklerinin iyileştirilmesini amaçlayan pek çok kompozit malzeme tasarımları yapılarak, farklı uygulamalar için bu fonksiyonel malzemeler tercih edilmektedir.

Kompozit malzemeler, takviye edici ve matris (reçine) adı verilen iki ana bileşenden oluşmaktadır. Takviye edici, kompozitin mekanik dayanıklılığında sorumlu olup, dayanıklılığı artırıcı etkisi genellikle kompozitin hacminin %10'unu geçtiğinde gözlemlenmeye başlamaktadır. Kompozitin matris bileşeni ise, takviye maddesini bir arada tutma görevinin yanı sıra takviye ediciyi dış etkilerden korumakta; ayrıca, kompozitin şeklini belirlemektedir (Arun Kumar DT vd., 2016; Dixit vd., 2017; Saçak, 2012). Matris genellikle süneklik, şekillendirilebilirlik ve termal iletkenlik gibi belirli fiziksel ve mekanik özelliklere sahip nispeten yumuşak bir faz olarak görülmektedir (Kumlutaş vd., 2003). Kompozit içerisinde bulunan takviye malzemeleri elyaf ve partikül gibi farklı morfolojik özelliklere sahip olabilirken, kompozit malzemelerin sınıflandırılması matris fazı da göz önünde bulundurularak yapılabilmektedir. Kompozit malzemelerde kullanılacak takviye ile uyumlu olarak kullanılması gereken matris, temel olarak takviye malzemelerini hasardan koruyabilecek uygun düşük yoğunluğa ve mukavemete sahip malzeme gruplarından seçilmektedir (Davis vd., 2010; de Araujo, 2011; Zhu vd., 1993).

### **2.1.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi**

Malzeme tarihine bakıldığında, kompozitlerin oldukça eski bir geçmişe sahip olduğu gözlemlenmektedir. İlk takviyeli polimerik bazlı malzeme olan takviyeli bitüm veya zift, M.Ö. 4000-2000 arasında Babil'de kullanılmıştır. M.Ö. 3000 öncesinde, okçuların kullandığı yayların kompozit malzemeler olduğu, Mısır ve Mezopotamya'da nehir kıyılarının, papirüs kamışların bitüm matrislerde yerleştirilerek yapıldığına dair birçok belge bulunduğu belirtilmektedir. M.Ö.

2500'lerde Mısır'da mumyalama sanatında, keten teypler ve doğal kauçuk kullanılarak ilk filament sarma prosesi uygulanmıştır. Başka bir örnek ise M.Ö. 500'lerde Yunanlıların üç sıra kürekli kadirga denilen gemilerin yapımında kullandıkları kompozit malzemelerdir (Beşergil, 2016). Ayrıca, ilk çağlardan beri insanlar, kırılğan olan malzemelerin dayanıklılığını artırmak amacıyla içlerine bitkisel veya hayvansal lifler eklemiştir. Bu konu üzerinde çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Kuşkusuz, bunun en iyi örneklerinden birisi kerpiç malzemelerdir. Kerpiç karışımında saman, killi çamurun içine ilave edilmiş; bitkinin sap ve dalları ise malzemenin hem dayanımını artırmak hem de üretiminin sağlıklı olmasını sağlamak için kullanılmıştır (Güneşkaya, 2017).

Modern kompozit malzemelerin kullanımı, II. Dünya Savaşı dönemiyle birlikte hız kazanmıştır. Özellikle askeri alanda birçok çalışma yapılmıştır. II. Dünya Savaşı sırasında, havacılık endüstrisi daha hafif ve dayanıklı malzemelere olan ihtiyacı artırmıştır. Bu dönemde kompozit malzemeler, metal alaşımlara kıyasla daha hafif ve güçlü yapıları sayesinde uçak ve diğer askeri ekipmanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Cam elyaf takviyeli plastikler özellikle savaş uçaklarının ve helikopterlerin yapılarında kullanılmış ve performanslarını artırmıştır. II. Dünya Savaşı'nın ardından, sivil endüstride de kompozit malzemelerin kullanımı giderek yaygınlaşmış ve farklı sektörlerde çeşitli uygulamaları keşfedilmiştir. Günümüzde otomotiv, havacılık, inşaat ve spor malzemeleri gibi pek çok alanda kompozit malzemeler aktif bir şekilde kullanılmaktadır (Şahin, 2006). Çimento ve asbest kompozitleri de levha eldesinde uzun yıllar boyunca kullanılmıştır. Günümüzde de farklı amaçlarla kullanılan levha şeklindeki malzemelerin eldesinde çeşitli kompozitlerin kullanımına sıkça rastlanmaktadır. Liflerle takviyeli sentetik reçineler bakıldığında ise bu malzemelerin 1950'li yılların ortalarından itibaren endüstride kullanılmaya başladığı görülmektedir. Elyaf takviyeli kompozitlere cam lifi takviyeli polyester reçineli kompozitler örnek verilebilir. Türkiye'de ise 1960'lı yıllardan itibaren çatı levhaları ve küçük teknelerin yapımında kompozit malzemelerin kullanımına rastlanmaktadır (Güneşkaya, 2017).

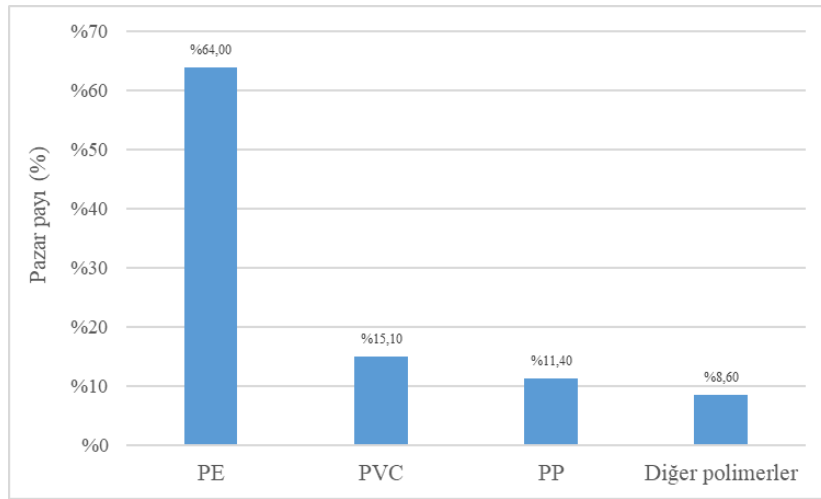
Günümüzde, özellikle uzay ve havacılık sanayisi gibi birçok alanda, kompozit malzemelerin kullanımı hızla artmaktadır. Bu malzemelerin sunduğu avantajlar, özellikle hafiflik, yüksek dayanıklılık ve uyarlanabilirlik gibi özellikler sayesinde, farklı sektörlerde giderek daha fazla benimsenmektedir. Aynı zamanda, daha detaylı inceleme ve araştırma imkanları sunulması durumunda, kompozit malzemelerin kullanımının pek çok başka alanda da mümkün olabileceği düşünülmektedir. Bu sebeplerle, kompozit malzemelerin potansiyelinin araştırılması, geniş bir alan olarak kabul edilmektedir (Jones, 1999).

## 2.2. Dünya ve Türkiye’de Kompozitler

Günümüz malzeme bilimi alanında, metal, polimer ve seramik matrisli kompozitler gibi çeşitli endüstrilerde kullanılan kompozit malzemeler öne çıkmaktadır. Bu matris tipleri, benzersiz mekanik, termal ve kimyasal özelliklere sahip oldukları için birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Ancak bu çalışma, özellikle polimer matrisli kompozitlere odaklanarak, bu özel kompozit türünün genel özelliklerini, pazar payını, istatistikleri ve endüstriyel önemini incelemeyi amaçlamaktadır.

Dünya genelinde olduğu gibi Türkiye’de kompozit üretim sektörü hızla gelişmektedir. PAGEV (Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı) raporuna göre, 2020 yılı Ocak-Ağustos döneminde %69,0 olan kapasite kullanımı, 2021 yılının aynı döneminde %75,4’e yükselmiş ve kapasite kullanımındaki artış 6,4 puan olarak kaydedilmiştir. Aynı dönemde kompozit malzeme pazarının hacmi 1,35 milyar € ve 250.000 ton olarak belirlenmiştir (PAGEV, 2023). Kompozit sektörü, Türkiye’de ikame malzemelerden pay alarak büyümektedir; hatta Türkiye’deki kompozit malzeme sanayisi, Avrupa ve dünya genelinden daha yüksek bir büyüme oranına sahiptir. Otomotiv sektörü kompozit malzemenin en yoğun kullanıldığı alanlardan biridir. Bu sektörde, elyaf, reçine, üretim süreci, uygulama ve araç türüne göre bölgesel bazda detaylı bir analiz yapılan bir rapora göre; 2022’deki 7,2 milyar ABD doları olan pazarın, 2028’e kadar 14,3 milyar ABD dolarına yükseleceği ve yıllık bileşik büyüme oranının %12,1 olacağı öngörülmektedir (Markets and Markets, 2024). Pazarda öngörülen bu büyümenin, hükümetlerin karbon salımını azaltma ve elektrikli araçlara geçiş konusundaki girişimleri sayesinde gerçekleşeceği vurgulanmaktadır. Özellikle yakıt tasarrufu sağlayan araçlar ve elektrikli araçlara olan talebin artmasıyla birlikte, hafif malzeme talebinin otomotiv kompozit pazarının büyümesine önemli bir şekilde etki etmesi beklenmektedir. Bu başarı, dünya genelinde büyük ilgi gören ahşap kompozitlerin çeşitli uygulamalar için sürekli olarak geliştirildiği, özellikle Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri’nde son derece popüler hale geldiği bir döneme denk gelmektedir (Markets and Markets, 2024). 2016 yılına ait bir çalışma, ahşap plastik kompozitlerin dünya çapındaki pazar payını incelemiş ve kullanılan polimerik matrise göre bu pazarın dağılımını gösteren bir grafik sunulmuştur (Grafik 2.1.) Grafikteki verilere göre, polimerik matrisin %64’ü Polietilen (PE) ile temsil edilmiş, bu da PE’nin en çok tercih edilen polimer olduğunu göstermektedir. Bu bilgiler, ahşap kompozitlerin küresel ölçekte geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından benimsendiğini ve pazardaki etkinliğini artırdığını ortaya koymaktadır.

Küresel ahşap plastik kompozit pazarının 2021'de 5,76 milyar ABD dolar olduğu tahmin edilmektedir ve 2022'den 2030'a kadar %11,5'lik bir bileşik yıllık büyüme oranında büyümesi beklenmektedir (Yuca vd., 2014). Bu pazarın büyümesinde mutfak aksesuarları, ev mobilyaları, araç iç mekanları ve araç hoparlörleri gibi alanlarda artan uygulamalar etkili olmuştur. Ahşap plastik kompozitler, plastik katkı maddeleri arasında en hızlı büyüyenler olarak kabul edilmektedir. Bu bilgiler, Fortune Business Insights™ tarafından yayınlanan “Ahşap Plastik Kompozit Pazar Büyüklüğü, Hisse & Endüstri Analizi” başlıklı bir raporda yer almaktadır. Rapora göre, ahşap plastik kompozit pazarının büyüklüğü 2019'da 4,77 milyar ABD Doları iken, 2027 yılına kadar 9,03 milyar ABD Dolarına ulaşması ve tahmin döneminde %8,57'lik yıllık bileşik büyüme oranı sergilemesi beklenmektedir (Fortune Business Insights, 2020).



**Grafik 2. 1.** Kullanılan polimerik matrise göre 2016 yılında dünya çapında ahşap plastik kompozitlerin pazar payı

**Kaynak:** (Yuca vd., 2014).

Türkiye'de, küresel trendlere paralel olarak kompozit sektörü, özellikle ahşap kompozit alanında önemli bir büyüme yaşamaktadır. Mevcut kurulu üretim kapasitesi 20 bin tonu aşarken, satış hacmi de 10 bin tona yaklaşmıştır. Bu olumlu eğilim, ahşap kompozit pazarındaki üretici firma sayısının her geçen yıl artarak 12'ye ulaşmasına neden olmuştur. Sektör, ekonomik zorluklara rağmen büyüme eğilimini sürdürmekte ve özellikle mobilya sektöründeki kullanım alanını ve pazar payını, sürekli olarak geliştirilen yeni ürünlerle hızla artırmaya devam edeceği öngörülmektedir. Türkiye'deki ahşap kompozitin 10 bin ton civarındaki hacminin büyük bir kısmını zemin döşemeleri oluştururken, geriye kalan yüzde 15'lik kısmı ise ağırlıklı olarak pergolalar gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu bağlamda, ahşap kompozitin hem dünya hem de Türkiye'deki geleceği parlak görünmekte ve inşaat projelerindeki sürekli artan talep doğrultusunda büyümeye devam etmesi beklenmektedir (AİMSAD Dergisi, 2023).

## 2.3. Ahşap Plastik Kompozitler

APK terimi bitki lifleri ve termosetler veya termoplastikler içeren kompozit malzemeyi ifade etmektedir. Yaygın olarak bu kompozitlerin üretiminde, odun ya da ahşap unlarının veya fiberleri ile termoplastik esaslı PE, PP, PLA, PVC, PET ve PS polimerleri kullanılabilir (Najafi, 2013).

Ahşap-plastik kompozitler, ahşap ve plastik ham maddelerin birleşiminden kaynaklanan malzemelerdir. Bu kompozitler, ahşap lifi özelliklerine sahip olup düşük maliyet, düşük yoğunluk ve biyolojik olarak parçalanabilirlik gibi avantajlar sunmaktadır. Aynı zamanda, polimer matris özelliklerini içererek nem direnci ve boyutsal stabilite gibi özellikleri de bünyesinde barındırmaktadır. APK üretimi, geri dönüştürülmüş plastik ve atık ahşap kullanımıyla ‘‘yeşil teknoloji’’ olarak sınıflandırılabilir bir süreci ifade etmektedir (Bala, 2018; Taufiq vd., 2018; Turku ve Kärki, 2014). Bu hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli avantajlar sağlamaktadır, çünkü daha az petrol türevi kullanılarak karbon salımının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. APK malzeme, plastik ve ahşaba kıyasla üstün özelliklere sahip olması nedeniyle geniş kullanım alanlarına sahiptir. Daha düşük maliyeti, ahşap malzemeye göre daha iyi boyutsal dayanıklılığı ve toksik kimyasallar kullanmadan dayanıklılık elde etme özellikleri, APK'nin tercih edilme nedenlerinden bazılarıdır (Ashori, 2008). APK, istenilen boyut ve şekilde üretilebilme, farklı renk ve dokuda olabilme, çatlamalara, mantarlara ve böceklere karşı daha dayanıklı olma, aynı zamanda geri dönüştürülmüş/atık malzemelerden üretilebilme gibi avantajlar sunarak pek çok uygulama için çeşitli olanaklar sunmaktadır (Ashori, 2008; Karakuş, 2008).

### 2.3.1. APK Malzemesi Kullanım Alanları

APK'den imal edilen malzemeler son derece geniş endüstriyel uygulama alanına sahiptir. Bu malzemeler, geleneksel kompozitler, polimer malzemeler ve ham ahşap esaslı malzemelerle karşılaştırıldığında, sürdürülebilirlik, kalite ve maliyet bakımından önemli avantajlar sağladığı için, birçok alanda geleneksel malzemelere ve geleneksel kompozitlere ikame olarak kullanılabilir. Aynı zamanda APK'lerin, koruyucu maddelerle işlenmiş masif ahşap veya çürümeye dayanıklı türlerden masif ahşap malzemelere daha az bakım gerektirdiği bilinmektedir.

Üreticiler ve mühendisler, her zaman daha iyi ürünler üretmek için kullanılacak yeni malzemeler ve geliştirilmiş süreçler arayışındadırlar. APK'ler otomotiv, inşaat, denizcilik, elektronik ve havacılık gibi birçok sektörde çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Ashori,

2008). Şekil 2.1'de, APK uygulama alanlarına dair bazı örnekler bulunmaktadır. Sol üst resimde Formula 1 ve diğer motor sporları uygulamaları, sağ üstte kayaklar ve diğer spor malzemeleri, sol altta mobilya ve diğer iç mekan uygulamaları, sağ altta ise otomotiv iç mekanları yer almaktadır. Bunların yanı sıra, spor ve müzik aletleri yapımında da ahşap-plastik kompozit parçalar sıklıkla kullanılmaktadır. Örneğin, lamine kayak malzemeleri, golf malzemeleri, hokey ve beyzbol sopalarının üretiminde ahşap-plastik kompozitler önemli bir rol oynamaktadır. Müzik aletlerine örnek olarak ise nefesli ve telli çalgıların imalatında bu kompozitlerin kullanımı öne çıkmaktadır. Yapı malzemelerinde ahşap plastik kullanımına yönelik uygulamalar arasında ise elektrik direkleri, çitler, güverte malzemeleri ve bina dış cephe kaplamaları gibi uygulamalar bulunmaktadır (Bledzki vd., 2015; Gubana ve Melotto, 2018; Jacob, 2006; Kristak vd., 2021; Martins vd., 2017; Sun vd., 2018).



**Şekil 2. 1.** APK malzeme uygulama alanları

**Kaynak:** (Mason, 2023)

APK malzeme kullanım alanlarından biri olan, özellikle otomotiv ve ulaşım sektörlerinde, yenilenebilir biyokütle malzemelerinin kullanımıyla çevre dostu ve maliyet açısından avantajlı ahşap-plastik kompozit malzemelere olan talep artmaktadır. Bu sektörlerde, daha yüksek performans, güvenlik, konfor, yakıt tasarrufu ve düşük üretim maliyetleri odaklanılırken, toplumsal talepler çevre dostu teknolojilere yönelik benimsemeyi artırmaktadır. Bu malzemeler, gösterge panellerinde, kapı panellerinde, bagaj raflarında, koltuk minderlerinde, sırt dayanaklarında ve kabin kaplamalarında süs parçası olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bitki lifleri, termo-akustik yalıtım amacıyla kompozitler içerisinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Teknik açıdan bakıldığında, bu kompozitler araçlarda mekanik mukavemeti

ve akustik performansı artırarak, malzeme ağırlığını ve yakıt tüketimini azaltmaktadır. Ayrıca, geliştirilen malzeme yapıları sayesinde cam elyaf ve karbon esaslı kompozitlerin yanı sıra hatta metal parçaların yerini alma potansiyeline sahiptir (Ashori, 2008).

APK'lerin, katma değerli teknolojik ürünlerde kullanımının giderek yaygınlaşması hem endüstriyel imalat sektöründe hem de kırsal alanlarda çalışan insanlar için ekonomik kalkınmaya önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, ahşap kompozit malzemelerin kullanımının artması ve yeni alanlarda kullanılabilmesi, modern yaşamda sağladığı avantajların yanı sıra çevresel ve sosyoekonomik faydaları nedeniyle büyük bir öneme sahiptir (Ashori, 2008; Bledzki vd., 2015; Pritchard, 2004).

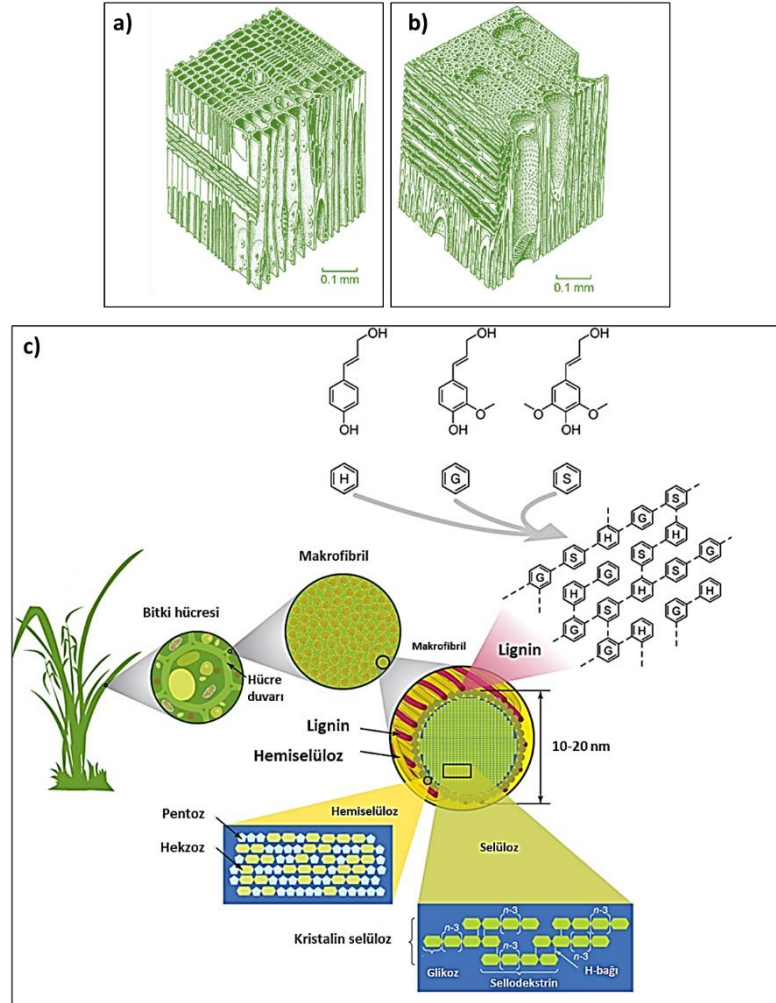
### **2.3.2. APK Malzeme Üretiminde Kullanılan Ham Maddeler**

APK'ler temelde iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar termoplastik ya da termosetlerden polimerler ve lignoselülozik biyokütledir. Bunların yanında, malzeme özelliklerini geliştirmek için çeşitli katkılar ve dolgular da yapıya eklenmektedir. APK'ler genellikle %10 ila %70 arasında ahşap dolgu maddesi veya güçlendiriciler kullanılarak üretilmektedir.

#### **2.3.2.1. Lignoselülozik Biyokütle**

Lignoselülozik biyokütle, adından da anlaşılacağı gibi lignin, selüloz ve hemiselülozdan oluşan doğal bir biyokütle yapısındadır. Ahşap terimi ise genel olarak ağaç gövdesinden elde edilen sert odunumsu biyokütleri tanımlayan bir terim olarak kullanılmaktadır. Fakat ahşap-plastik kompozit üretiminde hem sert odunumsu (hardwood) hem de yumuşak odunumsu (softwood) biyokütle kaynakları kullanılmaktadır. Bu nedenle literatürde bu konuda bir ikilem meydana gelmesine rağmen günlük pratik kullanıma uygunluğundan dolayı ahşap-plastik kompozit terimi sıklıkla tercih edilmektedir. Örneğin, çam, köknar, ladin, karaçam ve sedir ağaçları yumuşak odunsular arasında yer almaktadır. Sert odunsular ise genellikle geniş yapraklı ve koyu renklidir. Sert odunsular, yumuşaklardan daha yüksek yoğunluklara ve daha kalın hücre duvarlarına sahiptirler. Örneğin, meşe, dişbudak, karaağaç, kayın, huş ağacı gibi kaynaklar sert odunsular arasında yer almaktadır (Asif, 2009). Kimyasal olarak lignin, selüloz ve hemiselüloz temel bileşenlerinin yanı sıra biyokütle kaynakları yapısında çok az miktarda su, düşük molekül ağırlıklı organik ekstraktifler ve inorganikler de içermektedir. Şekil 2.2'de yumuşak odunsu ve sert odunsu biyokütlenin yapısal farklılıkları ile biyokütlenin biyokimyasal bileşimi gösterilmiştir.

Biyokütlenin yapısında, lignin ve hemiselüloz mikrofibrilleri, kristalin selüloz tarafından çevrelenmiş bir şekilde bulunmaktadır. Selüloz, biyokütlerde mikrofibriller halinde bulunan ve ağırsı bir yapıya sahip bir biyopolimerdir. Hemiselüloz ise heterojen ve amorf bir yapıda olan dallanmış bir moleküldür. Hemiselüloz, her bir selüloz mikrofibrilinin yüzeyine kovalent olmayan bağlarla sıkıca bağlanmış bir şekilde bulunmaktadır. Lignin ise büyük ve çapraz bağlı, amorf polimerik bir yapı olup, hemiselüloz moleküllerine kovalent bağlarla bağlıdır (Collard ve Blin, 2014; Gubana ve Melotto, 2018; Potters vd., 2010).



**Şekil 2. 2.** Yumuşak odunsu (a) sert odunsu (b) ve biyokütle yapısı ile biyokütlenin biyokimyasal bileşimi (c)

**Kaynak:** (Gubana ve Melotto, 2018)

APK'lerin üretiminde en yaygın olarak kullanılan ahşap dolgu maddesi odun unudur. Ayrıca, APK'lerin üretiminde atık veya kullanılmamış iğne yapraklı ve yapraklı ağaç odunları, yıllık bitkilerin çeşitli kısımları ve atık kağıtlardan elde edilen lifler ve çeşitli türlerde tarımsal bitki atıkları, kenevir ve kenaf gibi tabii lifler de kullanılabilir (Yılmaz, 2016). Çoğunlukla lifsi yapıdaki biyokütle kaynakları; çeşitli meyvelerden (pamuk, hindistan cevizi lifi), bitki saplarından (jüt, kenevir, kenaf) ya da yapraklarından (sisal, kendir) elde edilmektedir (Hon, 2000; McKendry, 2002). Günümüzde, farklı atık biyokütle kaynaklarının ahşap-plastik kompozitlerde hem endüstriyel ölçekte hem de araştırma amaçlı kullanım örnekleri bulunmaktadır. Tablo 1.1'de de belirtildiği gibi, malzeme üretiminde biyokütle kullanımı, geleneksel fosil yakıt temelli malzeme üretimine sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Ancak, endüstriyel uygulanabilirlik açısından, biyokütle kaynağının kompozit içerisindeki performansının yanı sıra bu kaynağın ucuz bir şekilde temin edilebilmesi de önemli bir kriter olarak göze çarpmaktadır. Bu nedenle, endüstriyel üretim tesislerinde, bölgesel olarak temininde sıkıntı yaşanmayacak biyokütlelerin işlenmesi tercih edilmektedir. Özellikle yıllık yetişen lignoselülozik liflerin plastikte dolgu malzemesi veya güçlendirici olarak kullanımı, düşük yoğunluğu, aşındırıcı olmaması, yüksek dolgu malzemesi imkanı, yüksek sertlik özellikleri ve liflerin işlem sırasında az aşınması gibi avantajları bulunmaktadır. Bu nedenle, farklı biyokütle kaynaklarının kompozit malzemelerde kullanımı ve onların performansının yanı sıra ekonomik ve sürdürülebilir temin edilebilirliği, gelecekte bu alandaki araştırmalarda önemli bir rol oynayacaktır.

**Tablo 1. 1.** Lignoselülozik biyokütlenin APK malzeme üretim süreçlerine katılmasının sunacağı avantajlar

<b>Yenilenebilir olması</b>	Sonlu olan ve sonunda tükenecek olan fosil kaynakların aksine, biyokütle sürekli olarak büyütülebilir ve hasat edilebilir.
<b>Biyobozunur olması</b>	Mikroorganizmalar tarafından biyolojik olarak parçalanabilmesi nedeniyle biyokütle çevre dostu bir malzemedir.
<b>Karbon nötr olması</b>	Biyokütle, büyüdükçe atmosferdeki karbondioksiti emer ve bu da kullanımı sırasında oluşan emisyonları dengelemeye yardımcı olur. Dolayısıyla, biyokütle üretimi ve kullanımı, geleneksel fosil yakıt bazlı malzeme üretimine kıyasla sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir.
<b>Çok yönlü ve çok çeşitli olması</b>	Farklı biyokütle çeşitleri malzeme üretimi için ham madde olarak veya doğrudan kullanımı ile çok yönlü bir malzeme kaynağıdır. Böylece geleneksel malzemelere sürdürülebilir alternatiflerin üretilmesine olanak tanır ve mevcut malzeme teknolojilerine uyum sağlar.
<b>Yerel kalkınmayı desteklemesi</b>	Biyokütle, yerel olarak yetiştirilebilir ve hasat edilebilir, bu da uzun mesafeli nakliye ihtiyacını ve buna bağlı emisyonları azaltır. Bu aynı zamanda yerel ekonomik kalkınma ve iş yaratma için fırsatlar yaratır.
<b>Eldesinde düşük enerji gerektirmesi</b>	Biyokütle esaslı malzemelerin fosil kaynaklı ürünlerin üretiminden daha az enerji gerektirir, bu da sera gazı emisyonlarını ve yenilenemeyen kaynakların kullanımını azaltır.
<b>Atık minimizasyonuna katkı sağlaması</b>	Düzenli depolama alanlarına gönderilecek olan gıda, tarımsal ve ormancılık atıklarının malzeme üretim kullanılabilecek değerli bir kaynak yaratılması bu atıkların çevresel etkisini azaltır.

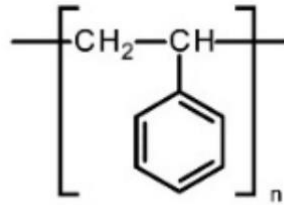
### 2.3.2.2 Plastik Ham Maddeler

Ahşap-plastik kompozitlerin, üretiminin polimer ham maddeleri açısından, termoplastikler, termosetler ve elastomerler gibi birçok polimer türü kullanılabilir. Ancak dikkate alınması gereken temel husus kullanılacak polimerin çalışma sıcaklığıdır. Ahşabın kompozit içinde işlenmesiyle getirilen sınırlamalar nedeniyle, ahşap-plastik kompozitlerin üretimi için yalnızca 200°C'nin altındaki sıcaklıklarda işlenebilen polimerler üretimde kullanılabilir (Kim ve Pal, 2011). Yaygın olarak HDPE, LDPE, PP, PA, PVC ve PS ahşap-plastik kompozit malzemelerin üretiminde kullanılabilir (E. Yılmaz, 2018; G. Yılmaz, 2020). Sıcaklık karşısında sergilediği davranış bakımından termoplastikler sıklıkla üretimde kullanılmasına rağmen termosetlerin kullanıldığı ahşap-plastik kompozit üretimlerine de rastlanmaktadır. Termoset polimerler ısıtıldığında erimeyen veya yumuşamayan yapıya sahiptirler ve bu yapıların çok yüksek sıcaklıklara ısıtılmasıyla polimer yapısı bozunmaktadır. Epoksi, polivinil ester, polyester, poliüretanlar, fenolik, formaldehit gibi ısı ile sertleşen

polimerler, ahşap kompozit uygulamalarında kullanılarak elde edilen malzemeye dayanıklılık, termal kararlılık, dolgu maddesinin ıslanabilirliği, elektrik ve ısı yalıtımı, sürünme direnci, kimyasal direnç, viskozite ve moleküler çapraz bağlanma açısından avantajlar, APK'lerin kullanımında ise sıkça tercih edilen polimer türleri alt başlıklar halinde verilmiştir.

#### 2.3.1.2.1. Polistiren (PS)

Polistiren, stiren monomerinin polimerizasyonu sonucu elde edilen bir termoplastiktir. Katı bir formda olan polistiren, yüksek sıcaklıklarda eriyik hale getirilebilir; bu genellikle enjeksiyon veya ekstrüzyon yöntemleriyle gerçekleştirilir. Bu malzeme, düşük maliyet, kolay işlenebilirlik, düşük daralma, saydamlık ve geniş renk seçenekleri, iyi kimyasal direnç gibi avantajlara sahiptir. Ancak, 70°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda mekanik özelliklerinin düşük olması, oda sıcaklığında kırılgan olması ve dış ortamda UV ışınlarına maruz kaldığında hızlı bozulma gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Süinanç, 2007).

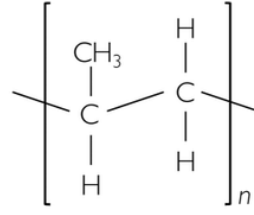


Şekil 2. 3. PS kimyasal yapısı

**Kaynak:** (M.J. Hurley vd., 2015)

#### 2.3.1.2.2. Polipropilen (PP)

Polipropilen, otomotiv sanayisinden tekstil ve yiyecek paketlemesine kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan bir termoplastik polimerdir. Propilen monomerinin polimerizasyonu ile elde edilen polipropilen, kimyasal solventlere (asit ve bazlara) karşı yüksek dirence sahiptir. Ticari olarak yaygın olarak bulunan PP, LDPE ile HDPE arasında bir kristal yapısı sergiler ve elastiklik modülü orta seviyededir. En kullanışlı polimerler arasında yer almaktadır; darbe dayanımı daha düşük olsa da üstün çalışma sıcaklığına ve iyi çekme dayanımına sahiptir. Ayrıca, sıcak sıvıların veya gazların aktarımı için ideal, sert ve ısıya dayanıklı bir malzemedir. Düşük ısıl genleşme katsayısı, hafifliği, yüksek kimyasal direnç, iyi hava koşullarına dayanıklılığı ve uygun darbe etkisi nedeniyle otomotiv iç mekanları, tek malzemeli gösterge panelleri, tamponlar, kaplamalar ve dış kaplamalar gibi önemli uygulamalara sahiptir (Kumar vd., 2011; Süinanç, 2007).

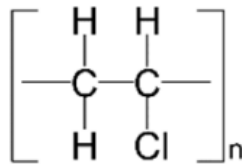


**Şekil 2. 4.** PP kimyasal yapısı

**Kaynak:** (Doan Tran vd., 2020)

### 2.3.1.2.3. Polivinilklorür (PVC)

PVC, monomer haldeki vinil kloridin polimerizasyonu ile üretilen bir plastiktir. Doğal olarak sert bir yapıya sahip olan PVC, plastikleştiriciler eklenerek daha yumuşak ve esnek hale getirilmektedir. Amorf ve polar bir termoplastik olan PVC'nin özellikleri, polimerizasyon derecesine, üretim yöntemine ve plastik içeriğine bağlı olarak değişebilmektedir. Sert PVC, katı ve dayanıklı bir malzeme olup, çekme yükü altında yüksek çekme dayanıklılığına ulaşabilmektedir. Plastik durumdayken, çekme basıncı plastik kırılana kadar ihmal edilebilir düzeydedir. Endüstriyel olarak emülsiyon veya süspansiyon polimerizasyon teknikleriyle üretilen PVC, hafifliği, iyi mekanik mukavemeti ve dayanıklılığı ile bina ve inşaat sektörlerinde önemli teknik avantajlar sunmaktadır. PVC'nin diğer plastiklere göre daha iyi performans gösterdiği özellikler arasında yanma direnci, alev yayılımı ve ısı yayılımı yer almaktadır. Ayrıca, PVC, hava koşullarına, kimyasal çürümeye, korozyona, şoka ve aşınmaya karşı direnç göstermektedir. Elektrik uygulamalarında kullanılan kabloların kaplanması için ideal bir malzeme olan PVC, iskele reklam panoları, iç tasarım ürünleri, pencere çerçeveleri, tatlı ve atık su sistemleri için tercih edilen bir malzemedir. Özellikle, yüksek sıcaklıklarda iyi korozyon direnci gerektiren kendi kendini destekleyen yapılar için klorlu PVC ideal bir seçenektir (Kumar vd., 2011; Süinanç, 2007).



**Şekil 2. 5.** PVC kimyasal yapısı

**Kaynak:** (Morgan J Hurley vd., 2015)

Üreteceğimiz kompozit yapının nihai kullanım amacına bağlı olarak polimer seçimi ve malzeme tasarımı önem arz etmektedir. Ayrıca, farklı polimerlerin sentezi ve ahşap-polimer kompozitlerdeki performansının incelenmesi, nihai ürün özellikleri dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Son yıllarda odaklanılan bir diğer önemli konu ise geri dönüştürülmüş polimerlerin kompozitlerdeki performanslarının detaylı bir şekilde araştırılmasıdır. Bu çalışmaların temel amacı, atık polimerlerin ürün döngüsüne geri katılarak döngüsel ekonomiye olumlu bir katkı sağlamak ve endüstriyel simbiyozu desteklemektir (Çelik ve Kılıç, 2020; Kazemi Najafi, 2013).

### **2.3.2.3 Ahşap Plastik Kompozit Malzemelerin Üretiminde Kullanılan Dolgu Maddeleri ve Katkılar**

APK malzemelerin üretim sürecinde, çeşitli dolgu maddeleri ve katkı maddeleri kullanılabilir. Bu maddeler, malzemenin özelliklerini iyileştirmek, işlenebilirliği artırmak veya malzemenin maliyetini düşürmek için eklenmektedir. Örnek dolgu maddeleri arasında kalsiyum karbonat, talk, cam elyafı bulunmaktadır. Katkı maddeleri arasında rengi iyileştiren pigmentler, antioksidanlar, UV stabilizatörleri yer alabilmektedir.

Ahşap lifleri ile polimer matrisi arasındaki uyumu artırmak ve homojen bir malzeme elde etmek için bağlayıcı ajanlar kullanılmaktadır. Bu ajanlar, genellikle polimer matrisine kimyasal olarak bağlanabilen maleik anhidrit gibi maddeleri içermektedir. Ahşap plastik kompozitler, bu bileşenlerin kombinasyonu ile birlikte çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır (Chen vd., 2013; Rowell, 2006).

## **2.4. Ahşap Plastik Kompozit Malzemelerin Sürdürülebilirliği**

Sürdürülebilirlik kavramı, genel olarak "bugünün ihtiyaçlarını, gelecek kuşakların da kendi ihtiyaçlarını karşılayabilme olanağından ödün vermeksizin karşılayabilmek" şeklinde tanımlanmaktadır (United Nations, 1987). Bu kavram, ekonomik, sosyal ve çevresel boyutları içerir. Ekonomik açıdan sürdürülebilirlik, istihdam oluşturma kapasitesi, kaynak verimliliği, düşük maliyet, ekonomik büyüme ve atıkların değerlendirilerek yenilenebilir kaynakların kullanımı gibi unsurları içermektedir. Çevresel boyutta sürdürülebilirlik, çevrenin korunması ve kaynakların ekosisteme zarar vermeden kullanılması anlamına gelmektedir. Bu bağlamda, çevre kirliliği, biyolojik çeşitliliğin yok edilmesi ve kaynakların aşırı tüketilmesi gibi sorunlar gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılayabilme yeteneklerini tehlikeye sokmaktadır. Sosyal boyutta sürdürülebilirlik ise dağıtım ve fırsat eşitliği, temel ihtiyaçların karşılanmasıyla

kaliteli bir yaşamın sağlanması, cinsiyet eşitliği, haklar ve özgürlüklerin temini gibi unsurları kapsamaktadır (A. Azapagic ve Perdan, 2000; Harris, 2003; Kumar vd., 2011).

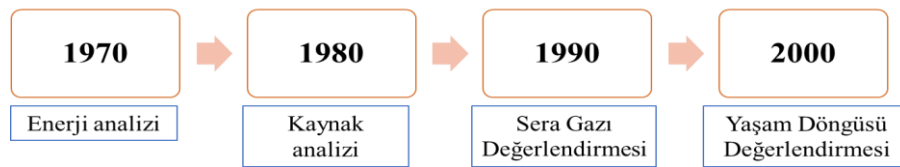
Sürdürülebilir malzeme, çevreye zarar vermeyen ve üretiminde yenilenebilir malzemelerin kullanımının sınırlı olduğu yeşil malzemeler olarak tanımlanabilmektedir (Khan vd., 2021; Tufan ve Özel, 2018). Bu bağlamda, ormanlardan elde edilen kaynaklar özellikle binalar için yenilenebilir inşaat malzemeleri, kâğıt hamuru, enerji, biyolojik ürünler ve daha fazlasını sağlamaktadır. Aynı zamanda, karbonu tutan ormanlar ve karbon depolayan odun ürünleri, iklim değişikliğini hafifletme konusunda en büyük potansiyele sahiptir (Khan vd., 2021). Sürdürülebilir malzemelerin istenilen hacimde üretilebilmesi, ekosistem ve insan sağlığını olumsuz etkilememesi, kullanım ömrü sonunda geri dönüşüme uygun olması gibi özellikler, malzeme seçiminde ekonomik, kaliteli ve ihtiyaçları karşılayan faktörlerle birleşerek tercihi etkilemektedir (Hossain ve Poon, 2018). Karbon depolamayı ve özellikle bina inşaatı olmak üzere orman bazlı inşaat malzemelerinin kullanımından kaynaklanan karbonun birleştirilmesi, iklim değişikliğini hafifletmek için en etkili seçeneklerden biridir (Bolin ve Smith, 2011; Hossain ve Poon, 2018). Orman kaynaklarının bolluğuna rağmen, sürdürülebilir orman yönetimini uygulamaya devam etmeden gerekli inşaat malzemeleri, kâğıt hamuru ve kâğıt, enerji ve yakıt üretmek için orman kaynaklarına yönelik küresel talebi karşılamak zor olabilmektedir (Xu vd., 2008). Toplum artık ormanları, ekonomik refah için artan taleplerini karşılarken aynı zamanda iklim değişikliğini hafifletmek için inşaat malzemeleri, lifler, biyoyakıt ve diğer yenilenebilir malzemeler için yenilenebilir ve sürdürülebilir doğal kaynaklar kaynağı olarak görmektedir (Liikanen vd., 2019; Operato vd., 2023; Sahoo vd., 2019). Doğal kaynaklardan üretilen ahşap malzeme ise, sağlığa zararlı madde içermeyen, yenilenebilir ve fazla atık oluşturmadan üretilebilen doğal bir malzemedir. Bu malzemenin üretiminde kullanılan fosil enerji miktarı düşüktür ve malzeme bünyesinde CO<sub>2</sub> depolamaktadır. Ayrıca bu malzeme enerji ve ham madde kullanımı yoğun olmayan işlemlerden geçirilerek kullanılabilir. Ham maddesi ahşap olan malzemeler, ömürleri bitince yeniden kullanılabilir, biyolojik yolla yok edilebilir ve enerji veya ham madde olarak değerlendirilebilmektedir (Goldhahn vd., 2021). Bu yaygın malzeme dünya çapında mevcut olup, özellikle yapı sektöründeki birçok alanda kullanılmaktadır (Khatib, 2016). Diğer taraftan, ham petrol işlenmesiyle elde edilen plastik, günümüzde artan nüfusun ihtiyaçlarını karşılama konusunda en yaygın kullanılan malzeme türüdür. Plastiğin ucuz ve kolay elde edilmesi, dayanıklı, hafif, güvenli ve işlenmesi kolay olması, geniş bir uygulama alanında kullanılmasını sağlamıştır (Andrady ve Neal, 2009). Ancak, özellikle tek kullanımlık plastik ürünlerin yaygın

kullanımı, kullanım ömrünü tamamladıktan sonra çevre üzerinde uzun süreli olumsuz etkiler bırakmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, plastik malzemenin yeniden kullanılması veya geri dönüştürülmesi, sürdürülebilir üretim için büyük önem taşımaktadır. Ahşap-plastik kompozit malzemelerin üretimi plastik malzemelerin tekrar kullanılmasını sağlayarak çevresel etkilerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Bergman vd., 2013; Vidal vd., 2009). Odun kullanımı sadece APK'lerdeki yenilenemeyen malzeme miktarını dengelemekle kalmaz, aynı zamanda uzun ömürlü ürünlerde ahşabın kullanılması da atmosferik karbonu tutar ve malzeme çıkarma ve işlemenin enerji kullanımına bağlı iklim değişikliği potansiyelini azaltmaktadır (Hill vd., 2015; Schwarzkopf ve Burnard, 2016).

## 2.5 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Yaşam döngüsü değerlendirme (YDD), ilk olarak 1960'ların sonu/1970'lerin başında, petrol krizi sırasında geliştirilmiştir. Bu dönemde, insanlar benzin için kuyrukta beklerken ve enerji maliyetleri hızla artarken, müşteriler enerji tasarruflu ürünler talep edilmekte, şirketler ise enerji faturalarından tasarruf etmenin yollarını aramışlardır. Aynı zamanda, şirketler ürünlerini geliştirmek için dahili olarak yaşam döngüsü boyutunda çevresel etkileri değerlendirmeye başlamış, bu da ilk yaşam döngüsü envanterlerinin yapılmasına ivme kazandırmıştır.

ISO (International Organization for Standardization), küresel bir YDD standardını kullanıma sunmadan önce, bir YDD standardı geliştirmekle görevli bir teknik komiteyi içeren bir Çevre Yönetimi standartları serisi oluşturmuştur. Bu çabanın doruk noktası, günümüzde YDD'nin yürütülmesi için standart olarak varlığını sürdüren gönüllü bir uluslararası standarttır (J. B. Guinée vd., 2002).

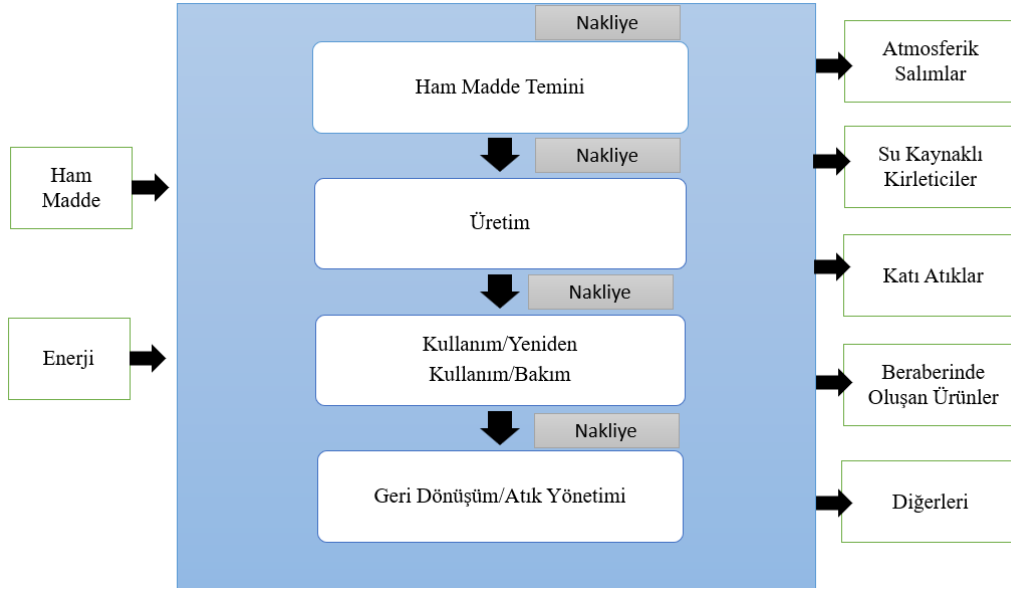


Şekil 2. 6. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi yönteminin gelişim süreci

### 2.5.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Tanımı ve Kullanım Alanları

YDD, mal ve hizmetlerin çevresel etkilerini sistemli bir şekilde değerlendirmek için kullanılan bir araçtır. Bu yöntemde Şekil 2.7'de gösterildiği gibi ham maddelerin çıkarılmasını ve işlenmesinden başlayarak bir ürün, süreç veya sistemlerin üretim, nakliye ve dağıtım;

kullanım, yeniden kullanım, bakım, geri dönüşüm ve nihai bertaraf gibi tüm yaşam döngüsü basamaklarını kapsamaktadır. Bu yöntem genellikle diğer çevresel etki değerlendirme yöntemlerinde dikkate alınmayan etkiler de dahil olmak üzere, ürün yaşam döngüsündeki tüm aşamalardan kaynaklanan çevresel etkilerin detaylı ve sistematik bir şekilde analizini sağlamaktadır (Atılğan Türkmen, 2020; Adisa Azapagic vd., 2010a).



**Şekil 2. 7.** Yaşam Döngüsü Aşamaları

**Kaynak:** (EPA, 2006)

YDD’de yaşam döngüsünün her aşamasındaki giren ve çıkan akımlara dair verilerin toplanması esastır. Böylece sistem içindeki süreçleri birbirine bağlayarak akışların nasıl etkilendiğini ve birbirleriyle nasıl bağlantılı olduğunu gösteren bir model oluşturulmaktadır. Bu model ile doğal kaynaklara yönelik girişlerin ve çevresel sistemlere yapılan emisyonların envanterini oluşturarak sonrasında bu envanter küresel ısınma, insan toksisitesi ve asitletme gibi çeşitli çevresel etki kategorilerinde analiz edilmektedir (Nordelöf vd., 2014). Elde edilen çevresel etkiler ise ürün, sistem ya da hizmetin çevresel performansının optimizasyonu, yeni ürün ya da süreç tasarımı, alternatifleri karşılaştırmak, eko-etiket ya da ürünlerin çevresel ürün beyanının yapılması için kullanılmaktadır (Demirer, 2011).

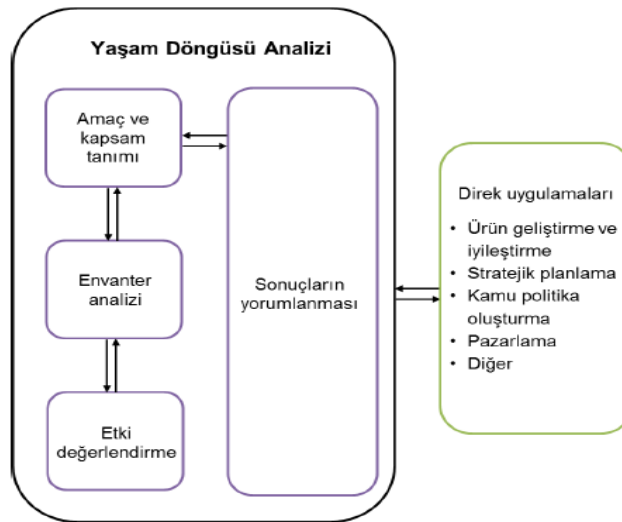
Son yıllarda özellikle iklim değişikliğinden kaynaklanan endişelerin artması ve daha sürdürülebilir ürün ve üretim süreçlerine olan ilginin yükselmesi, yaşam döngüsü analizini giderek daha önemli hale getirmiştir. YDD, çevresel etki değerlendirme yöntemi olarak geniş bir uygulama alanına sahiptir ve her türlü ürün, sistem ve hizmet için kullanılmaktadır. Bu analiz yöntemi, stratejik planlama, kamu politikalarının oluşturulması, performans

göstergelerinin geliştirilmesi, üretimde öncelikli ürün ve süreçlerin belirlenmesi, iyileştirme olanaklarının ve alternatiflerin tespit edilmesi, ürün geliştirme veya yeniden tasarım ile stratejik karar verme aşamalarında etkin bir araç olarak kullanılmaktadır (Adisa Azapagic vd., 2010a; Baumann ve Tillman, 2004).

## 2.5.2. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Metodolojisi

Yaşam döngüsü değerlendirme, ürünlerin, hizmetlerin ve süreçlerin yaşam döngüsündeki çevresel etkileri ölçmek ve analiz etmek için metodolojik bir çerçevedir. YDD metodolojisi, ISO tarafından oluşturulan Çevre Yönetim Sistemleri ile tanınan 14000 serisi standartları arasında ISO 14040 ve ISO 14044 (ISO, 2006a, 2006b) standartlarına göre tanımlanmıştır. Bu standart serisi, yaşam döngüsü analizi çalışmalarının gerçekleştirilmesine ve bildirilmesine yönelik genel çerçeveyi, prensipleri ve gereklilikleri belirtmektedir.

Şekil 2.8’de gösterildiği gibi YDD temel olarak dört basamaktan oluşmaktadır; amaç ve kapsam tanımlama, envanter analizi, etki değerlendirme ve yorumlama. Bu basamaklara ait bilgiler aşağıda detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 2. 8. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Metodolojisi

**Kaynak:** (ISO, 2006a, 2006b)

### 2.5.2.1. Amaç ve kapsam tanımlama

ISO 14040 standardına göre, YDD çalışmasının ilk aşaması, amaç ve kapsamın tanımlanmasıdır. Amaç belirleme aşamasında, uygulanan YDD'nin nihai kullanım amacı, genel hedefi ve hedef kitlesi gibi konular açıklanmaktadır. Kapsam tanımlama aşamasında ise, incelenen ürün veya süreç sistemi detaylı bir şekilde sunulması gerekmektedir. Tüm

varsayımlar ayrıntılı bir şekilde ortaya koyulup, ürün sistemi için kullanılan metodoloji tanımlanmaktadır. Ürünün fonksiyonu, fonksiyonel birim, sistem açıklaması ve sınırları gibi konular, veri gereksinimleri, veri varsayımları, sınırlamalar ve veri kalitesi gereksinimleri gibi faktörler açısından detaylar belirtilmektedir (Biçergil, 2020).

*Sistemin İşlevi:* Bir ürünü tanımlamak için, öncelikle ürünün işlevi belirlenmektedir. Bu bağlamda, ürüne yönelik talepler ve gereksinimler açık ve net bir şekilde tanımlanmalıdır. Farklı ürünlerin karşılaştırılması durumunda, her bir ürünün farklı işlevleri ayrıntılı bir biçimde belgelenmelidir. Bu yaklaşım, ürünler arasındaki benzerlikleri ve farklılıkları anlamak için önemli bir temel sağlamaktadır (Demirer, 2011).

*Fonksiyonel Birim (fb):* Fonksiyonel ya da diğer adıyla işlevsel birim, bir ürünün işlevinin nicelik olarak belirtilmiş tanımıdır. Fonksiyonel birim, çalışmanın amacına göre seçilir ve her bir çalışma için özeldir. İki ürünün yaşam döngüsü çevresel etkilerini karşılaştırmak için, seçilen çalışmaların fonksiyonel birimleri eşdeğer olmalıdır. Bu, karşılaştırma sürecinde tutarlılık sağlamak ve objektif sonuçlar elde etmek açısından önemlidir (Demirer, 2011).

*Paylaştırma ve Sistem Genişletme:* Paylaştırma, bir işlemin girdi ve çıktılarının ilgili ürünlere ve yan ürünlere bölünmesi ve ilişkilendirilmesi anlamına gelmektedir. Bu işlem, kütleye göre veya diğer yöntemlere göre gerçekleştirilebilmektedir. Bu süreç, bir işlemin etkilerini anlamak, kaynak kullanımını değerlendirmek ve çevresel etkileri analiz etmek için önemlidir. Kütleye göre paylaştırma, özellikle malzeme akışlarını değerlendirirken yaygın bir yöntemdir, ancak diğer yöntemler de kullanılabilir, bu da işlemlerin farklı açılardan analiz edilebilmesini sağlamaktadır (Demirer, 2011).

*Sistem Sınırları:* Sistem sınırı, hangi işlemlerin sisteme dahil edileceğini veya dahil edilmeyeceğini tanımlamaktadır. Kullanılan sistem sınırlarını tanımlamak için dört ana seçenek bulunmaktadır (Biçergil, 2020):

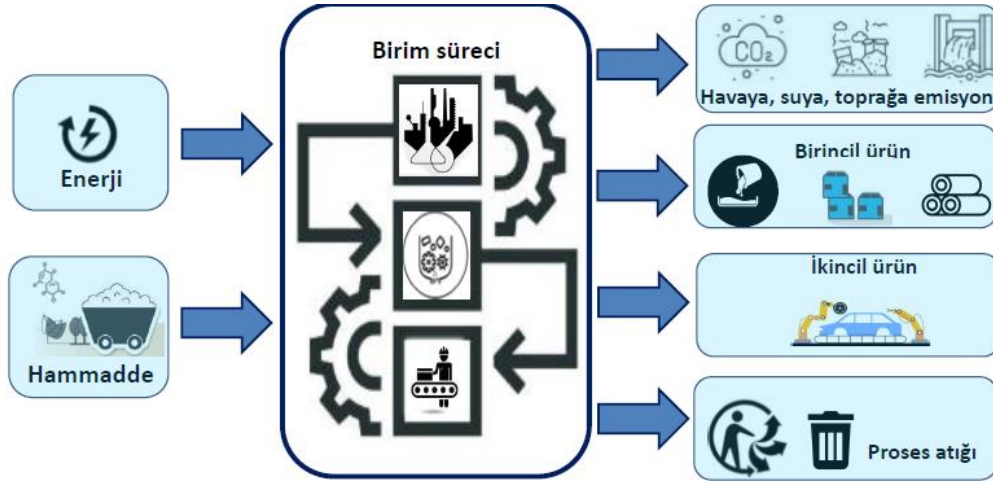
- Beşikten mezara: Bir ürün ya da sürecin tüm yaşam döngüsünü kapsayan analiz çalışmaları için kullanılmaktadır. Analiz, ham madde eldesinden (beşik) ortaya çıkan atıkların tasfiyesine (mezar) kadar geçen tüm süreçleri içermektedir.
- Beşikten kapıya: Bir ürün ya da süreci, ham madde eldesinden (beşik) itibaren kullanıma iletiildiği aşamaya (kapı) kadar olan süreçleri içermektedir. Yani, analiz yaşam döngüsünü kısmen kapsamaktadır.

- Beşikten beşiğe: Beşikten mezara yaklaşımının en son yaşam döngüsü olan atık tasfiyesi aşamasında atıkların geri kazanımı söz konusu ise bu yaklaşım olarak anılmaktadır.
- Kapıdan kapıya: Bir ürün ya da sürecin tek bir aşamasına ait yaşam döngüsünün ele alındığı bir yaklaşımdır.

#### **2.5.2.2. Envanter Analizi**

YDD'nin ikinci aşaması envanter analizidir. Bu basamakta sisteme giren ve sistemden çıkan ham madde, su ile enerji akışlarını içeren veriler ve yapılan hesaplamalar detaylandırılmaktadır. Bu veriler çalışmanın temeli olacağından bu basamak büyük öneme sahiptir (Baumann ve Tillman, 2004). Sistem, ham maddelerin çıkarılması, taşınması, üretilmesi, tüketilmesi ve atıkların bertaraf edilmesi gibi farklı alt basamaklardan oluşmaktadır. Bu alt basamakların her biri farklı türde girişler gerektirir ve çeşitli türde çıkışlar üretmektedir. Bir YDD bağlamında, temel olarak, tüm girişlerin "beşikten" (çıkarılan ham maddelere) başlayarak "mezara" (çevreye emisyonlar olarak) kadar izlemek mümkün olması gerekmektedir. Envanter analizinin sonucu, "fonksiyonel birim" ile ilgili tüm giriş ve çıkışların bir özetini sunmaktadır (Stripple, 2001).

Şekil 2.9'da gösterildiği gibi, envanter analizinde çevreden gelen su, enerji ve ham madde gibi tüm girdilerin sınırdan sisteme akışının ve ürün, yan ürün, enerji, ham madde, emisyon ve atık gibi sistemden tüm çıktılarının sınırdan çevreye akışları dikkate alınmaktadır. Yaşam döngüsü envanteri aşamasında hedef ve kapsam tanımlama aşamasında tanımlanan sistem sınırlarına göre akış şemasının oluşturulması, fonksiyonel birime bağlı olarak tüm birim süreçleri için veri toplama ve sistemin çevresel yükünün hesaplanması gerçekleştirilmektedir (Baumann ve Tillman, 2004).



**Şekil 2. 9.** Bir birim sürecin girdi ve çıktılarını gösteren yaşam döngüsü envanterinin şematik gösterimi

**Kaynak:** (Rajendran, 2020)

### 2.5.2.3. Etki Değerlendirmesi

Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (YDED) basamağında envanter analizine dayalı olarak elde edilen enerji, su, ham madde kullanımı verilerinin potansiyel çevre etkilerinin değerlendirilmektedir. Etki değerlendirmesi, ürün, hizmet ya da süreç ile ilgili küresel ısınma, ham madde ve enerji kullanımı, asidifikasyon, toksisite, kimyasal duman oluşumu, ozon tabakası incelmeleri ve ötrofikasyon gibi çevresel etki seçilmesi ve tanımlanmasıyla başlayan çok adımlı bir süreçtir (Baumann ve Tillman, 2004) Etki değerlendirmesinin aşamaları her çalışma için farklılık göstermekte olup sınıflandırma, karakterizasyon, normalleştirme ve ağırlıklandırma gibi basamaklardan oluşmaktadır (Baumann ve Tillman, 2004; Jeroen B Guinée, 2002).

*Etki kategorilerinin seçilmesi ve tanımlanması:* Çevresel etki kategorilerinin belirlenmesi ve tanımlanması, YDED çalışmasının başlangıç aşamasını oluşturmaktadır. Bu aşamada, küresel ısınma, asidifikasyon, karasal zehirlilik gibi çevresel etki kategorileri belirlenip açıklanmaktadır. Bu kategoriler, çalışmanın odaklandığı çevresel etkileri yansıtan ve önemli çevresel sorunlara işaret eden kriterlerdir. Bu sayede, çalışmanın kapsamı ve amacı net bir şekilde belirlenir ve analiz edilecek etkiler belirli bir çerçevede incelenir, böylece benzersiz bir perspektif sağlamaktadır.

*Sınıflandırma:* Bu noktada, çevresel etki kategorileri belirlenmiş olan envanter öğeleri, ilgili etki kategorilerine göre atanmaktadır. Örneğin, SO<sub>2</sub> emisyonları asidifikasyon kategorisine eklenmektedir. Bu süreç, analiz edilen sistemin çevresel etkileri ile ilişkilendirilen

envanter verilerinin düzenlenmesini ve gruplandırılmasını sağlamaktadır. Bu şekilde, çevresel etkiler belirli kategoriler altında toplanır ve değerlendirilir, bu da analizin daha sistemli ve anlamlı olmasına olanak tanımaktadır.

*Karakterizasyon:* Karakterizasyon aşamasında, aynı çevresel etki kategorisine katkıda bulunan envanter öğeleri, ilgili katsayılar kullanılarak ortak birim üzerinden ifade edilmektedir. Bu yöntem, çevresel etkileri karşılaştırmak ve farklı etki kategorilerini aynı birim üzerinden değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Örneğin, küresel ısınmaya neden olan CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O emisyonları, CO<sub>2</sub> eşdeğeri üzerinden ifade edilerek küresel ısınma potansiyeli hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım, farklı etki kategorilerinin toplam etkisini bütünlük içinde değerlendirmeyi sağlamaktadır.

*Normalizasyon:* Normalizasyon aşamasında, farklı çevresel etki potansiyelleri, kabul görmüş normalizasyon yöntemleri kullanılarak ortak referans sistemine göre birimsiz hale getirilmektedir. Bu şekilde, farklı etki kategorileri birbirleriyle kıyaslanabilir hale gelir ve aynı birim üzerinden değerlendirilmektedir. Normalizasyon, çevresel etkileri kümelenmiş bir şekilde değerlendirmeyi kolaylaştırır ve etki kategorilerinin önem sırasını belirlemeye yardımcı olmaktadır.

*Gruplandırma:* Göstergeler, çevresel etki değerlendirmesi çalışmalarında farklı kriterlere göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar, göstergelerin kapsamı ve kullanım amacına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Aşağıda, göstergelerin konumlarına göre (yerel, bölgesel ve küresel) sınıflandırılması verilmiştir:

- *Yerel Göstergeler:* Yerel göstergeler, belirli bir coğrafi bölge veya mekânda çevresel etkileri değerlendirmek için kullanılmaktadır. Örneğin, bir şehirdeki hava kalitesini belirlemek için yerel hava kirliliği göstergeleri kullanılabilir. Yerel göstergeler, belirli bir topluluk, şirket veya bölge için özelleştirilmiş verileri içerir ve çevresel performansın yerel düzeyde izlenmesine olanak tanımaktadır.
- *Bölgesel Göstergeler:* Bölgesel göstergeler, daha geniş bir coğrafi alanı kapsayan ve belirli bir bölgedeki çevresel etkileri değerlendirmek amacıyla kullanılan göstergelerdir. Örneğin, bir ülkenin su kaynaklarının sürdürülebilirliğini değerlendirmek için bölgesel su tüketim göstergeleri kullanılabilir. Bölgesel göstergeler, geniş bir coğrafi alana ait verileri

içermekte ve bölgeler arasındaki çevresel performansı karşılaştırmak için kullanılmaktadır.

- *Küresel Göstergeler:* Küresel göstergeler, dünya genelindeki çevresel etkileri değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Örneğin, küresel sera gazı emisyonları veya biyoçeşitlilik kaybı için göstergeler kullanılabilir. Küresel göstergeler, dünya genelindeki çevresel performansı izlemek ve küresel çevre sorunlarına çözüm aramak için önemlidir. Bu sınıflandırma, çevresel etki değerlendirmesi süreçlerinde göstergelerin doğru bir şekilde seçilmesi ve etkili sonuçların elde edilmesi açısından kritiktir.

*Ağırlıklandırma:* Ağırlıklandırma aşaması, çevresel etkiler arasında öncelik ve önem düzeylerini belirlemek için kullanılan kritik bir adımdır. Bu aşamada, çevresel etki kategorileri, azaltım hedeflerine dayanan ve kabul görmüş ağırlıklandırma yöntemleri ile belirli katsayılarla çarpılarak birimsiz hale getirilmektedir. Bu sayede farklı etkilerin önem sırası belirlenir ve daha sonra bu ağırlıklar kullanılarak çevresel etkilerin toplam etkisini değerlendirmek için ağırlıklandırılmış toplam etki hesaplanmaktadır. Ağırlıklandırma, çevresel etkilerin yönetim ve politika kararları açısından önceliklendirilmesine yardımcı olur ve farklı çevresel etki kategorileri arasında adil ve bilimsel temelli bir değerlendirme yapılmasını sağlamaktadır. Örneğin, küresel ısınmanın ve su kıtlığının diğer etkilerden daha büyük bir öneme sahip olduğu bir çalışmada, bu etkiler daha yüksek ağırlıklarla çarpılarak diğer etkilere göre daha fazla vurgu yapılabilmektedir. Bu aşamada kullanılan ağırlıklandırma yöntemleri, çalışmanın amacına, veri kalitesine ve politika hedeflerine bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle, ağırlıklandırma aşamasında kabul görmüş ve genellikle bilimsel olarak doğrulanmış yöntemlerin kullanılması önemlidir. Bu, çevresel etkilerin analizini daha güvenilir ve karar verme süreçlerini daha bilinçli hale getirmektedir (Bruijn vd., 2002).

YDED sonuçlarını değerlendirme ve raporlandırma: YDD çalışmalarında başlıca hesaplanan çevresel etki kategorileri Tablo 2.1’de verilen asidifikasyon, ötrofikasyon, küresel ısınma, fotokimyasal duman oluşumu, ozon tabakasının incelmeye, ekotoksikite, kanserojenik etki ve kaynak tüketimidir (Mammadov ve Cılız, 2017).

**Tablo 2. 1.** Yaşam döngüsü analizi çalışmalarında sıklıkla kullanılan etki kategorileri

<b>Etki Kategorisi</b>	<b>Ölçek</b>	<b>YDE Veri Örnekleri (Sınıflandırma)</b>	<b>Karakterizasyon Faktörü</b>	<b>Karakterizasyon Faktörünün Açıklaması</b>
Küresel Isınma	Küresel	Karbondioksit Nitrojendioksit Metan Kloroflorokarbonlar Hidrokloroflorokarbonlar Metilbromür	Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	YDE verisini karbondioksit eşdeğerine dönüştürür.
Stratosferik Ozon Tüketimi	Küresel	Kloroflorokarbonlar Hidrokloroflorokarbonlar Halonlar Metilbromür	Ozon Tüketimi Potansiyeli (OTP)	YDE verisini hidrojen iyonu eşdeğerine dönüştürür.
Asidifikasyon	Bölgesel Yerel	Sülfüoksitler Nitröz oksitler Hidroklorik asit Hidroflorik asit	Asidifikasyon Potansiyeli (AP)	YDE verisini hidrojen iyonu eşdeğerine dönüştürür.
Ötrifikasyon	Yerel	Fosfat Nitröz oksitler Azotdioksit Nitratlar	Ötrifikasyon Potansiyel (ÖP)	YDE verisini fosfat eşdeğerine dönüştürür.
Fotokimyasal Sis	Yerel	Metan olmayan hidrokarbon	Fotokimyasal oksidan oluşturma potansiyeli (FOOP)	YDE verisini metan eşdeğerine çevirir.
Kaynak Tüketimi	Küresel Bölgesel Yerel	Kullanılan mineral miktarı Kullanılan fosil yakıt miktarı	Kaynak tüketimi potansiyeli (KTP)	YDE verisini kullanılan kaynağın miktarına karşın rezervde kalan kaynağın miktarına dönüştürür.
Arazi Kullanımı	Küresel Bölgesel Yerel	Diğer arazi değişiklikleri veya düzenli bir depolama sahasının kullanılma miktarı	Arazi durumu (AD)	Tahmini bir özkütle kullanılarak katı atığın kütlelerini hacme dönüştürür.
Su Kullanımı	Bölgesel Yerel	Su kullanımı veya tüketimi	Su kıtlığı potansiyeli (SKP)	YDE verisini kullanılan kaynağın miktarına karşın rezervde kalan kaynağın miktarına dönüştürür.

**Kaynak:** (Mammadov ve Cılız, 2017)

#### **2.5.2.4. Sonuçların yorumlanması**

YDD'nin son aşaması sonuçların yorumlanmasıdır ve bu basamağın amacı sonuçları analiz etmek, veriler için hassaslık değerlendirmesi yapmak, en fazla etkinin geldiği basamakların bulunması ve sonuçların raporlanmasıdır. Bu aşamada aynı zamanda bir YDD veya bir yaşam döngüsü envanteri çalışmasının sonuçlarının çalışmanın amaç ve kapsam tanımına uygun olarak, kolayca anlaşılabilir, eksiksiz ve tutarlı bir sunumu sağlanmaktadır (Baumann ve Tillman, 2004; Rebitzer vd., 2004).

#### **2.6. Ahşap Plastik Kompozitlerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinden Güncel Literatür Örnekleri**

YDD, tüm dünyada kullanılan, sürekli gelişmekte olan, asıl ürünleri hedef alan ve standardize edilmiş bilimsel bir analiz metodudur (Adisa Azapagic, 1999). YDD çok çeşitli ürün, hizmet ve sistemler için geniş uygulama alanına sahiptir ve kompozit malzemelerin yaşam döngüsü boyutunda çevresel etkilerinin analiz edildiği çalışmalar literatürde yer almaktadır. Bu alandaki güncel literatür çalışmaları aşağıda verilmiştir:

APK'nin yaşam döngüsü değerlendirmesi hakkında yapılan çalışmada Sommerhuber vd. (2017) APK malzeme üretimi için çevresel etkilerini YDD ile hesaplarken kullanım sonu atık yönetimi için farklı senaryolar oluşturarak bunların çevresel sürdürülebilirliğini değerlendirmişlerdir. Çalışmada APK malzeme üretiminde kullanılacak alternatif malzemeler için de çevresel etki değerlendirmesi yapılmıştır. Ayrıca farklı ham maddeler kullanılarak elde edilen ürünlerin yapısal özellikleri değerlendirilmiştir. Yürütülen çalışmada, fonksiyonel birim olarak teknik özellikleri sunulan 1 kg APK malzeme seçilmiş olup bu malzemenin laboratuvar ölçekli üretimi için veri toplanmıştır. APK malzeme yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) granülleri, ahşap ve birleştirme maddesi olarak maleik anhidrit polietilen (MAPE) kullanılarak üretilmiştir. Kullanılmamış ya da geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı değerlendirilerek çevresel etkiler karşılaştırılmıştır. Sistem sınırları olarak ham madde eldesi ve işlenmesi, kompozit malzeme üretimi ile birlikte kullanım ömrü sona ermiş kompozit malzemenin farklı şekilde değerlendirilmesi olarak belirlenmiştir. Çalışmada çevresel etki analizi için CML (Jeroen B Guinée, 2002) etki değerlendirme yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar geri dönüşümsüz ham madde kullanıldığında ne kadar çok ahşap kullanılırsa, potansiyel çevresel etkilerin o kadar düşük olduğunu göstermiştir. Geri dönüştürülmüş malzemenin ham madde olarak kullanılmasının hem mekanik özellikleri iyileştirdiği hem de çevresel etkileri azalttığı belirlenmiştir. Kullanım sonu yaşam döngüsü

basamağı için en uygun seçeneğin geri dönüşüm olduğu sonucuna ulaşılırken plastik geri dönüşümünün ahşap geri dönüşümünden daha önemli olduğu vurgulanmıştır.

Thamae ve Baillie (2008) çalışmalarında ahşap elyaf takviyeli polipropilen (PP) ve cam elyaf takviyeli PP araba kapı panellerinin yaşam döngüsü çevresel sürdürülebilirliklerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada ayrıca seçilen iki panelin de en fazla etkisi olan çevresel alanlar belirlenmiştir. Yürütülen çalışmada fonksiyonel birim 200.000 km servis ömrü için 992 cm<sup>3</sup> hacimli bir araba kapı paneli seçilmiştir. Seçilen servis ömrü, Avrupa Otomotiv Araştırmaları Konseyi tarafından 1500 kg'dan daha ağır olan benzinli ve dizel otomobiller için önerildiği için bu çalışmada kullanılmıştır. Her iki panelde de lif bileşeni ağırlıkça %40, PP bileşeni ağırlıkça %60 oranındadır. Çalışmanın sistem sınırları kapsamına montaj (ham madde çıkarma, ham madde işleme ve panel imalatı), kullanım ve kullanım ömrü sonu dahil edilmiştir. Simapro yazılımı ile BUWAL250 veri tabanı kullanılarak ilgili kompozitlerin süreçleri ve çevresel etkileri Ecoindicator95 yöntemi ile değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, otomobil kapı panelleri olarak kullanılan PP kompozitlerde cam elyafın odun lifi ile değiştirilmesinin çevresel etkileri azalttığını göstermiştir.

La Rosa vd. (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, biyo-esaslı epoksi reçineden yapılmış bir eko-sandviç ve doğal lifler ile epoksi/cam liflerinden yapılmış geleneksel bir sandviç arasında karşılaştırmalı bir YDD gerçekleştirilmiştir. Doğal malzemeler olarak mantar, kenevir ve biyo- esaslı epoksi reçine içeren bir eko-sandviç panelin üretimi ile ilgili ana çevresel etkileri değerlendirmek için sistem sınırları beşikten üretime olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda kompozit bileşiminde etkisi değerlendirilmiştir. Yaşam döngüsü çevresel etki değerlendirmesi Simapro 7.2 yazılımı ve Ecoinvent v2.2 veri tabanı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonel birim olarak (0,400 × 0,400 × 0,02 m) boyutlarında bir kompozit panel esas alınmıştır. Çevresel etkileri aç değerlendirilmiştir. Sonuç olarak çevresel etkilere en yüksek katkının reçine kullanımından geldiği belirlenmiştir. Petrol esaslı epoksi reçine yerine bitkisel epoksi reçine kullanılmasının, çevresel etkileri önemli ölçüde azalttığı (>%85) saptanmıştır.

Väntsi ve Kärki (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada APK'lerde cam elyafının geri dönüştürülmüş mineral yünle değiştirilmesinin çevresel etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada doğal elyaf kompozitlerde dolgu maddesi olarak geri dönüştürülmüş mineral yün ile cam elyafın kullanılmasının yanı sıra geri dönüştürülmüş polimer ile kullanılmamış polimer uygulaması ele alınmıştır. Çalışmada sistem sınırları olarak işlenmemiş ham maddelerin üretimi, geri dönüştürülmüş malzemelerin toplanması ve ayrıştırılması, malzemelerin gerekli

ön işlemleri, kompozitlerin üretimi, malzemelerin taşınması ve kompozitlerin kullanım ömrü sonu işlemlerini olarak seçilmiştir. Fonksiyonel birim olarak 100 kg ekstrüde doğal elyaf kompozit zemin kaplama levhası kullanılmıştır. Dört farklı doğal elyaf kompozit üretim senaryosu sunulmuştur. Her senaryoda, diğer senaryolardan farklı bir bileşime sahip bir doğal elyaf kompozit üretildiği varsayımı yapılmıştır. Kompozitler için enerji üretimi için yakma ve depolanarak bertaraf edilmesi şeklinde iki farklı kullanım ömrü sonu senaryosu da dikkate alınmıştır. Sonuçlar geri dönüştürülmüş mineral yün ve geri dönüştürülmüş polipropilenin ahşap polimer kompozitler için çevresel olarak uygulanabilir ham maddeler olabileceğini göstermiştir. Kullanım ömrü sonu seçeneği olarak yakma seçeneğinin KIP hariç tüm etki kategorilerinde daha iyi çevresel performansa sahip olduğu sonucu bulunmuştur.

Bolin ve Smith (2011) çalışmalarında zemin kaplama malzemesi olarak kullanılan alkali bakır kuaterner (ACQ) ile işlenmiş kerestenin yaşam döngüsü çevresel etkilerini belirleyerek bu malzemeye alternatif bir malzeme olan ahşap plastik kompozit malzeme ile karşılaştırma yapmışlardır. Yaşam döngüsü modellemesi için sistem sınırları beşikten mezara olarak belirlenmiş olup fonksiyonel birim olarak 1000 ft (30480 cm) güverte yüzeyi olarak kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlar güverte zemin kaplaması için ACQ ile işlenmiş kereste kullanımının APK malzemeye göre daha çevreci olduğunu göstermiştir. Örneğin, aynı boyuttaki ACQ ile işlenmiş kereste ile karşılaştırıldığında, APK malzeme kullanımının 14 kat daha fazla fosil yakıt ve 3 kat daha fazla su kullanımına, üç kat daha fazla sera gazı emisyonuna sebep olduğu bulunmuştur. Çalışmada ham maddelerin daha yakındaki tedarikçilerden sağlanması ve fosil yakıt yerine biyokütleyle bağlı enerji kullanımı önerilmiştir.

Qiang vd. (2014) çalışmalarında çam ağacı talaşı ve PLA (Polilaktik asit) takviyelerinin ahşap plastik kompozitlerin içindeki katkılarının incelenmesi ve üretim süreçlerinin iyileştirilmesi için yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılmışlardır. Çalışmada farklı oranlarda, A (ağırlıkça %20 AT+ ağırlıkça %80 PLA) ve B (%20 AT + ağırlıkça %55 PLA + ağırlıkça %25 PHA) numuneleri ile çevresel etki alanları karşılaştırılmıştır. Yürütülen çalışmada fonksiyonel birim 1 ton APK malzemesi olarak belirlenmiş olup, sistem sınırları ise beşikten kapıya olarak tercih edilmiştir. Farklı çevresel etki kategorilerinin ikili olarak göreceli önemini belirlemek için öznitelik hiyerarşi modeli kullanılmıştır. Çevresel etki kategorileri ise, AP, FOOP, KIP, ÖP'dir. Sonuçlar, katkısız APK malzemesi için su tüketiminin daha yüksek olduğunu ve FOOP'un tüm kompozitler için en önemli etki kategorisi olduğunu göstermiştir. Ayrıca üretim süreçlerinin iyileştirilmesi hususunda, ahşap kurutma işlemi optimizasyonu ve

atık su ıslahı çalışmaları ile APK'lerin üretim sürecinin çevresel etkilerinin azaltılabileceği de bildirilmiştir.

Hossain ve Poon (2018) yaptıkları çalışmada Hong Kong'da inşaat sektöründen gelen atık ahşap için farklı atık yönetim senaryoları üzerinden yaşam döngüsü çevresel etkilerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada atık ahşap için atık değerlendirme yöntemleri polimer ile atık ahşap ahşap panel üretimi, çimento ile atık ahşap panel üretimi, kömür yerine atık ahşap malzemenin biyoyakıt olarak kullanılması ve ahşap atıklarının düzenli depolanarak bertarafı olarak seçilmiştir. Çalışmanın fonksiyonel birimi 1 ton atık ahşaptır. Sistem sınırları her senaryo için beşikten mezara olarak belirlenmiştir. Modelleme SimaPro yazılımı ile yapılırken çevresel etkiler IMPACT 2002 ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar bina yapım faaliyetlerinden kaynaklanan atık ahşap için en iyi atık yönetiminin enerji eldesi için kullanılması olduğunu göstermiştir. Enerji eldesinde 1 ton kömür yerine aynı miktarda atık ahşap malzemenin kullanılmasının 1 tondan fazla CO<sub>2</sub> eşdeğeri sera gazını azalttığı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan uygulanacak en kötü yöntemin ise atık ahşap malzemenin depolanarak bertaraf edilmesi olduğu bulunmuştur. Atık ahşap kullanılarak panel üretiminin ise çevresel sürdürülebilirliğe faydası olduğu vurgulanmıştır.

Yapılan çalışmada Xu vd. (2008) doğal elyaf takviyeli kompozitlerin çevresel sürdürülebilirlikleri konusunda literatür taraması sunarken ahşap elyaf takviyeli polipropilen kompozit malzemenin çevresel etkileri için YDD yapılmıştır. Çalışmada kütlece %10, %30 ve %50 oranında üç elyaf içeriğine sahip kompozit malzeme ile ahşap elyaf ve PP için farklı malzeme servis yoğunluğunun çevresel sürdürülebilirliği karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, malzeme hizmet yoğunluğu işlevsel birim olarak kullanıldığında, ahşap elyaf takviyeli kompozitin PP' ye kıyasla daha çevre dostu olduğunu göstermiştir.

Pokhrel vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ahşap (%50 yumuşak odunumsu+ %50 sert odunumsu biyokütle) ve faz olarak belirtilmeyen polimerin APK malzeme üretiminde kullanılmasının çevresel etkilerini değerlendirmek üzere YDD çalışması gerçekleştirilmiş olup, sistem sınırları olarak beşikten kapıya olarak belirlenmiştir. YDD, SimaPro 9.2.0.2 yazılımı ve USLCI ve US-EI 2.2 (DATASmart paketi) veri tabanı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonel birim olarak, 1 ton ahşap ve 1 kamyon ahşap olarak belirlenmiştir. YDD çalışmasında çevresel etki kategorilerinde, AP, KIP, ÖP, OTİP kapsamında çalışma yapılmıştır. Sonuç olarak, APK malzeme üretimi için pelet şeklinde ahşap kullanımının ekonomik ve çevresel faydaları bulunduğu belirlenmiştir.

Liikanen vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, inşaat ve yıkım atıklarının APK malzemesinde kullanımının incelenmesi için YDD gerçekleştirilmiştir. Ladin talaşı-PP/Ladin talaşı faz olarak belirtilemeyen polimer karışımı içeren APK'lerin üretimi ile ilgili kullanılabilirliğini karşılaştırmak amacıyla yapılan YDD'de sistem sınırları beşikten kapıya olarak belirlenmiştir. Etkiyi değerlendirmek için ReCiPe 2016 v.1.1 kullanılmıştır. Fonksiyonel birim olarak 1 ton APK malzeme olarak belirlenmiştir. Çevresel etki kategorilerinde, KIP kapsamında çalışma gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, geleneksel atık bertarafı yöntemlerine göre inşaat atıklarının APK malzemesinde kullanımı avantajlı bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Operato vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kendiliğinden yetişebilen (çam iğnesi) veya yetişemeyen (kenevir) biyokütle çeşitlerinin APK malzemesinin içeriğinde kullanılması ile ilgili karşılaştırılması amacıyla YDD çalışması yapılmıştır. Çam iğnelerinden elde edilen farklı miktarlarda (%10-40 hacim) doğal (lignoselülozik) elyafla doldurulmuş PLA'dan yapılmış APK'lerin YDD çalışmasında, sistem sınırları beşikten kapıya olarak belirlenmiştir. YDD çalışması openLCA 1.10.3 yazılımı ve CML-IA ve Kümülatif Enerji Talebi etki değerlendirme yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonel birim 1 kg PLA olarak belirlenmiştir. Çevresel etki kategorilerinde AP, ATP, İTP, KEP, KIP, ÖP, OTİP, TSEP kapsamında çalışma gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, kenevir lifi ile üretilen kompozitler daha üstün özelliklere sahip olmasına rağmen, çam iğnesi liflerinin düşük toksisite göstergelerine sahip olduğu gözlemlenmiştir ve ayrıca PLA oranının azaltılması ile çevresel etkilerin azaldığı da saptanmıştır.

Haylock ve Rosentrater (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, organik ve inorganik (cam elyaf ve talk) dolgu malzemelerinin karşılaştırılması amacıyla YDD gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber; ham madde tedariki, işlenmesi, nakliyesi ve kullanım ömrü sonu ile ilişkili maliyetleri, emisyonları ve enerji yoğunluğunun belirlenmesi amacıyla da göz önünde bulundurulmuşlardır. Keten lifi-PLA, kenevir lifi-PLA, pirinç kabuğu-PLA, ahşap tozu- PLA, kurutulmuş damıtma-tane ve çözümleri (DDSA)- PLA oranlarının APK malzemesi içeriğinde kullanılması ile ilgili gerçekleştirilen YDD çalışmasında sistem sınırları beşikten mezara olarak belirlenmiştir. YDD çalışmasında 2 model kullanılmıştır. Bu modeller; (1) petrokimyasal ve biyo-bazlı plastikler arasındaki genel işleme maliyetlerinin, enerji yoğunluklarının ve sera gazı emisyonlarının MBase veri tabanı kullanılarak hesaplandığı ve karşılaştırıldığı plastik karşılaştırmacı modeli, (2) Ekonomik faaliyetten kaynaklanan malzeme, enerji ve emisyonları tahmin eden bir ekonomik girdi-çıkı yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi olan EIO- LCA' dır. Fonksiyonel birim olarak, 1 kg APK malzeme belirlenmiştir.

Çevresel etki kategorilerinde AP, KIP, ÖP, OTİP kapsamında çalışma gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, organik biyo- esaslı malzemelerin kullanımı ile daha düşük ekonomik/çevresel etki ve enerji yoğunluğu elde edileceği saptanmıştır.

Qiang vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, stiren- bütadien- stiren (SBS) ile modifikasyonun ve SBS miktarının etkisinin APK malzemesi üzerinde belirlenmesi ile ilgili YDD çalışması gerçekleştirilmiştir. Çam talaşı-PLA APK malzemesi içeriğinde kullanılan YDD çalışmasında sistem sınırı beşikten kapıya olarak belirlenmiştir. Fonksiyonel birim 1 ton APK malzeme olarak belirlenmiştir. Çevresel etki kategorilerinde, AP, ATP, FOOP, KIP, ÖP kapsamında çalışma gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, SBS ile modifiye edilen APK'ler, SBS içermeyenlere göre daha çevre dostu olduğu ve APK malzemesi içindeki biyokütle miktarı arttıkça çevresel etkilerin azaldığı belirlenmiştir.

Beigbeder vd. (2019) tarafından gerçekleşen çalışmada, ahşap tozu (AT) ile güçlendirilmiş polipropilen (PP/AT) ve keten lifi (KL) ile güçlendirilmiş polilaktik asit (PLA/KL) kullanım ömür sonu işlemlerinin çevresel etkilerini değerlendirmek için yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılmıştır. Ahşap tozlu PP (PP/AT) ve keten lifli PLA (PLA/KL). PP/WF kompoziti, PP ile WF arasındaki uyumluluğu geliştirmek için kullanılan, ağırlıkça %20 odun unu ve maleik anhidrit ile aşılınmış ağırlıkça %5 PP içerir. PLA/KL kompoziti, başlangıçtaki ortalama lif uzunluğu 6 mm olan, ağırlıkça %20 keten lifi içerir. Kullanım ömrü sonu (malzeme geri dönüşümü, yanma, endüstriyel kompostlama) değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen YDD çalışmasında sistem sınırları, atık arıtma tesislerinde başlamaktadır ve her senaryo için farklı süreçler dahil edilmiştir: depolama, yakma ve endüstriyel kompostlama ayırma tesisleri gerektirmezken; mekanik geri dönüşüm seçeneği için bir ayırma adımı modellenmiştir. Veriler, Ecoinvent ve Gabi yazılımı veri tabanından veya literatürden elde edilmiştir. Fonksiyonel birim olarak 1 ton atık APK malzeme olarak belirlenmiştir. Çevresel etki kategorilerinde, FOOP, İTP, KEP, KIP, OTİP, TSEP kapsamında çalışma gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, malzeme geri dönüşümü sürecinin en düşük çevresel etkileri sunduğu belirlenmiştir.

Khan vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, inşaat ve yıkım faaliyetlerinden kaynaklanan ahşap ve plastik atıklardan oluşan kompozit paletler üretmenin çevresel etkilerini analiz etmek amaçlanmıştır. Ayrıca, bu etkileri işlenmemiş malzemelerden yapılmış geleneksel ahşap ve plastik paletlerle karşılaştırmak için YDD çalışması gerçekleştirilmiştir. Ahşap tozu-HDPE kompozit paneller içeriğinde kullanılmasının karşılaştırılması için yapılan YDD çalışmasına sistem sınırı beşikten mezara olarak belirlenmiştir. Fonksiyonel birim malzemenin

1000 kullanım döngüsü seçilmiştir. Çevresel etki kategorilerinde, ATP fosil, AP, KIP, ÖP, OTİP kapsamında çalışma gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, APK malzemesi, KIP (biyojenik karbon hariç) hariç tüm kategorilerde en düşük çevresel etkiye sahip olduğu saptanmıştır.

Feifel vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, malzeme bileşimi ve geometrisi farklı olan iki farklı APK malzemenin, iki farklı ahşap zemin kaplaması (çam ve bilinga) ile karşılaştırılması amacıyla YDD çalışması gerçekleştirilmiştir. Ahşap-PE (%70) ve Ahşap-PVC (%50) APK bileşiminde kullanılması için gerçekleştirilen YDD'de sistem sınırları beşikten mezara olarak belirlenmiştir. Fonksiyonel birim 1 m<sup>2</sup> APK malzeme olarak belirlenmiştir. Çevresel etki kategorilerinde, AP, FOOP, KIP, OP kapsamında çalışma gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, ham ahşaptan (çam) yapılmış malzeme, çevreye en zararsız olmasına rağmen, APK malzemesinin kullanım ömrü ve geri dönüşüm bakımından avantaj sunduğu gözlemlenmiştir.

APK malzemelerin yaşam döngüsü boyutunda çevresel etkilerinin analiz edildiği literatür çalışmalarında, genellikle geri dönüştürülmüş ve doğal malzemelerin kombinasyonundan elde edilen alternatif kompozit malzemelerin çeşitli sektörlerde kullanılmasının çevresel etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ancak, çalışmaların farklı fonksiyonel birim ve çevresel etki kategorisi seçimleri yapması, bu alanda bir standardizasyon eksikliği olduğunu ortaya koymaktadır. Hassaslık analizi konusunda sınırlı sayıda çalışma yapılmış olması, bu alandaki değerlendirmenin önemini vurgulamaktadır. Elde edilen sonuçlar genel olarak, ahşap içeren kompozit malzemelerin çevresel etki kategorileri özelinde KIP değerini düşürdüğünü göstermektedir. Ancak, bu malzemelerin performansı, ekonomik ömrü, bakım-onarım gereksinimleri gibi faktörlerin de değerlendirilmesi, özellikle geleneksel malzemelerle karşılaştırmalar yapılması gerektiğini vurgulamaktadır.

### **3. MATERYAL VE YÖNTEM**

Çalışmada, otomobil parça bileşeni olan ahşap plastik kompozit malzemenin yaşam döngüsü çevresel sürdürülebilirliği değerlendirilmiştir. Çevresel etki değerlendirmesi için YDD yöntemi tercih edilmiş ve bu yöntemde, uluslararası standart olarak kabul edilen ISO 14040 ve ISO 14044 (ISO, 2006a, 2006b) standartları izlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada seçilen ürün, üretim süreci sonunda tesisten temin edilerek ve bu ürünlerin malzeme performansları incelenmiştir. Bu amaçla, farklı analitik yöntemler ile kompozitlerin karakterizasyon çalışmaları yapılarak yapı-özellik ilişkisi yorumlanması amaçlanmaktadır. Bu amaçla, taramalı elektron mikroskopu (SEM), elementel analiz ve termal analiz yöntemleri kullanılmıştır.

### **3.1. APK Malzeme Karakterizasyonu**

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Termogravimetrik Analiz (TGA) analizleri, APK materyalinin fiziksel ve termal özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesini sağlamıştır. SEM analizi, malzemenin yüzey morfolojisini yüksek çözünürlükte gözlemleyerek yapısal özellikleri belirlemekte kullanılırken, TGA ise malzemenin termal davranışını anlamak adına değerli bilgiler sunmuştur. Bu analizler, malzemenin performansı, dayanıklılığı ve kullanım potansiyeli hakkında kapsamlı bilgi sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

#### **3.1.1. Termogravimetrik Analiz ile Malzemenin Termal Stabilitesi ve Özelliklerinin Tespiti**

Termogravimetrik analiz cihazında, hassas bir analitik terazi, fırın, fırın sıcaklığı kontrol edici ile programlayıcı ve bir kaydedici bulunur. Kaydedici, örnek kütlelerinin sıcaklığa karşı grafiğini çizer. Hammaddelerin termogravimetrik analizleri Hitachi STA 7300 cihazında gerçekleştirilmiştir. Örnekler 10-15 mg arasında tartılmış ve alümina krozelere konulmuştur. Cihazın numune bölümüne yerleştirilen örnekler, 50 cm<sup>3</sup>/dk azot ve hava akış ortamında, 10°C/dk ısıtma hızı uygulanarak 25°C'den 1000°C'ye ısıtılmıştır. Ardından kütle kaybı (TG) eğrisi ile diferansiyel kütle kaybı (dTG) eğrileri yardımıyla hammaddelerin termal davranışları belirlenmiştir.

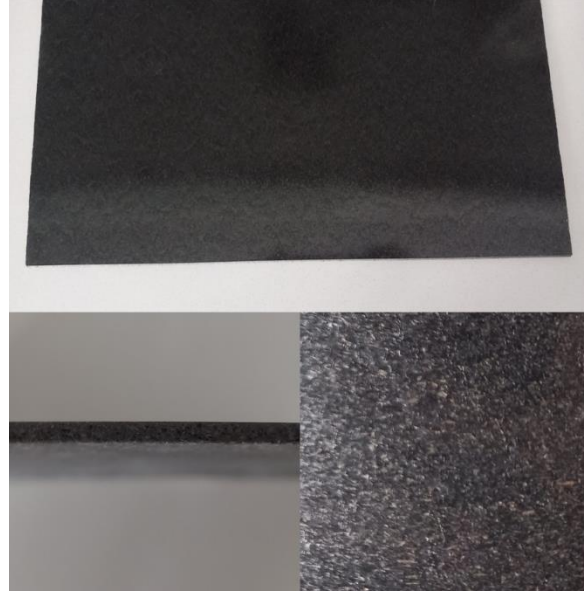
#### **3.1.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Malzemenin Morfolojik Analizi**

Ahşap-plastik malzemenin yüzey morfolojisinin incelenmesi amacıyla ikincil elektron görüntüleri ZEISS Supra 40 VP model cihaz ile alınmıştır. Görüntüler alınmadan önce, karbon bant tutucuların üzerine örnekler yerleştirilmiş ve vakum altında çalışan kaplama cihazında örnekler altın paladyum ile kaplanmıştır. Farklı büyütme oranlarında alınan mikograflar ile sadece polimer matris içinde biyokütlelerin dağılımı incelenmemiştir.

### **3.2. Amaç ve Kapsam**

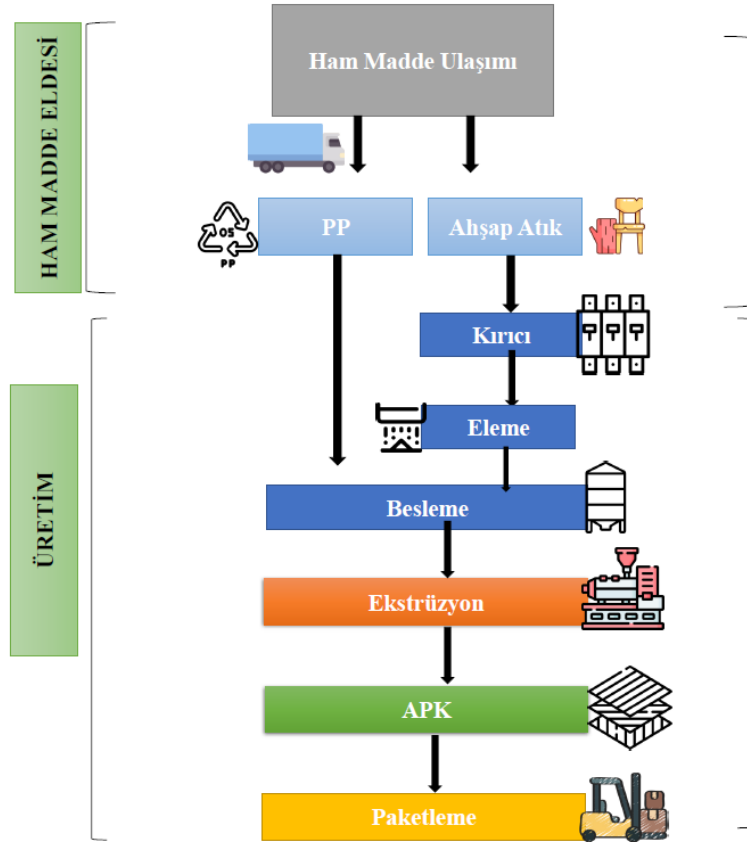
Çalışmanın amacı otomobil sektörü için üretilen APK malzemesinin çevresel etkilerinin yaşam döngüsü boyutunda incelenmesi ve seçilen ürün için potansiyel iyileştirme fırsatlarının belirlenmesidir. Çalışmada oluşturulan senaryolarla birlikte alternatif ham madde ve üretim sistemlerinin azaltım senaryoları değerlendirilmiştir.

Çalışmanın fonksiyonel birimi 1 m<sup>2</sup> APK malzeme üretimi olarak belirlenmiştir. Seçilen APK malzemenin 1 m<sup>2</sup> ağırlığı 3 kg'dir. Seçilen ürünün görseli Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 3. 1.** APK malzemesi

Çalışılan sistemin sınırları hammadde eldesi, işlenmesi ve taşınması, malzeme üretimi ve paketlenmesi olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sistem sınırları Şekil 3.2’de belirtilmiştir.



**Şekil 3. 2.** APK malzeme üretimi için belirlenen sistem sınırları

APK malzeme üretimi için belirlenen yaşam döngüsü basamakları temel olarak 3 basamakta toplanmış olup çalışmada bu basamaklara göre çevresel etki değerlendirilmesi yapılmıştır. Seçilen ürün için yaşam döngüsü basamakları:

- **Ham madde eldesi aşaması:** Ham maddelerin elde edilmesi ve ham maddelere uygulanan ön işlem süreçlerini içermektedir.
- **Nakliye aşaması:** Ham maddelerin ve ambalaj malzemelerinin tesise karayolu ile nakliye süreçlerini kapsamaktadır.
- **Üretim aşaması:** Kırma, eleme, besleme, karışım, ekstrüzyon ve paketleme basamaklarından gelen çevresel etkiler bu basamakta verilmiştir.

### 3.3. Envanter Analizi

Çalışmanın ikinci basamağı olan yaşam döngüsü envanter analizi bölümü veri toplama, varsayımlar ve hesaplama işlemlerinden oluşmaktadır. Ürün bazında yapılan çalışmanın verileri Eskişehir’de kompozit malzeme üretimi yapan bir firmadan alınmıştır. Bu firma, otomotiv, paketleme, gıda, yapı-inşaat, beyaz eşya, plastik konteynır-palet, medikal ve tarım sektörlerine yönelik geniş bir üretim portföyüne sahiptir. Bu çalışmada firmanın otomotiv sektörü için ürettiği APK malzeme için veri sağlanmıştır. Bu araştırmada, firma tarafından otomotiv sektörü için üretilen APK malzemeye ait 2021-2022 yılları için ham madde temini, üretim ve nakliye verileri alınarak çalışma gerçekleştirilmiş olup, arka plan verisi ise GaBi versiyon 10.7 (Sphera, 2023) yaşam döngüsü analizi programı ile Ecoinvent versiyon 3.9.1 (Ecoinvent, 2023) veri tabanlarından sağlanmıştır. Kullanılan veri tabanlarındaki seçimlerde tesisin verdiği verilere uygun olan veri setlerinin seçilmesine dikkat edilmiştir.

Seçilen ürün otomotiv sektöründe kullanılmak için üretilen APK malzemedir. Bu malzemenin üretiminde kullanılan başlıca ham maddeler: Ahşap atık ve PP olup, APK malzeme üretimi yapan fabrika Eskişehir il sınırları içerisinde yer almaktadır. Ahşap atık Kütahya’da sağlanırken, PP Belçika ve Fransa’da getirilmektedir. Modellemede kullanılan veri setleri belirtilen ülkelere uygun seçilmiştir. Paketleme basamağında LDPE ve palet kullanılmakta olup, bunlar ise Ankara’daki bir üreticiden sağlanmaktadır. Minimum 1 ton ürün taşıma kapasiteli ahşap paletler tercih edilmektedir. Tesisten alınan ham madde ve bunlara ait ulaşım verileri Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

**Tablo 3. 1.** Ham madde ve ulaşım verileri

Ham Madde	Miktar (kg/m <sup>2</sup> APK – adet/m <sup>2</sup> APK)	Şehir/Ülke	Kara Yolu (km)
Ahşap Atık	1,5	Kütahya/Türkiye	76
PP-1	0,75	Belçika	2971
PP-2	0,75	Fransa	3032
LDPE	0,00035	Ankara/Türkiye	236
Palet	0,00023	Ankara/Türkiye	236

Tesise getirilen ham maddeler ve ambalajlama malzemeleri tesisin deposuna alınır. Ahşap atık kırıcı ile istenilen boyutlara getirilir ve sonrasında eleme bölümünde talaşa dönüştürülmektedir. Ahşap atık ve PP malzemeleri prosesin ilk basamağını oluşturan besleme basamağına iletilmektedir. Bu basamakta homojen karışım sağlanması büyük önem taşımaktadır. Bir sonraki olan ekstrüzyon, polimer bazlı malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılmaktadır. Ekstrüzyon, genellikle granül veya toz halindeki malzemelerin ısıtılarak eritildiği, şekillendirildiği ve soğutulduğu bir süreçtir. APK prosesinde ekstrüzyonun sıcaklık değeri 170-210°C arasında olmaktadır. Prosesin bu bölümünde soğutma suyu girişi bulunmaktadır. Sıcaklık istenilen değerin üstüne çıktığında soğutma suyu ile sıcaklık olması gereken sıcaklığa getirilmektedir. Ekstrüzyon işleminde sürtünme etkisi ile ortaya çıkan kinetik enerji sıcaklıkta artış göstermesine neden olmaktadır. Sıcaklıkta artış gözlemlendiği takdirde şartlandırıcı tarafından suyun derecesi ayarlanarak soğutma işlemi gerçekleştirilmektedir. Sonraki basamakta ise malzemenin üstü film kaplama ile kaplanma işlemi gerçekleştirilmektedir. Film kaplama işlemi tamamlandıktan sonra ürün istenilen boyutlarda olması için kenarları kesilmektedir. Kesim yapıldıktan sonra en son basamak olarak paketleme işlemi gerçekleştirilmekte olup, LDPE streç film ve ahşap palet kullanılmaktadır. Üretim basamaklarında kullanılan enerji miktarları Tablo 3.2’de verilmiştir. Sistemde kullanılan enerji için Türkiye şebeke elektriği kullanılmıştır (Ecoinvent, 2023).

**Tablo 3. 2.** Enerji verileri

Enerji Türü	Üretim Basamağı	Kullanılan Enerji Miktarı (kWh/m <sup>2</sup> APK)
Elektrik	Kırma	0,154
	Eleme	0,025
	Besleme	0,073
	Ekstrüzyon	2,227
	Paketleme	0,050

### 3.4. Etki Analizi

Bu çalışmada APK malzeme için çevresel etki değerlendirilmesi yaşam döngüsü boyutunda gerçekleştirilmiş olup GaBi v.10.7 yazılımı (Sphera, 2023) kullanılarak etkiler hesaplanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan GaBi programı, Thinkstep firması tarafından Almanya'da geliştirilmiş olup, evrensel bir yaşam döngüsü analizi aracı olarak 25 yıldır kullanılmaktadır. GaBi, ürünlerin yaşam döngüsü boyutunda sürdürülebilirlik analizi için bilgi yönetimi modeli oluşturulması ve etkilerin hesaplanması amacıyla kullanılmaktadır. Program, sera gazlarının hesaplanması, yaşam döngüsü analizi, çevre tasarımı, enerji tasarrufu, çevresel raporlar, maliyet hesabı ve yeşil üretim gibi birçok alanda çözümler sunmaktadır. GaBi, yaşam döngüsü analizi için kullanılan ürünlerin süreçlerinde kullanılan girdi ve çıktıların çevresel etki potansiyellerini değerlendirmeye yardımcı olan geniş bir veri tabanına sahiptir.

#### 3.4.1. Çevresel Etki Kategorileri

Etki analizi basamağında APK malzemesi üretimi YDD çalışmasının çevresel etki sonuçları CML-IA metodu (Jeroen B Guinée, 2002) ile hesaplanmıştır. Çalışmada toplam 11 adet çevresel etki kategorisi için değerlendirilmiştir. Bunlar ise aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

*Küresel Isınma Potansiyeli (KIP):* Çeşitli sera gazlarının iklim değişikliğine katkılarını ölçen bir metriktir. CO<sub>2</sub>, küresel ısınmanın temel nedenidir, ancak CH<sub>4</sub>, su buharı, N<sub>2</sub>O, hidroflorokarbonlar (HFC'ler), perflorokarbonlar (PFC'ler) ve kükürt heksaflorür (SF<sub>6</sub>) gibi diğer sera gazları da önemli bir rol oynamaktadır (Baumann ve Tillman, 2004). Bu etki kategorisi için referans sera gazı CO<sub>2</sub> olarak belirlenmiştir ve CO<sub>2</sub>-eşdeğeri (CO<sub>2</sub>eşd.) olarak verilmektedir. KIP Denklem 3.1'deki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$KIP = \sum_j^J KIP_j \times B_j$$

(3.1)

KIP- küresel ısınma potansiyeli (kg CO<sub>2</sub>eşd.)

KIP<sub>j</sub>- gazın emisyon faktörü (kg CO<sub>2</sub>eşd./kg)

B<sub>j</sub>- gaz emisyonu, j (kg)

J- toplam sera gazı sayısı

**Tablo 3. 3.** Küresel ısınma potansiyeli için bazı gazların emisyon faktörü

Sembol	CO <sub>2</sub> eşd.
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	25
N <sub>2</sub> O	298
HFCl <sub>er</sub>	140 ~11.700
PFCl <sub>er</sub>	6.500~9.200
SF <sub>6</sub>	23.900

**Kaynak:** (IPCC, 2013)

*Asidifikasyon Potansiyeli (AP):* Kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>), azot oksitleri (NO<sub>x</sub>), hidrojen klorür (HCl) ve amonyak (NH<sub>3</sub>) gibi kirleticilerin H<sup>+</sup> iyonları şeklinde potansiyel asit biriktirmesini ifade eden etki kategorisidir. Asitleştirici maddelerin toprak, yeraltı suyu, yüzey suyu, organizmalar, ekosistemler ve malzemeler üzerinde yarattığı toksik etki değerlendirilmektedir. Bu çevresel etkinin birimi kg SO<sub>2</sub>-eşd.'dir (Baumann ve Tillman, 2004). AP denklem 3.2 ile hesaplanmaktadır.

$$AP = \sum_j^J AP_j \times B_j$$

(3.2.)

AP- asidifikasyon potansiyeli (kg SO<sub>2</sub>eşd.)

AP<sub>j</sub>- gazın emisyon faktörü (kg SO<sub>2</sub>eşd./kg)

B<sub>j</sub>- gaz emisyonu, j (kg)

J- toplam gaz sayısı

*Ötrofikasyon Potansiyeli (ÖP):* Atmosferden, sulara ve topraklara fazla miktarda besin maddesi salımının yol açtığı etkileri tanımlayan bir kategoridir. Bu etki genellikle azot (N) ve fosfor (P) gibi besin maddelerinin alglerin biyokütlesini artırma potansiyelini içermekte ve bu etki, PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> konsantrasyonu üzerinden değerlendirilmektedir (Adisa Azapagic, 2010). ÖP denklem 3.3 ile hesaplanmaktadır.

$$\text{ÖP} = \sum_j^J \text{ÖP}_j \times B_j$$

(3.3)

ÖP- ötrafikasyon potansiyeli (kg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>eşd.)

ÖP<sub>j</sub>- gazın emisyon faktörü (kg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>eşd./kg)

B<sub>j</sub>- gaz emisyonu, j (kg)

J- toplam gaz sayısı

*İnsan Toksisitesi Potansiyeli (İTP)*: Emisyonların atmosfere salımı, özellikle üretim süreçlerinden kaynaklanan eser miktardaki ağır metallerin insan sağlığını olumsuz etkilemesini ölçen bir kategoridir. Toksik kirleticilerin havaya, suya ve toprağa salımının etkilerini içerir, genellikle kanserojen ve kanserojen olmayan bileşenlerin ağırlıklı bir değerlendirmesini içermekte ve bu etki, değerlendirilen toksik karakterize birim 1,4-dichlorobenzene (DCB) gibi birimlerle ifade edilmektedir (Adisa Azapagic, 2010; Circular Ecology, 2023). İTP denklem 3.4 ile hesaplanmaktadır.

$$\text{İTP} = \sum_j^J \text{İTP}_j \times B_j$$

(3.4)

ÖP- insan toksisitesi potansiyeli (kg DCBeşd.)

ÖP<sub>j</sub>- gazın emisyon faktörü (kg DCBeşd./kg)

B<sub>j</sub>- gaz emisyonu, j (kg)

J- toplam madde sayısı

*Ozon Tabakasını İnceltme Potansiyeli (OTİP)*: Stratosferik ozon tabakasının incelmesine neden olan CFC'ler, HCFC'ler ve halojenlerin etkilerini ölçen bir kavramdır. Ozon tabakasının incelmesi, insan ve hayvan sağlığı, ekosistemler, biyokimyasal döngüler ve malzemeler üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Aynı zamanda Dünya'nın yüzeyine ulaşan radyasyon miktarının artmasına da yol açmaktadır. Bu etki, trikloroflorometan (R11) cinsinden ifade edilmektedir (Adisa Azapagic, 2010; Baumann ve Tillman, 2004). OTİP denklem 3.5 ile hesaplanmaktadır.

$$OTIP = \sum_j^J OTIP_j \times B_j \quad (3.5)$$

OTIP- ozon tabakasını inceltme potansiyeli (kg R11eşd.)

OTIP<sub>j</sub>- gazın emisyon faktörü (kg R11eşd./kg)

B<sub>j</sub>- gaz emisyonu, j (kg)

J- toplam ozon tüketen gaz sayısı

*Fotokimyasal Ozon Oluşturma Potansiyeli (FOOP):* Yaz sisi veya yer seviyesinde ozon üretimi olarak bilinen bir süreç, NO<sub>x</sub> kirleticileri ile uçucu organik bileşiklerin (VOC'ler) fotokimyasal oksidanlar oluşturmasıyla gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlar sonucunda düşük seviyeli ozon (O<sub>3</sub>) oluşabilmektedir. Ozonun yer seviyesinde üretilmesi, özellikle sıcak yaz aylarında birikerek duman oluşturabilmekte ve insan sağlığı için bir sorun teşkil edebilmektedir (Circular Ecology, 2023). Bu etki kategorisi C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (Baumann ve Tillman, 2004). FOOP denklem 3.6 ile hesaplanmaktadır.

$$FOOP = \sum_j^J FOOP_j \times B_j \quad (3.6)$$

FOOP- fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli (kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eşd.)

FOOP<sub>j</sub>- gazın emisyon faktörü (kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eşd./kg)

B<sub>j</sub>- gaz emisyonu, j (kg)

J- toplam madde sayısı

*Abiyotik Tükenme Potansiyeli Fosil, (ATP fosil):* Abiyotik doğal mineral ve enerji kaynaklarının tükenmesi, ham petrol, kömür, doğal gaz ve metal cevherleri gibi unsurları içermektedir. Bu etki kategorisi fosil yakıtların tükenmesi potansiyelini ölçer ve MJ eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (Baumann ve Tillman, 2004). ATP fosil denklem 3.7 ile hesaplanmaktadır.

$$ATP_{\text{fosil}} = \sum_j^J ATP_{\text{fosil}_j} \times B_j$$

(3.7)

ATP fosil- abiyotik tükenme potansiyeli fosil (kg MJ eşd.)

ATP fosil<sub>j</sub>- fosil enerji kaynağı için abiyotik tükenme potansiyeli (kg MJ eşd./kg)

B<sub>j</sub>- fosil enerji kaynağının kullanım miktarı, j (kg)

J- toplam fosil enerji kaynağı sayısı

*Abiyotik Tükenme Potansiyeli Element (ATP element)*: Bu çevresel etki kategorisi metal ve mineral cevherleri gibi cansız yani abiyotik kaynakların tükenmesi anlamına gelmektedir. Abiyotik kaynakların tükenmesi element şeklinde de isimlendirilen bu etki kategorisi küresel boyutta incelenmektedir. Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli, antimon (Sb) eşdeğeri cinsinden ölçülmektedir (Baumann ve Tillman, 2004). ATP element denklem 3.8 ile hesaplanmaktadır.

$$ATP_{\text{element}} = \sum_j^J ATP_{\text{element}_j} \times B_j$$

(3.8)

ATP element- abiyotik tükenme potansiyeli element (kg Sb eşd.)

ATP element<sub>j</sub>- element kaynağı için abiyotik tükenme potansiyeli (kg Sb eşd./kg)

B<sub>j</sub>- fosil enerji kaynağının kullanım miktarı, j (kg)

J- toplam element sayısı

*Eko-Toksisite Potansiyelleri (Karasal, Tatlı Su ve Deniz)*: Bu üç gösterge, toksik maddelerin karaya (KEP), tatlı suya (TSEP) ve denize salımını (DEP) ölçer ve aynı zamanda DCB eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (Baumann ve Tillman, 2004). Tatlı su kaynaklarının kirlenmesi ve topraktaki ağır metallerin varlığı nedeniyle mahsul ve hayvan kaybı, balıklarda yüksek cıva içeriği ve deniz kirliliği nedeniyle mercan resiflerinin kaybı gibi bazı örnekler bu durumu göstermektedir (Cuellar Franca, 2013). KEP, TSEP, DEP denklem 3.9 ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Toplam Çevresel Etki (KEP, TSEP, DEP)} = \sum_j^J b_j \times B_j \quad (3.9)$$

$b_j$  – j gazının emisyon faktörü (kg DCBeşd./kg)

$B_j$  – j gazının emisyon değeri, j (kg)

J – toplam gaz sayısı

### 3.5. Sonuçların Yorumlanması

Çalışmanın bu basamağında etki analizi sonucunda elde edilen sonuçlar bu basamakta değerlendirilmiş olup, etkilerin en fazla geldiği kaynaklar bulunmuştur. APK malzemesi için farklı geri dönüştürülmüş ham madde kullanımı, farklı enerji kaynaklarının kullanılması ve ham madde nakliye mesafesi üzerinden çevresel etki azaltım senaryoları da uygulanmıştır. Çalışmamıza ait bulgular Bölüm 4'te sunulmuştur.

## 4. BULGULAR

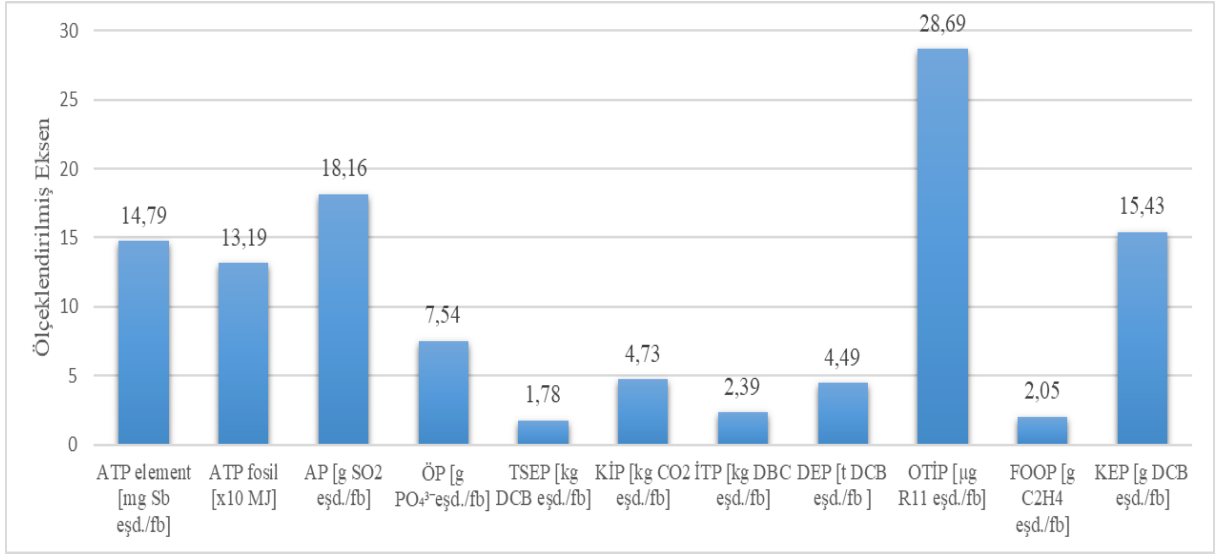
Otomobil sektörü için üretilen APK malzemesinin yaşam döngüsü çevresel etki değerlendirmesi 2021-2022 yılı verileri esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Etki analizi basamağında YDD çalışmasının çevresel etki sonuçları CML- IA metodu (Jeroen B Guinée, 2002) ile hesaplanmıştır. Çalışmada hesaplanan 11 çevresel etki kategorisi değerlendirilmiştir. Bütün sonuçlar çalışmanın fonksiyonel birimi 1 m<sup>2</sup> APK malzeme üretimi olarak belirlenmiş olup, seçilen ürün grubunun 1 m<sup>2</sup> ağırlığı 3 kg olduğu temel alınarak açıklanmıştır.

### 4.1. APK Malzeme Üretiminin Çevresel Etkileri

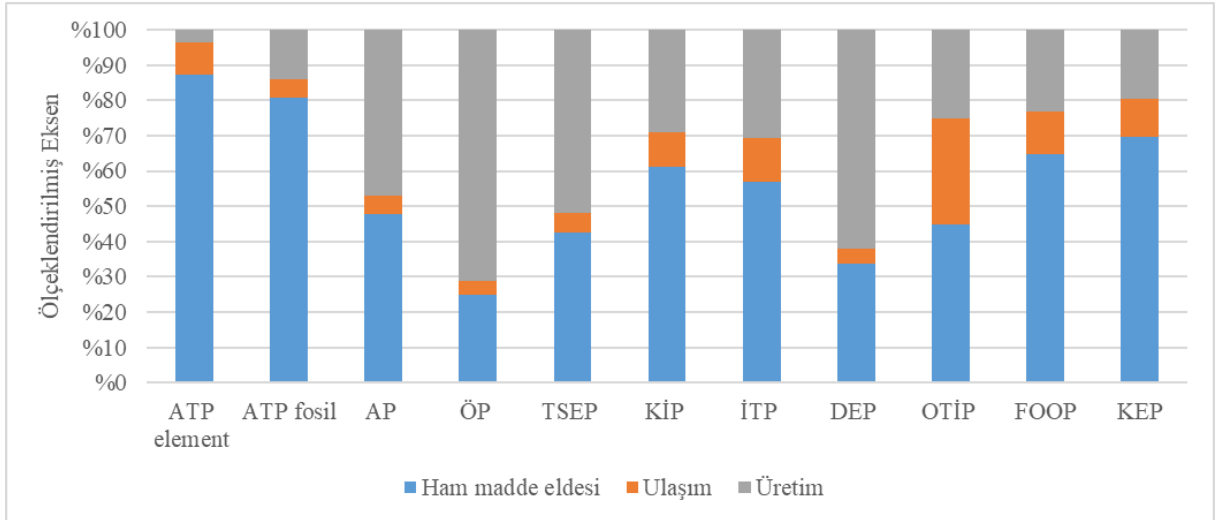
Otomobillerde kullanılan APK ürünü için yaşam döngüsü çevresel etkileri bu bölümde değerlendirilmiştir. Çalışmada hesaplanan çevresel etki kategorileri, ham madde temini, ham madde ve ambalaj malzemesi nakliyesi ile APK malzeme üretim aşamaları için toplam çevresel etkileri içererek YDD sonuçlarını daha anlaşılır kılmak amacıyla sunulmuştur. Etki analizi sonuçları, her bir yaşam döngüsü aşaması ve üretim basamağı için fonksiyonel birime bağlı olarak detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.

Fonksiyonel birimimiz olan 1 m<sup>2</sup> APK malzemesi için toplam çevresel etki değerleri Grafik 4.1'de verilmiştir. Yaşam döngüsü basamakları olarak belirlenen ham maddelerin elde edilmesi ve işlenmesi, ham maddelerin ve ürünün nakliyesi ile APK malzemesi üretimi aşamalarında açığa çıkan çevresel etki dağılımı Grafik 4.2'te sunulmuştur. APK malzemesi

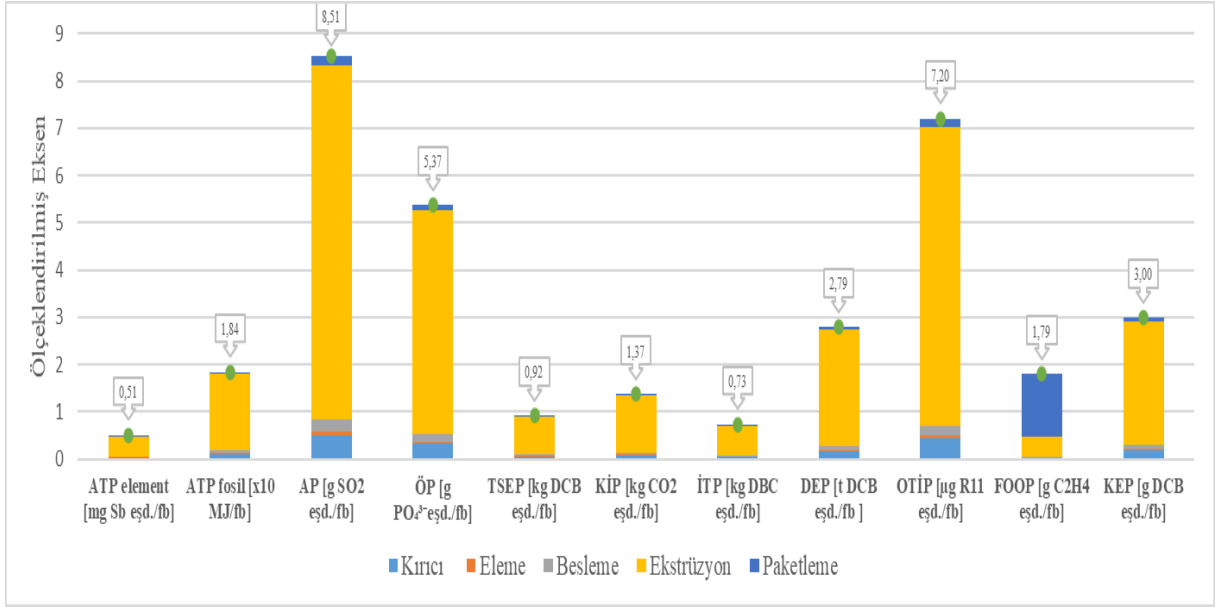
üretim süreci için ise kırma, eleme, besleme, ekstrüzyon, paketleme basamakları dikkate alınmıştır ve bunlara ait sonuçlar ve APK malzemesi üretim sürecinden gelen çevresel etkinin üretim basamaklarına göre dağılımı Grafik 4.3'te verilmiştir.



**Grafik 4. 1.** APK malzeme için yaşam döngüsü çevresel etkiler



**Grafik 4. 2.** APK malzemesinin çevresel etkilerinin yaşam döngüsü basamaklarına göre yüzdesel dağılımı



**Grafik 4.3.** APK malzemesi üretim aşamalarının çevresel etki kategorilerine göre dağılımı

#### 4.1.1. ATP Element

ATP doğal ham madde tüketimi değerini verir ve antimon (Sb) eşdeğeri (eşd.) olarak ifade edilir. Grafik 4.1’de görüldüğü gibi belirlenen özellikteki 1 m<sup>2</sup>’lik APK malzemenin toplam ATP element değeri 14,79 mg Sb eşd./fb’dir (Grafik 4.1). ATP element oluşumuna en fazla neden olan yaşam döngüsü basamağı %87,35 ile ham madde eldesidir (Grafik 4.2). Ham madde eldesi basamağından sonra en fazla etkinin geldiği basamak ise APK malzeme üretiminde kullanılmakta olan ham maddelerin ulaşımına (%9,22) aittir. En düşük etki ise APK malzemesinin üretim basamağı olup, toplam etkinin %3,42’si bu basamaktan gelmektedir. Grafik 4.3’te sunulduğu gibi üretim basamaklarından en fazla etki ekstrüzyon basamağıdır.

#### 4.1.2. ATP (fosil)

ATP fosil kullanılan fosil yakıtların etkisini ortaya koyar ve MJ birimi ile verilmektedir. Grafik 4.1’de gösterildiği gibi APK malzemesinin toplam ATP fosil değeri 13,19 MJ/ fb olarak bulunmuştur. ATP fosil oluşumunda en büyük etkiye neden olan yaşam döngüsü aşaması %80,70 ile ham madde eldesidir (Grafik 4.2). Ham madde eldesi aşamasını takip eden en büyük etki, APK malzemesinin üretim aşamasında (%13,93) gözlemlenmektedir. En düşük etki ise ham maddelerin ulaşım aşamasına (%5,37) aittir. Grafik 4.3’te sunulduğu gibi üretim basamaklarından en fazla etki ekstrüzyon basamağıdır.

#### **4.1.3. AP**

AP asitli gazların atmosferdeki su ile etkileşime girmesi sonucu asit yağmurları oluşturması potansiyelidir ve SO<sub>2</sub> eşd. olarak ifade edilir. APK malzemesinin toplam AP değeri 18,16 g SO<sub>2</sub> eşd./ fb olarak bulunmuştur (Grafik 4.1). AP oluşumunda en büyük etkiye neden olan yaşam döngüsü aşaması %47,90 ile ham madde eldesinden gelmektedir (Grafik 4.2). Ham madde eldesi aşamasını takip eden en büyük etki, APK malzemesinin üretim aşamasında (%46,87) gözlemlenmektedir. Grafik 4.3'te sunulduğu gibi üretim basamaklarından en fazla etki %88 oranı ile ekstrüzyondur.

#### **4.1.4. ÖP**

Ötrofikasyon, canlılara zarar veren, ekosistemde hızlı biyokütle artışına yol açan bir kimyasal besin konsantrasyonunun birikmesidir ve PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> eşd. olarak ifade edilmektedir. APK malzeme için bu etki 7,54 g PO<sub>4</sub> eşd./fb olarak hesaplanmıştır (Grafik 4.1). ÖP oluşumunda en büyük etkiye neden olan yaşam döngüsü aşaması %71,20 ile üretimdir. Bunun temel sebebi Grafik 4.3'te belirtildiği gibi ekstrüzyon (4,73g PO<sub>4</sub> eşd./fb )basamağıdır. Üretim aşamasını takip eden en büyük etki, %24,87'lük oran ile (Grafik 4.2) ham madde eldesinden gözlemlenmektedir.

#### **4.1.5. TSEP**

Sistemin tatlı su kaynaklarındaki ekosisteme verdikleri zararı belirtir ve 1,4-diklorobenzen (DCB) eşd. olarak ifade edilmektedir. APK malzemesi için bu etki yaklaşık olarak 1,78 kg DCB eşd./fb olarak bulunmuştur (Grafik 4.1). TSEP oluşumunda en büyük etkiye neden olan yaşam döngüsü aşaması %51,77 ile üretimdir. Bunun temel nedeni Grafik 4.3'te belirtildiği üzere ekstrüzyon (%88) basamağıdır. Üretim aşamasını takip eden en büyük etki, %42,62'lik oran ile (Grafik 4.2) ham madde eldesinden gözlemlenmektedir.

#### **4.1.6. KIP**

Sera gazlarından kaynaklanan sıcaklıktaki değişim olarak tanımlanabilir ve CO<sub>2</sub> eşd. olarak ifade edilir. Çalışmamızda APK malzemedan kaynaklanan toplam KIP 4,73 kg CO<sub>2</sub> eşd./fb olarak bulunmuştur. Grafik 4.2'de görüleceği üzere KIP oluşumunda en yüksek etki, yaşam döngüsünün ham madde eldesi aşamasından gelmektedir ve toplam etkinin %61,16'lık kısmını oluşturmaktadır. Ham madde eldesi aşamasını takip eden en yüksek etki, üretim aşamasında (%28,92) gözlemlenmektedir. Üretim basamağında ise en büyük KIP etkisi 1,212 CO<sub>2</sub> eşd./fb ile ekstrüzyondan gelmektedir (Grafik 4.3).

#### **4.1.7. İTP**

Kimyasalların yüksek konsantrasyonlarda havaya ve suya salınmasının insanlar üzerindeki toksik etkisinin potansiyelidir ve DCB eşd. olarak ifade edilir. 1 m<sup>2</sup>'lik APK malzemesinin toplam insan toksisitesi potansiyeli 2,39 kg DCB eşd. olarak bulunmuştur (Grafik 4.1). İTP oluşumunda en yüksek etki, yaşam döngüsünün %57,02'sini oluşturan ham madde eldesi aşamasından gelmektedir (Grafik 4.2). Ham madde eldesi aşamasını takip eden en yüksek etki, üretim aşamasında (%30,59) gözlemlenmektedir. Üretim basamağındaki en yüksek etki ise 0,642 DCB.eşd/fb ile ekstrüzyon basamağından gelmektedir (Grafik 4.3).

#### **4.1.8.DEP**

DEP, salınan kimyasalların deniz ve okyanus ekosistemlerine verdiği zararı ölçmektedir ve DCB eşd. olarak verilmektedir. APK malzemesi için bu etki 4,49 t DCB eşd./fb olarak hesaplanmıştır (Grafik 4.1). DEP oluşumunda en yüksek etki, yaşam döngüsünün %62,14'sini oluşturan APK malzemesinin üretim aşamasından gelmektedir. Üretim aşamasını takip eden en yüksek etki, %33,58 ile (Grafik 4.2) ham madde eldesi aşamasında gözlemlenmektedir En düşük etki ise ham maddelerin ulaşım aşamasına (%4,28) aittir. Üretim basamağındaki en yüksek etki ise 2,456 DCB eşd./fb ile ekstrüzyon basamağından gelmektedir (Grafik 4.3).

#### **4.1.9. OTİP**

Kloroflorokarbonlar gibi bazı kimyasalların ozon tabakasına zarar verme potansiyelini değerlendirir ve trikloroflorometan (R11) eşd. olarak ifade edilmektedir. APK malzemesi için bu etki 28,69 µg R11 eşd./fb olarak hesaplanmıştır (Grafik 4.1). OTİP oluşumunda en yüksek etki, yaşam döngüsünün %44,71'ini oluşturan ham madde eldesi aşamasından gelmektedir (Grafik 4.2). Ham madde eldesi aşamasını takip eden en yüksek etki, ham maddelerin ulaşımı aşamasında (%30,18) gözlemlenmektedir. En düşük etki ise APK malzeme üretimi aşamasına (%25,11) ait olup, üretim basamağındaki en yüksek etki 6,316 µg R11 eşd./fb ile ekstrüzyon basamağından gelmektedir.

#### **4.1.10. FOOP**

FOOP insan sağlığına ve ekosisteme zarar veren reaktif maddelerin oluşumu potansiyelidir ve C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eşd. olarak ifade edilmektedir. Belirlenen sistem için bu etki toplam 2,05 g C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eşd./fb olarak hesaplanmıştır (Grafik 4.1). FOOP oluşumunda en yüksek etki, yaşam döngüsünün %64,82'sini oluşturan ham madde eldesi aşamasından kaynaklanmaktadır (Grafik 4.2). Ham madde eldesi aşamasını takip eden en yüksek etki, üretim aşaması (%23,05) olup,

üretim basamağındaki en yüksek etki 1,332 g C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eşd./fb ile paketlenme basamağından gelmektedir.

#### **4.1.11. KEP**

KEP kimyasal salımı sonucunda kara ekosistemleri üzerindeki toksik etki potansiyelidir. Bu çevresel etki kategorisi DCB eşd. olarak verilmektedir. APK malzemesi için bu etki yaklaşık olarak 15,43 g DCB eşd./fb olarak bulunmuştur (Grafik 4.1). KEP oluşumunda en yüksek etki, yaşam döngüsünün %69,71'sini oluşturan ham madde eldesi aşamasından gelmektedir (Grafik 4.2). Ham madde eldesi aşamasını takip eden en yüksek etki, üretim aşamasında (%19,42) gözlemlenmekte olup, üretim basamağındaki en yüksek etki 2,625 g DCB eşd./fb ile ekstrüzyon basamağından gelmektedir.

#### **4.2. APK Malzeme Üretiminden Kaynaklanan Çevresel Etkilerinin Azaltılması**

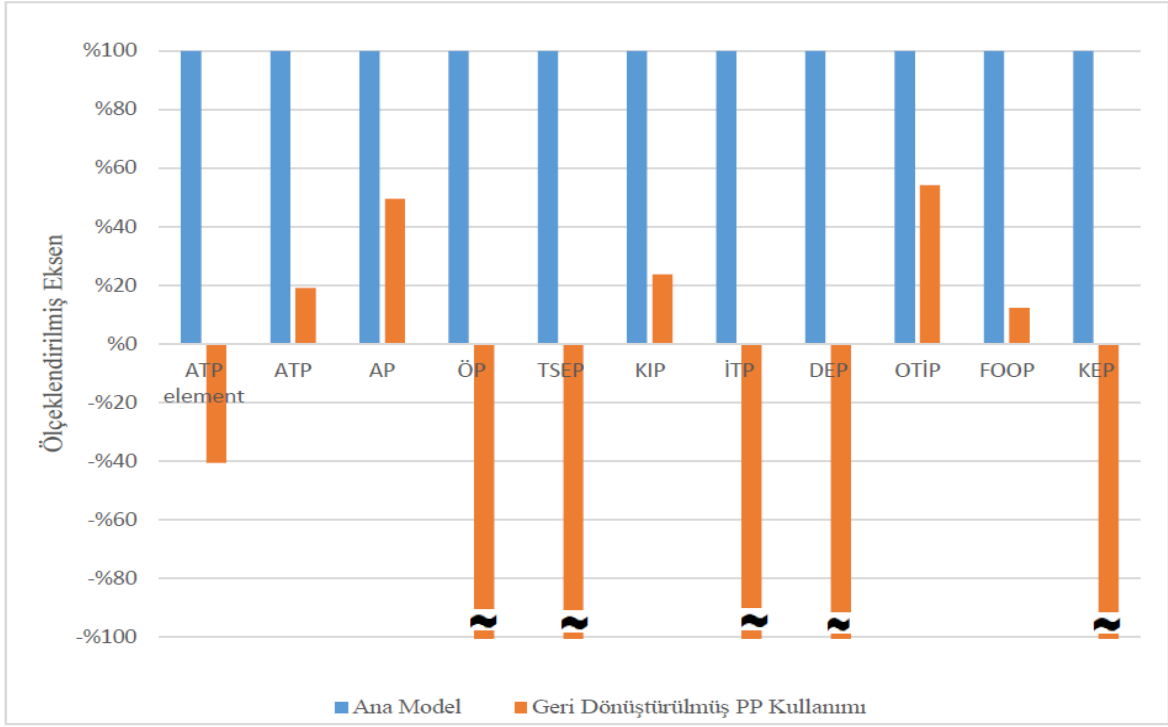
APK malzemesinin üretiminden kaynaklanan çevresel etkileri değerlendirmek amacıyla YDD yöntemini kullanarak, üretimin her aşamasını içeren beşikten kapıya tüm adımlar dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, özellikle ham madde eldesi sürecinden kaynaklanan yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerin en yoğun olduğu adımları belirtmektedir. Bu sonuçlar temelinde, hammadde ve üretim basamakları için alternatif iyileştirme modelleri geliştirilmiş ve bu iyileştirmelerin hayata geçirilmesi durumunda 1m<sup>2</sup> APK malzemesinin üretiminden kaynaklanan çevresel etkilerin nasıl değişiklik göstereceği analiz edilmiştir.

Oluşturulan modellerde, çevresel etkileri minimize etme hedefiyle APK malzemesi üretiminde geri dönüştürülmüş PP kullanımı, farklı ham madde seçenekleri, alternatif ulaşım senaryoları ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gibi durumlar alternatif bir bakış açısıyla değerlendirilmiştir. Çevresel sürdürülebilirlik odaklı olarak oluşturulan iyileştirme modellerinin sonuçları aşağıda bulunmaktadır.

##### **4.2.1. Geri Dönüştürülmüş PP Kullanımı**

Çalışmamızın sonuçlarına göre, çevresel etkilerin önemli ölçüde ham madde eldesi aşamasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Ham maddelerin yol açtığı çevresel etkileri azaltma amacıyla geri dönüştürülmüş PP kullanımı alternatifine yönelik bir iyileştirme çalışması gerçekleştirilmiştir. Aynı miktarda geri dönüştürülmüş PP eklenmiştir. Geri dönüşümsüz PP kullanılarak elde edilen ana model sonuçları 100 olarak sabitlenmiş ve geri dönüştürülmüş PP kullanılarak üretilen APK malzemenin çevresel etkileri normalize edilerek hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar model ile karşılaştırılarak değişim oranları şeklinde Grafik 4.4'te sunulmuştur. Geri dönüştürülmüş PP kullanımı tüm çevresel etki değerlerinde azaltım

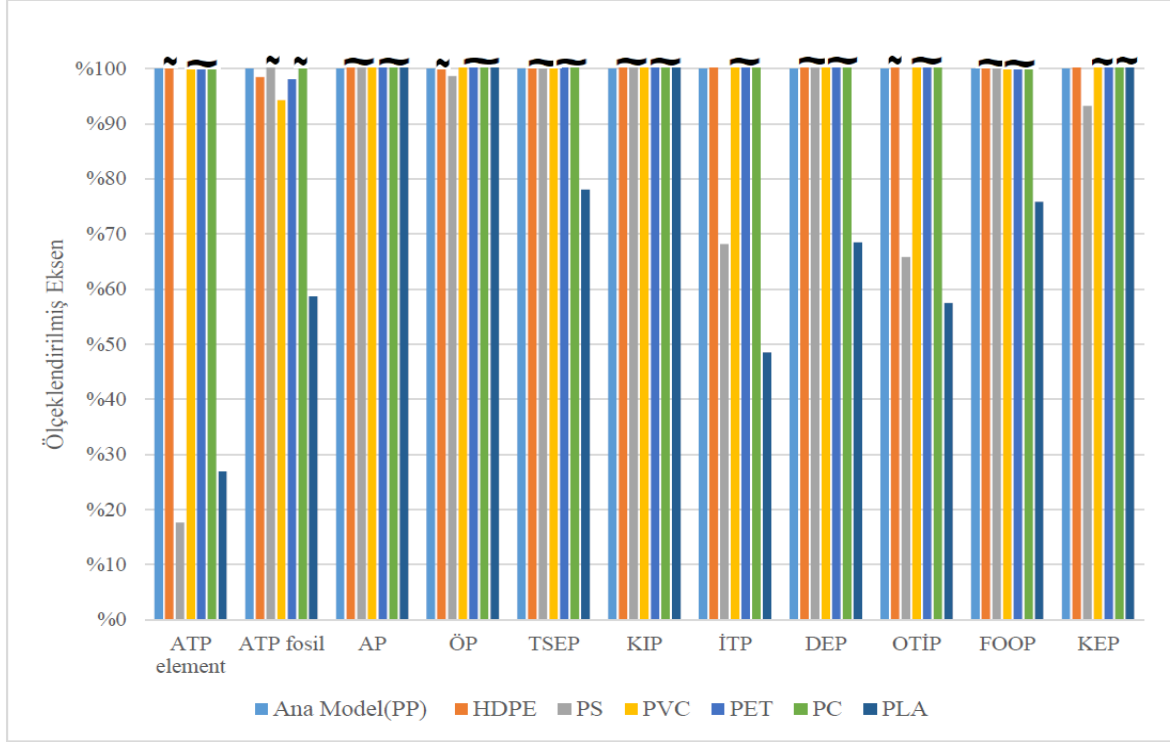
göstermiştir. Çevresel etkilerde en büyük azalma sırasıyla KEP (%2773), ÖP (%914), İTP (%594), TSEP (%588) ve DEP (%130) kategorilerinde gerçekleşmiştir.



**Grafik 4. 4.** Ana model ve geri dönüştürülmüş PP kullanımının APK malzemesi üretiminde KIP değerlerinin karşılaştırılması

#### 4.2.2. Alternatif Ham Madde Seçeneklerinin Kullanılması

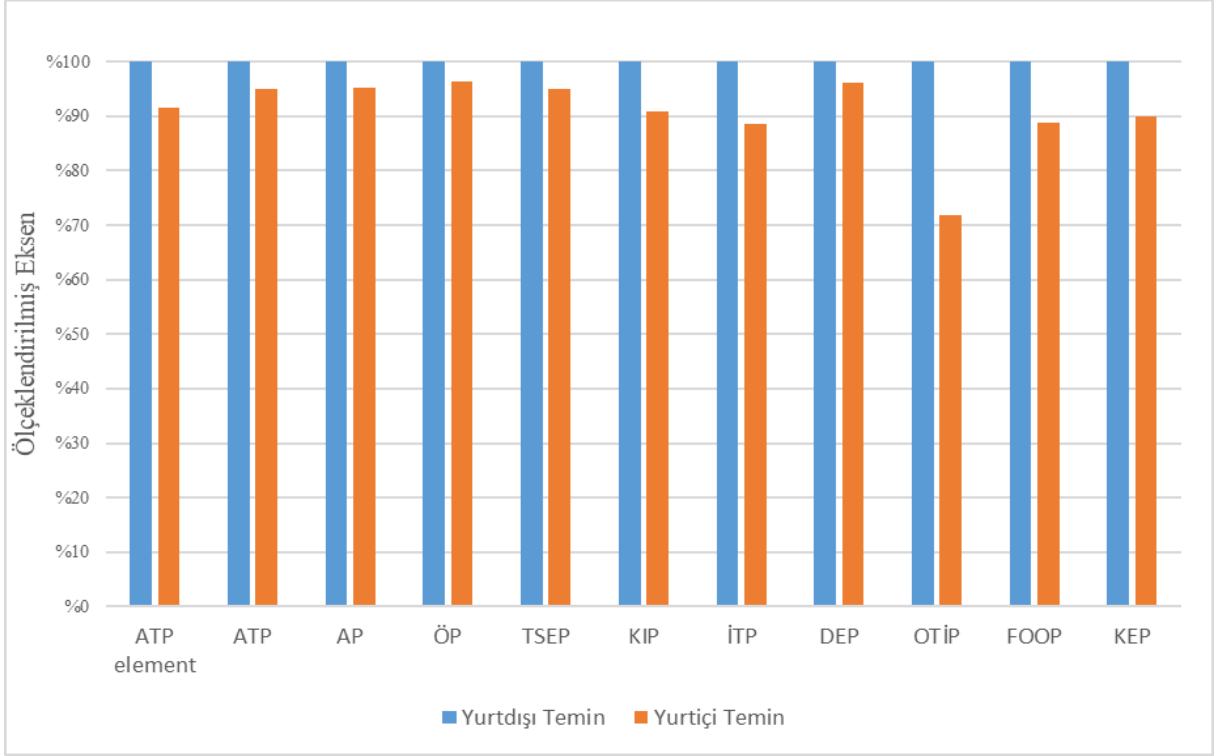
Çalışmamızın sonuçlarına göre, çevresel etkilerin önemli ölçüde ham madde eldesi aşamasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Ham maddelerin yol açtığı çevresel etkileri azaltma amacıyla APK malzemesinin üretiminde alternatif ham madde seçeneklerinin kullanılmasına yönelik bir iyileştirme çalışması gerçekleştirilmiştir. PP ham maddesi kullanılarak elde edilen ana model sonuçları 100 olarak sabitlenmiş HDPE, PS, PVC, PLA, PC, PET kullanılarak üretilen APK malzemenin çevresel etkileri normalize edilerek hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar model ile karşılaştırılarak değişim oranları Grafik 4.5'te sunulmuştur. Alternatif ham maddelerin yarattığı çevresel etkiler ana modelimiz ile karşılaştırılmıştır. Alternatif ham maddelerin kullanımı genel olarak çevresel etki kategorilerinde önemli bir azaltım sağlamamıştır. Ancak, PLA'nın alternatif ham madde olarak kullanımı, bazı etki kategorilerinde azaltım sağlamıştır. Bu kategoriler arasında %74 azaltımla ATP element, %52 azaltımla İTP, %42 azaltımla ATP fosil ve OTİP, %32 azaltımla DEP, ve %25 azaltımla FOOP bulunmaktadır.



**Grafik 4. 5.** APK malzemesi üretiminde ana model ve alternatif ham maddelerin çevresel etkilerinin karşılaştırılması

#### 4.2.3. Alternatif Ulaşım Senaryolarının Değerlendirilmesi

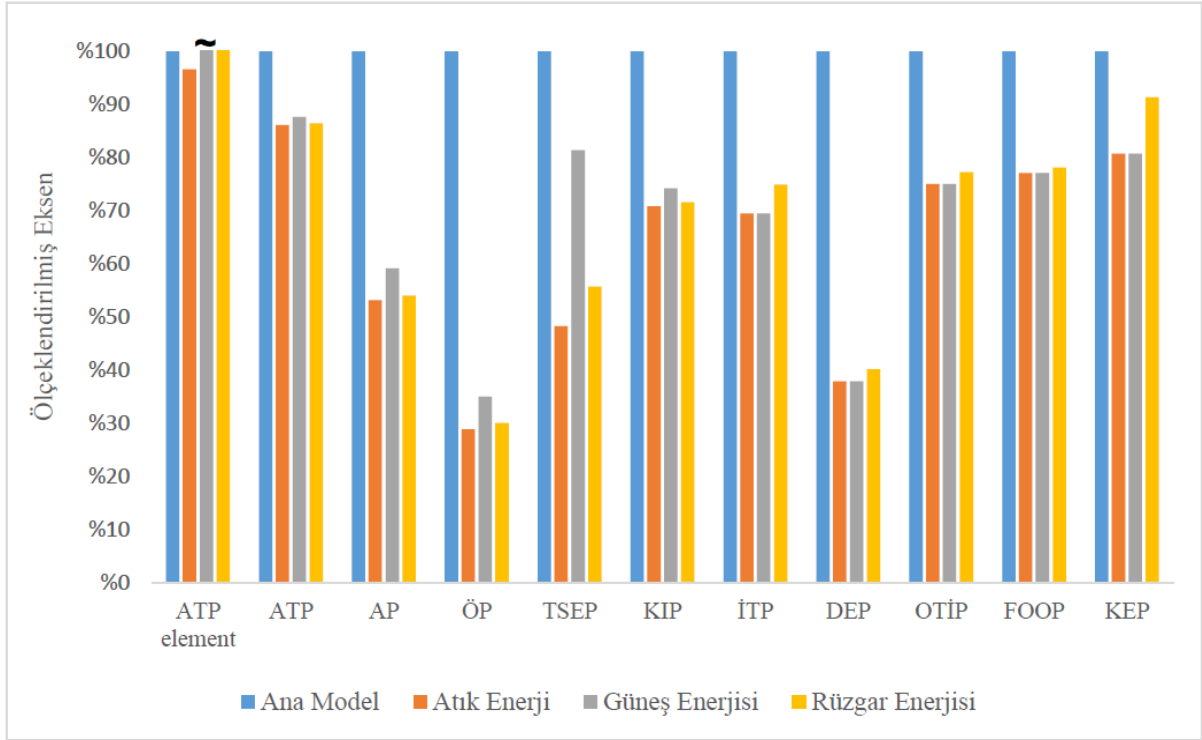
Sonuçlara göre, çevresel etkilerin bir kısmının ham madde ulaşımından kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Ham maddelerin ulaşımının yol açtığı çevresel etkileri azaltma amacıyla, PP ham maddesinin ulaşımının Fransa-Belçika yerine Türkiye-Kocaeli'deki PETKİM firmasından gerçekleştirilmesi üzerine bir iyileştirme çalışması gerçekleştirilmiştir. Ham madde ulaşımı için Fransa-Belçika kullanılarak elde edilen ana model sonuçları 100 olarak sabitlenmiş ve Türkiye-Kocaeli'deki PETKİM firması ile ulaşım sağlanması sonucu elde edilen çevresel etkiler normalize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar model ile karşılaştırılarak değişim oranları olarak Grafik 4.6'da sunulmuştur. Ham maddenin PETKİM firmasından temin edilmesi çevresel etki kategorilerinin tamamında azaltım sağlamıştır. Çevresel etkilerde en büyük azalma sırasıyla OTİP (%29), FOOP ve İTP (%12) kategorilerinde gerçekleşmiştir.



**Grafik 4. 6.** PP ham maddesi ulaşım senaryolarının çevresel etkilerinin karşılaştırılması

#### 4.2.4. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanılması

Çalışma sonuçlarına göre, çevresel etkilerin büyük bir kısmının üretim aşamasından kaynaklandığı görülmüştür. APK malzemesinin üretim basamağının neden olduğu çevresel etkileri azaltma amacıyla, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasına yönelik bir iyileştirme çalışması gerçekleştirilmiştir. APK malzemesinin üretiminde kullanılan şebeke elektriği ile elde edilen ana model sonuçları 100 olarak sabitlenmiş ve yenilenebilir enerji kaynakları (atık enerji, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi) kullanımı sonucu elde edilen çevresel etkiler normalize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar model ile karşılaştırılarak değişim oranları Grafik 4.7’de sunulmuştur. Yenilenebilir enerji kullanımı çevresel etki kategorilerinin neredeyse tamamında azaltım sağlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak atık enerji kullanımı, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi kullanımından kaynaklanan çevresel etkilerin sonucuna göre en yüksek azaltım oranını sağlamıştır. Atık enerji kullanımı ile çevresel etkilerde en büyük azalma sırasıyla ÖP (%72), DEP (%63), TSEP (%52) etki kategorilerinde gerçekleşmiştir. Yenilenebilir enerji olarak güneş enerjisi kullanımı ise yalnızca ATP element çevresel kategorisinde %70 oranında bir artış göstermiştir.



**Grafik 4. 7.** APK malzemesinin üretiminde yenilenebilir enerji kullanımının ana model ile karşılaştırılması

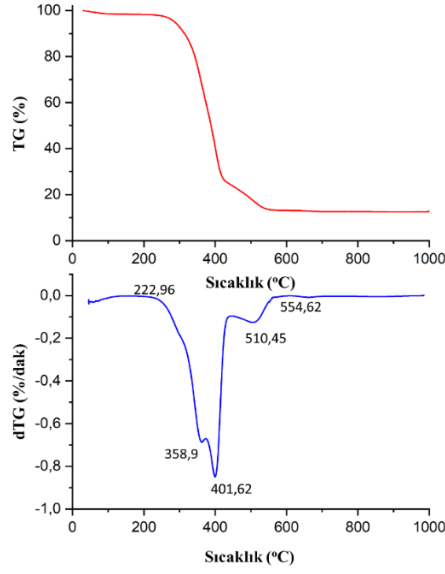
### 4.3. APK Malzeme Karakterizasyonu

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Termogravimetrik Analiz (TGA) analizlerinin sonuçları 4.3.1 ve 4.3.2 alt başlıklarında sunulmuştur.

#### 4.3.1. APK Malzemesi için Termogravimetrik Analiz Sonuçları

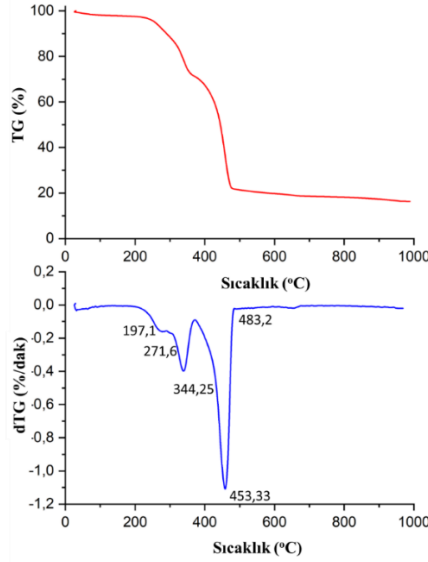
Ahşap-polimer plastik kompozitlerin TG ve dTG eğrileri 10 °C/dak aralığında hem hava hem de azot atmosferinde alınarak, piklerin konumuna göre ana termal bozunma tepkimelerinin gerçekleştiği aralıklar tespit edilmiştir. Şekil 4.1’de elde edilen termogramlar verilmiştir.

Şekil 4.1’de verilen termogramlar hava ortamında ana bozunma tepkimelerinin 197°C’de başladığını ve 483°C’de bittiğini göstermektedir. Bu tepkimelerin sonucunda gerçekleşen kütle kaybı %78,2 olarak tespit edilirken, 1000°C sonrasında yapıda kalan katı kalıntı miktarı %16,2 olarak saptanmıştır.



**Şekil 4. 1.** Hava atmosferinde ahşap-plastik kompozit malzemenin TGA analizi sonuçları

Şekil 4.2’de ise azot atmosferinde yapılan TGA analizi sonucu sunulmuştur. Termogramlar bozunma başlangıcının atmosferden etkilendiğini ve tepkime mekanizmalarının değiştiğini göstermektedir. Şekilde ana pik sıcaklıkları gösterildiği üzere, üç farklı aralıkta termal bozunmanın gerçekleştiği ve 1000°C sonunda malzemenin %78,2’sinin yapıdan uzaklaştığı gözlemlenmektedir.



**Şekil 4. 2.** Azot atmosferinde ahşap-plastik kompozit malzemenin TGA analizi sonuçları

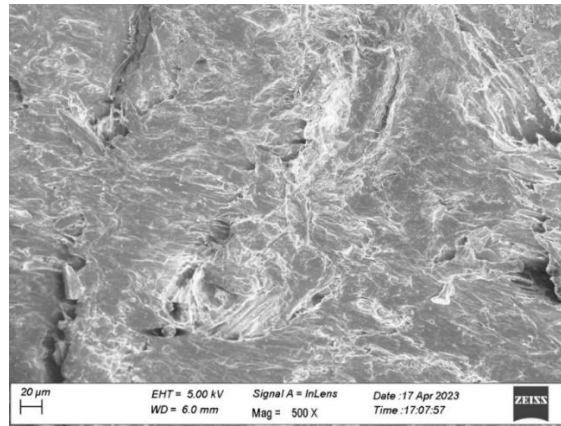
Hem azot hem de hava ortamındaki termogravimetrik analiz sonuçları termal bozunmanın ilk aşamasının yapıdaki polipropilenin bozunmasına ilişkin olduğunu gösterirken, sonraki aşamalar polimer matrise katkılanan ahşap tozunun bozunmasına işaret etmektedir. Lignosellülozik biyokütleyi oluşturan selüloz, lignin ve hemiselüloz bozunmasından sonra

1000°C sıcaklıkta yapıda kalan katı kalıntı miktarı ise yapıdaki katkı maddelerinin varlığına işaret emektedir.

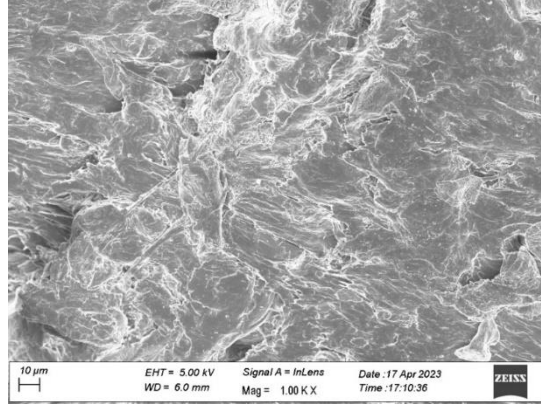
#### 4.3.2. SEM ile Ahşap-Plastik Kompozit Malzemenin Mikroyapısının İncelenmesi

SEM ile yürütülen karakterizasyon sonucunda endüstriyel kuruluştan elde edilen ahşap-plastik kompozitlerin morfolojik yapısının incelenmesi için SEM görüntüleri farklı büyütme oranında alınmış ve sonuçlar Şekil 4.3- Şekil 4.4'te verilmiştir.

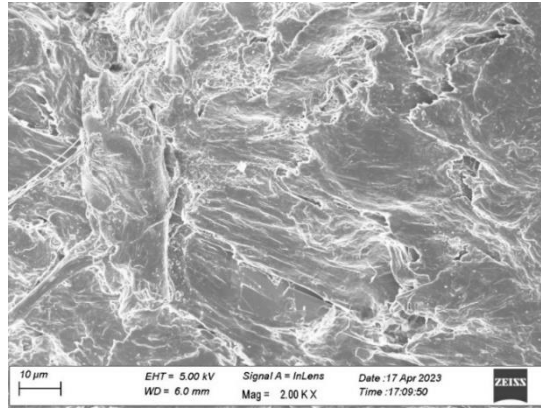
Kompozit numunesinin SEM mikrografları, kompozitin yapısal bütünlüğünün, polimer matris içinde biyokütle aglomerasyonu olmadan düz bir yüzeyde dağıldığını göstermektedir. Bununla birlikte, ahşap tozunun hem enine hem de boyuna yönü boyunca polipropilen matrisinde bazı hafif mikro çatlaklar oluşturduğu da SEM analizinde saptanmıştır. Ancak ahşap-plastik kompozit numunesinde yapılarının hiçbir bölgesinde uygulamalarda sorun teşkil edecek şekilde, biyokütle ve polipropilen arasındaki yüksek derecede uyumsuzluğa neden olabilecek bir net faz ayrımı belirtisi gözlemlenmemiştir. Polipropilenin pürüzsüz yüzeyi üzerindeki odunsu biyokütle parçacıklarının etkili bir şekilde kaplanmasının üretimde kullanılan ekstrüzyon işlemi ile sağlandığı anlaşılmaktadır. Özetle, mikrograflardan ahşap tozunun polipropilende kayda değer bir deformasyona neden olmadığı ve polipropilen fazı içerisinde iyi bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir.



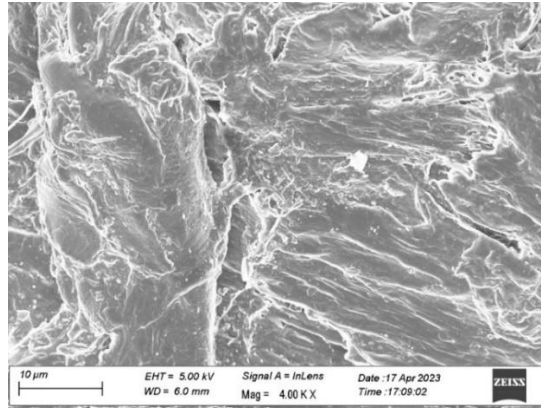
**Şekil 4. 3.** Ahşap-plastik kompozit malzemenin 500x büyütme oranında elde edilen SEM mikrografı



**Şekil 4. 4.** Ahşap-plastik kompozit malzemenin 1000x büyütme oranında elde edilen SEM mikrografi



**Şekil 4. 5.** Ahşap-plastik kompozit malzemenin 2000x büyütme oranında elde edilen SEM mikrografi



**Şekil 4. 6.** APK malzemenin 4000x büyütme oranında elde edilen SEM mikrografi

## 5. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuç

Otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir APK malzeme üreticisiyle iş birliği yapılarak temin edilen gerçek ve doğrulanabilir üretim verileri, bu çalışmanın odak noktasını oluşturmuştur. Bu veriler, 11 farklı çevresel etki kategorisi üzerinden APK malzemesinin çevresel sürdürülebilirliğinin kapsamlı bir değerlendirmesini sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Çalışma, sektördeki çevresel etkileri belirlemek ve bu etkileri azaltmaya yönelik stratejiler geliştirmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu çerçevede, APK malzeme üretimindeki çevresel etkilerin daha iyi anlaşılması ve sürdürülebilir bir üretim modeline geçiş için somut adımların atılması hedeflenmiştir. Modelleme sürecinde GaBi v10.7 kullanılmış ve çevresel etkiler, CML yöntemiyle analiz edilmiştir. Çalışmanın sistem sınırları ham madde elde edilmesi ve nakliyesi ile üretim süreci olarak belirlenmiş olup, fonksiyonel birim olarak 1 m<sup>2</sup> APK malzeme kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, DEP ve TSEP dışındaki çevresel etkilerin ham madde eldesinden kaynaklandığını göstermiştir. İkinci yaşam döngüsü basamağının en fazla çevresel etkiye sebep olduğu ise APK malzemesi üretimidir. Ham madde ulaşımı ise en son basamakta yer almaktadır ve en çok etkiye OTİP etki kategorisinde gözlemlenmiştir. Bu durumun başlıca sebebi, kara yoluyla yapılan nakliye sırasında ortaya çıkan %60 halon 1301, %8 halon 1211 ve %22 karbon tetraklorür emisyonlarıdır.

APK malzeme YDD çalışmasında ham madde olarak geri dönüştürülmüş PP kullanılması, alternatif ham madde tercihi, üretimde yenilebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile ilgili alternatifler değerlendirilmiş olup, iyileştirmeler için senaryolar uygulanmıştır.

Geri dönüştürülmüş PP kullanımının, çevresel etki kategorilerinde yaklaşık %70'lik bir azalmaya yol açtığı belirlenmiştir. Alternatif ham madde tercihi incelendiğinde, HDPE, PVC, PS, PLA yerine ana modelimizde kullanılan PP ham maddesinin, özellikle KIP değeri açısından daha düşük bir değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesi, rüzgar, güneş enerjileri ve atık enerjisinin kullanılmasıyla tüm etki kategorilerinde bir azalmaya neden olmuştur. Örneğin, KIP değerleri üzerinden yapılan karşılaştırmada, ana modele göre güneş enerjisi %26, rüzgar enerjisi %25 ve atık enerjisi ise %29 azaltım sağlamıştır.

## 5.2 Tartışma

### 5.2.1. APK Yaşam Döngüsü Çevresel Etkileri

APK malzeme üzerine yürüttüğümüz bu çalışma ile elde ettiğimiz sonuçlar, bu alanda daha önce gerçekleştirilmiş başka bir YDD çalışmasının bulunmaması nedeniyle literatürdeki diğer araştırmalar veya önceki çevresel etki raporları ile doğrudan karşılaştırılamamıştır. Diğer APK'lerin yaşam döngüsü çevresel etkilerini değerlendiren YDD çalışmalarında seçilen fonksiyonel birim, sistem sınırları ve etki değerlendirme yönteminin farklı olduğu göz önüne alındığında, bu çalışmanın sonuçları ile doğrudan bir kıyaslama yapılamamıştır. Ancak, farklı sektörlerde (örneğin yapı malzemesi) ve farklı kompozit türevlerine sahip otomotiv sektöründe uygulama alanlarına sahip APK'ler ile ilgili yayınlanan EPD belgeleri ve literatür çalışmaları ile otomotiv sektörüne özgü yapılmış APK malzeme çalışmamız arasında bir karşılaştırma gerçekleştirilebilmiştir. Bu karşılaştırma sonucunda bu çalışmada elde ettiğimiz sonuçların EPD belgelerinde belirtilen sonuçlara göre çalışma sonucumuzun daha düşük bir değer sergilediği gözlemlenmiştir. Örnek olarak m<sup>2</sup> başına 1 kg APK malzeme üretimi için KIP değeri için 38,7 kg CO<sub>2</sub>eşd./fb (EPD International AB, 2023) olduğu görülmüştür. Literatür taramasında ise aynı sistem sınırları içerisinde, m<sup>2</sup> başına 1 kg kompozit üretimi için tarafından gerçekleştirilen çalışmada, biyokarbon ve PP ham maddelerinin kullanıldığı kompozit malzemenin KIP değeri 11,08 kg CO<sub>2</sub>eşd./fb (Roy vd., 2020) olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde, Seile vd. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, kenevir lifi ve PLA kullanılan kompozit malzemenin KIP değeri ise 7,69 kg CO<sub>2</sub>eşd./fb olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen APK malzeme çalışmamızda ise, KIP çevresel etki kategorisi için bulduğumuz sonuç 4,73 kg CO<sub>2</sub>eşd./fb'dir. Diğer çevresel etkiler için de benzer durumlar söz konusudur. Değerlerin birbirinden farklı olmasının nedenleri, Türkiye'de elektrik kullanımı, ham maddelerin kaynak ülkeleri, ham madde eldesi yöntemleri, ulaşım, kullanılan veri setleri ve malzeme kalınlıklarındaki çeşitlilikten kaynaklanmaktadır. EPD belgelerinde, çevresel sürdürülebilirliği arttırmaya yönelik herhangi bir iyileştirme çalışması veya önerisi sunulmadığı için, yaşam döngüsü çevresel etki kategorileri üzerindeki karşılaştırmalar sadece mevcut çevresel etki değerleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

KIP etkisine %85 oranında CO<sub>2</sub> emisyonları sebep olmaktadır. CO<sub>2</sub> emisyonu oluşumunun %57,6'sı PP ham maddesinin eldesinden kaynaklanmaktadır. İkinci en büyük etki ise Grafik 4.2'te gösterildiği üzere üretim aşamasından kaynaklanmaktadır. En fazla etki üretim basamağındaki ekstrüzyon aşamasından gelmektedir. Ekstrüzyon aşamasının karbon

salımındaki en yüksek etkiye sahip olmasının nedeni ise bu basamaktaki yüksek sıcaklık ve yüksek basınç işleminden kaynaklı kullanılan enerji miktarının fazla olmasıdır.

Çevresel etki kategorilerine sebep olan kaynaklar ya da emisyonlar detaylandırıldığında ATP element ham madde eldesi basamağında %43,6 tellür, %25,5 altın ve %10,4 altın ve diğer elementlerin kullanılması sebep olmuştur. Tellür tüketiminin %90'ı PP ham maddesinin eldesinden kaynaklanmaktadır. Bu veriler, ATP element oluşumundaki başlıca katkıların ham madde eldesi aşamasından geldiğini ve bu aşamanın özellikle tellür ve altın elementlerinin oluşumuna büyük ölçüde etki ettiğini göstermektedir.

ATP fosil oluşumuna en fazla neden olan yaşam döngüsü basamağı, ham madde eldesinden kaynaklanmıştır (Grafik 4.2). Bu oluşumun %54,6'sı ham petrol kullanımından kaynaklanmaktadır. Ham petrol kullanımının etkisinin %92,4'ü ise PP ham maddesinden gelmektedir. Bu veriler, fosil yakıtların kullanımının ATP oluşumundaki önemli bir etken olduğunu ve özellikle ham petrolün, bu sürecin büyük bir kısmını oluşturduğunu ve bunun da çoğunlukla PP ham maddesinden kaynaklandığını göstermektedir.

AP değerlendirildiğinde bu etkinin büyük oranda N<sub>2</sub>O (%45) ve SO<sub>2</sub> (%10) emisyonları sebebiyle oluştuğu görülmüştür. Ham madde eldesindeki yüksek oranın sebebi fosil kaynaklı olan PP ham maddesidir. Ham madde eldesinden sonra gelen yaşam döngüsü basamağı ise APK malzemesi üretim basamağıdır. Grafik 4.3'te gösterildiği üzere ekstrüzyon işleminden yüksek bir oran gelmektedir. Bunun sebebi ise enerji yoğun bir proses olmasıdır.

ÖP etki kategorisine %69,2'si suya olan fosfat (P) emisyonu ve %6,41'i ise havaya olan N<sub>2</sub>O emisyonlarından gelmektedir. Üretim aşamasındaki fazla etkinin sebebi ise yüksek enerji kullanımı nedeniyle ekstrüder aşamasıdır. Genel olarak APK'ler ekstrüzyon prosesi ile üretilmektedir ve üretim süreci enerji yoğun bir süreçtir. Sistemimizde kullanılan 2022 yılında Türkiye'de üretilen elektriğin %34,6'sı kömürden, %22,9'u doğal gazdan, %20,3'ü hidrolik enerjiden, %10,6'sı rüzgardan, %5,1'i güneşten, %3,4'ü jeotermal enerjiden ve %3'ü diğer kaynaklardan elde edilmiştir (TEIAS, 2023).

FOOP etki kategorisine SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, ve NH<sub>4</sub> emisyonları fotokimyasal ozon oluşumuna sebep olmaktadır. FOOP etki kategorisine Fotokimyasal duman oluşumuna en büyük etken ise hammadde eldesi (%64,82) aşamasıdır. Ham madde eldesinden gelen yüksek etkinin sebebi fosil kaynaklı olan PP ham maddesidir.

Havaya olan hidrojen florür ve ağır metal emisyonları ile suya olan selenyum, talyum ve vanadyum emisyonları İTP etkisini oluşturmaktadır. Grafik 4.2'de gösterildiği üzere en fazla

ham madde eldesinden (%57,02) kaynaklanmaktadır Bu çevresel etkinin yüksek olmasının sebebi fosil kaynaklı olan PP ham maddesidir.

TSEP etki kategorisine özellikle üretim basamağından kaynaklanan nikel (%30), berilyum (%19), vanadyum (%15), kobalt (%10) ve bakır (%20) emisyonları sebep olmaktadır. Üretim aşamasındaki fazla etkinin sebebi ise yüksek enerji kullanımı nedeniyle ekstrüder aşamasıdır.

DEP etki kategorisine %44'ü suya olan Be emisyonundan gelmektedir. DEP etki kategorisine göre en fazla etki APK malzemesi üretim basamağından (%62,14) kaynaklanmaktadır. Üretim aşamasındaki fazla etkinin sebebi ise yüksek enerji kullanımı nedeniyle ekstrüder aşamasıdır.

OTİP etkisine ise %60 halon 1301, %8 halon 1211 ve %22 karbon tetraklorür emisyonları sebep olmaktadır. Bu emisyonların başlıca kaynağı ham madde eldesi basamağıdır. Ham madde eldesinden sonra ise ithal edilen PP'nin ulaşım basamağıdır.

KEP etki kategorisi krom (%51), cıva (%12), arsenik (%7) emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Etki kategorisine göre en fazla etki PP ham madde eldesinden gelmektedir.

### **5.2.2. APK Malzeme Üretiminin Çevresel Etkilerinin Azaltılması**

Çalışmamızın bu kısımda ise, bölümün 4.2.'de sunulan çevresel etki azaltım senaryolarından elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde tartışılmıştır. En fazla etkinin geldiği basamaklar belirlenerek ve firmanın gelecek ile ilgili planları doğrultusunda senaryolar gerçekleştirilmiştir. Belirlenen senaryoların çevresel etkileri incelenerek, çalışmanın temel hedefleri doğrultusunda yapılan analizler detaylı bir şekilde sunulacaktır.

APK malzemesi üretiminde, genellikle yüksek oranlarda görülen çevresel etkilerin büyük bir kısmı ham madde eldesinden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple, granül halde satın alınan fosil kaynaklı PP yerine geri dönüştürülmüş PP kullanımının, özellikle YDED detaylı bir şekilde incelenmiştir. Grafik 4.4'te gözlemlendiği üzere geri dönüştürülmüş PP kullanımı tüm çevresel etki kategorilerinde azaltım sağlamıştır. En çok azaltım gösteren kategori ise KEP olmuştur. APK malzemesinin KIP değeri perspektifinde değerlendirildiğinde ise %76 oranında azaltım meydana getirmiştir. Bu bağlamda, geri dönüştürülmüş PP gibi alternatif malzemelerin tercih edilmesi, hem ham madde eldesi aşamasındaki çevresel etkileri azaltma potansiyeli taşımakta, hem de sürdürülebilir üretim uygulamalarına önemli bir katkı sağlamaktadır. Geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı, doğal kaynakların korunması, enerji tasarrufu ve sera

gazı emisyonlarının azaltılması gibi sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada etkili bir strateji olmaktadır.

APK malzemesi üretim sürecinde gerçekleştirilen alternatif ham madde senaryolarında, otomotiv sektöründe yaygın olarak tercih edilen HDPE, PS, PVC, PLA, PC, PET gibi 7 farklı polimer malzemenin performansı değerlendirilmiştir. Bu polimerler, malzeme özellikleri ve endüstri uygulamalarındaki avantajları nedeniyle sektörde önemli bir rol oynamaktadır. HDPE'nin mükemmel dayanıklılığı, PS'nin hafifliği, PVC'nin çok yönlülüğü, PLA'nın biyoyuumluluğu, PC'nin yüksek darbe dayanımı ve PET'in geri dönüştürülebilirliği gibi özellikler, alternatif senaryoların belirlenmesinde dikkate alınan önemli faktörlerdir. Bu senaryolar, çevresel sürdürülebilirlik ve performans kriterlerini göz önüne alarak, APK malzemesi üretiminde kullanılan polimer malzemelerin daha sürdürülebilir ve çevre dostu seçeneklerini belirlemeyi hedeflemektedir. Grafik 4.5'te gözlemlendiği üzere, APK malzemesi üretiminde alternatif ham madde olarak PET kullanımının, yüksek çevresel etkilere yol açmıştır. Bu sonuçların temel nedeni ise, genellikle PET'in üretim sürecinde kullanılan enerji miktarının ve ham madde eldesinin çevresel etkilerinin yüksek olmasıdır. KIP, AP, KIP, KEP dışında en düşük çevresel etkiyi sağlayan malzeme ise PLA biyopolimer olmuştur. APK malzemesi üretiminde alternatif olarak kullanılan malzemelerden biri olan PLA biyopolimer, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyobozunur bir polimerdir. Bu özellik, PLA'nın çevre dostu bir malzeme olmasını sağlamaktadır. PLA, genellikle mısır nişastası veya şeker pancarı gibi bitkisel kaynaklardan üretilir ve biyolojik olarak parçalanabilir, dolayısıyla çevreye daha az zarar vermektedir. Ayrıca, PLA'nın fosil kaynaklı polimerlere kıyasla daha düşük karbon ayak izine sahip olması, sürdürülebilirlik açısından avantajlı olmaktadır. Bu özellikleri, PLA'nın çeşitli endüstrilerde ve özellikle APK malzemesi üretiminde çevre dostu bir alternatif olarak tercih edilmesini teşvik etmektedir. KIP değerleri perspektifinde bakıldığında ise, ana modelimizde tercih edilen PP ham maddesi en düşük çevresel etkiyi sunan seçenek olmuştur.

Çalışmamızın sonuçlarına göre, çevresel etki değerlerinin bir kısmı ham madde ulaşımından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple, PP ham maddesinin ulaşımından kaynaklanan çevresel etkiyi düşürmek amacıyla alternatifler değerlendirilmiştir. PP ham maddesinin satın alındığı ve ulaşımının sağlandığı Fransa-Belçika yerine Türkiye-Kocaeli'deki PETKİM firmasından gerçekleştirilmesi üzerine bir iyileştirme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu değişiklik, ulaşım mesafesinin kısaltılması yoluyla daha düşük çevresel etkiler elde edilmesini sağlamıştır. Fosil yakıtların kullanımının çevresel etkiler üzerindeki önemini göz önüne alarak, ulaşımın değiştirilmesi, fosil yakıtların neden olduğu çevresel etkileri azaltma amacını

taşımaktadır. Grafik 4.6'da bulunan sonuçlara göre, PP'nin PETKİM firmasından satın alınma işleminin tüm çevresel etki değerlerinde azaltım sağladığı gözlemlenmiştir, en yüksek azaltım ise %28 oranında, OTİP çevresel etki kategorisinde gerçekleşmiştir.

Yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi sonuçlarına göre, APK malzemesi üretiminin çevresel etkilerinin büyük bir kısmı üretim aşamasından kaynaklanmaktadır. Özellikle, yüksek enerji kullanımının neden olduğu çevresel etkileri azaltma amacıyla, rüzgar, güneş ve atık enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması üzerine bir çevresel etki azaltım senaryosu uygulanmıştır. Bu enerji türleri, Türkiye'nin enerji politikaları gereğince ve firmanın gelecek ile ilgili enerji yatırımlarına göre seçilmiştir. Grafik 4.7'de görüldüğü üzere, güneş enerjisinin kullanılması ATP elementi dışındaki tüm çevresel etki kategorilerinde ana modele göre daha düşük bir etki yaratmıştır. ATP element etki kategorisinin %70 oranında yüksek çıkmasının sebebi ise güneş paneli üretimi, enerji yoğunluğu yüksek malzemelerin çıkarılması ve işlenmesini içeren karmaşık bir süreçtir. Yüksek sıcaklıklar, özel ekipmanlar ve kimyasal maddeler kullanılarak paneller üretilir. Bu aşamalarda kullanılan enerji ve kaynaklar, çevresel etkiyi artırabilmektedir. Lojistik süreçleri de dikkate alındığında, güneş paneli imalatının genel çevresel etkisi yüksek çıkabilmektedir. Rüzgar ve atık enerjinin kullanılması ise tüm çevresel etki kategorilerinde daha düşük değerler sergilemiştir. Örneğin, KIP değerleri üzerinden yapılan karşılaştırmada, ana modele göre güneş enerjisi %26, rüzgar enerjisi %25 ve atık enerjisi ise %29 azaltım sağlamıştır. Bu sonuçlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının APK malzeme üretimi üzerinde olumlu bir etki yaratabileceğini vurgulamaktadır. Örneğin, atık enerjinin kullanılması, hem enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına hem de çevresel etki kategorilerinde düşük bir değer sergilemeye katkıda bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji seçenekleri, fosil yakıtlara kıyasla daha sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak öne çıkmakta ve bu, APK malzemesi üretiminin çevresel sürdürülebilirlik performansını artırmaktadır.

### 5.3. Öneriler

Çalışmanın elde ettiği bulgular ışığında, çevresel sürdürülebilirlik odaklı önerilerin sunulduğu bu bölümde, APK malzemesi üretimi sürecinde daha etkili ve sürdürülebilir bir yaklaşımın benimsenmesine yönelik stratejiler öne çıkmaktadır. Çeşitli çevresel etkileşimleri minimize etmeyi amaçlayan bu öneriler hem endüstriyel hem de çevresel perspektiflerden değerlendirilen çözüm yollarını içermektedir. Bu öneriler hazırlanırken firmadaki uygulamalardan, akademik çalışmalardan ve Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) tarafından hazırlanan Mevcut En İyi Tekniklere İlişkin Referans Belgeleri gibi raporlardan faydalanılmıştır.

Aşağıda, çevresel sürdürülebilirlik alanında yapılacak gelişmeleri desteklemek amacıyla sunulan öneriler detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

*Yenilenebilir Enerji Kullanımının Teşvik Edilmesi:* Çalışmada elde edilen veriler, yenilenebilir enerji kaynaklarının APK malzemesi üretiminde çevresel etkileri azaltmada etkili olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, şirketlerin ve sektörün yenilenebilir enerji kullanımını teşvik etmeleri için politika ve uygulamalar geliştirilmesi önerilebilir.

*Geri Dönüştürülmüş Malzemelerin Daha Fazla Kullanımı:* Çalışmamızda çevresel sürdürülebilirlik açısından olumlu etkiler sağlayan geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı teşvik edilebilir. Bu, hem ham madde eldesindeki çevresel etkileri azaltabilir hem de atık yönetimi açısından daha sürdürülebilir bir yaklaşım sunabilir.

*Alternatif Ham Madde Seçeneklerinin Değerlendirilmesi:* Çalışmada incelenen alternatif ham maddelerin çevresel etkileri karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda, endüstriyel uygulamalarda kullanılan diğer alternatif malzemelerin de benzer bir çevresel değerlendirmeye tabi tutularak karşılaştırılması ve uygun olanların seçilmesi önerilebilir. Ayrıca veri tabanındaki eksiklikler sebebiyle biyomalzeme PLA tercih edilmiştir. Ancak veri eksiklikleri tamamlanıp, modelleme gerçekleştirilip sonrasında ise ham madde olarak kullanılması tavsiye edilmektedir.

*Reçete Çeşitliliği, Optimizasyon ve Ekonomik Malzeme Seçimi:* Malzeme bileşenlerinin dengeli bir şekilde kullanılması, örneğin ahşap ve plastik oranlarının optimize edilmesi, daha sürdürülebilir bir karışım elde etmeyi sağlayabilir. Ayrıca, üretim süreçlerinin ve malzeme kombinasyonlarının optimize edilmesi, enerji verimliliğini artırarak atık miktarını azaltabilir ve çevresel etkileri minimize edebilir. Ekonomik açıdan daha uygun

ve çevre dostu malzemelerin kullanılması da maliyetleri düşürebilir ve çevresel etkileri azaltabilir. Bu stratejilerin bir araya gelmesi, APK malzemesi üretiminin çevresel sürdürülebilirliğini artırabilir ve sektörde daha çevreci bir yaklaşım benimseme konusunda önemli adımlar atılmasına katkı sağlayabilir.

*Kullanılan Amaca Göre Malzeme Kalınlığının Değiştirilmesi:* Malzeme kalınlığının azaltılması, doğal kaynak tüketimini ve enerji kullanımını azaltarak sürdürülebilir bir ürün yaşam döngüsüne katkıda bulunabilir. Bu strateji, daha hafif yapılar elde edilerek ulaşım maliyetlerinde azalmaya da olanak tanımaktadır. Ancak, malzemenin işlevselliğini, dayanıklılığını ve güvenliği korumak, tasarım standartlarına uymak ve ürünün ömrü ile geri dönüşüm potansiyelini dikkate almak önemlidir. Bu dengeleme, çevresel etkilerin azaltılması ve ürün performansının korunması adına kritik bir adım olmaktadır.

*Kapalı Döngü ve Endüstriyel Simbiyoz Sağlanması:* Kapalı döngü ve endüstriyel simbiyoz, atıkların geri dönüşümü ve endüstriler arasında işbirliği ile çevresel etkilerin azaltılmasını sağlamaktadır. Kapalı döngü, atıkların toplanması ve geri dönüşüm süreçlerine yönlendirilmesiyle doğal kaynak tüketimini azaltmaktadır. Endüstriyel simbiyoz ise, işletmeler arasında atık ve hammadde paylaşımını teşvik ederek kaynakların daha verimli kullanılmasını hedeflemektedir. Bu stratejiler, sürdürülebilirlik amacıyla ekonomik ve çevresel avantajlar sunabilir.

*Bölgesel Atıkların Kullanımıyla Dolgu Maddeleri Eklenmesi:* Üretim sürecinde dolgu maddeleri eklenmesi için yerel ve ekonomik atıklardan yararlanılabilir. Bu strateji, hem maliyetleri düşürme potansiyeli sunup, hem de çevresel etkileri azaltabilir. Ucuz ve bölgesel atıkların kullanılması, sürdürülebilir malzeme tedarikini teşvik ederken aynı zamanda atıkların ekonomiye katılmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, yerel ekonomiyi desteklerken çevresel sürdürülebilirliği artırabilir.

*Kullanım Ömür Değerlendirilmesi:* Kullanım ömür değerlendirmesi, çevresel etkilerin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu değerlendirme, ürünlerin daha uzun süre dayanıklı ve performanslı kalmasını sağlayarak kaynakların daha verimli kullanılmasına katkıda bulunmaktadır. Uzun kullanım ömrü, yeniden üretim ihtiyacını azaltabilir ve atıkları minimize edebilir. Bu strateji, sürdürülebilir tüketim alışkanlıklarını teşvik ederek, çevresel etkilerin düşürülmesine yardımcı olabilir.

APK'lerin sürdürülebilirlik açısından eksiksiz bir değerlendirmesini yapabilmek için çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlar her aşamada ele alınması gerekmektedir. Çoğu zaman çevresel sürdürülebilirlik analizlerinde çevresel etki kategorileri incelenirken, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik analizine yeterince vurgu yapılmamıştır, ki bu da dikkat çekici bir eksikliklerdir. Bu, gelecekteki çalışmalarda daha kapsamlı bir yaklaşımın benimsenmesi gerektiğini göstermektedir. Çevresel etkilerin değerlendirilmesinde olduğu gibi, sosyal ve ekonomik faktörlerin de sürdürülebilir malzeme seçimi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu anlamak, daha dengeli ve kapsamlı bir değerlendirme yapmamıza olanak tanıyacaktır. Sonuç olarak APK'lerin sürdürülebilirlik performansını tam olarak anlayabilmek ve geliştirebilmek için, gelecekteki çalışmalarda güncel veriler ile çok boyutlu bir yaklaşım yapılması gerekmektedir.

## KAYNAKÇA

**AİMSAD Dergisi.** (2023). *Ahşap Kompozit Kriz Dinlemiyor, Türkiye'deki Büyümesini Sürdürüyor.* [Erişim: 21.11.2023, <https://www.aimsad.org/istatistikler/ahsap-kompozit-kriz-dinlemiyor-turkiye-deki-buyumesini-surduruyor> ]

**Andrady, A. L., & Neal, M. A.** (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 364(1526), 1977-1984. doi:10.1098/rstb.2008.0304

**Arun Kumar DT, Kaushik V Prasad, & PS., R. R.** (2016). Tensile and Impact properties of jute/glass and jute/carbon fiber reinforced polypropylene. *Journal of Polymer & Composites*, 4(3), 35-39.

**Ashori, A.** (2008). Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries! *Bioresource technology*, 99(11), 4661-4667.

**Asif, M.** (2009). 2 - Sustainability of timber, wood and bamboo in construction. In J. M. Khatib (Ed.), *Sustainability of Construction Materials* (pp. 31-54): Woodhead Publishing.

**Atilgan Türkmen, B.** (2020). Cam Ambalaj Üretimini Çevresel Sürdürülebilirliğinin Değerlendirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7. doi:10.35193/bseufbd.734599

**Azapagic, A.** (1999). Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical Engineering Journal*, 73(1), 1-21. doi:https://doi.org/10.1016/S1385-8947(99)00042-X

**Azapagic, A.** (2010). Assessing Environmental Sustainability: Life Cycle Thinking and Life Cycle Assessment. In *Sustainable Development in Practice* (pp. 56-80).

**Azapagic, A., Gomez Baggethun, E., Murlis, J., White, P., Thornes, J., Azapagic, A., . . . Norris, K.** (2010a). Life Cycle Assessment as a Tool for Sustainable Management of Ecosystem Services. In R. M. Harrison, R. E. Hester, R. Harrison, & R. Hester (Eds.), *Ecosystem Services* (Vol. 30, pp. 0): The Royal Society of Chemistry.

**Azapagic, A., Gomez Baggethun, E., Murlis, J., White, P., Thornes, J., Azapagic, A., . . . Norris, K.** (2010b). Life Cycle Assessment as a Tool for Sustainable Management of Ecosystem Services. In R. M. Harrison, R. E. Hester, R. Harrison, & R. Hester (Eds.), *Ecosystem Services* (Vol. 30, pp. 140): The Royal Society of Chemistry.

**Azapagic, A., & Perdan, S.** (2000). Indicators of Sustainable Development for Industry: A General Framework. *Process Safety and Environmental Protection*, 78(4), 243-261. doi:<https://doi.org/10.1205/095758200530763>

**Bala, E.** (2018). *Ahşap plastik kompozit malzemelerden üretilen bazı birleştirme elemanlarının mekanik performans özellikleri*. (Yüksek Lisans), Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi/Teknoloji Fakültesi, Türkiye.

**Baumann, H., & Tillman, A.-M.** (2004). Introduction to LCA. In *The Hitch Hiker's Guide to LCA : An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application* (pp. 19-69). Lund: Studentlitteratur.

**Beigbeder, J., Socalingame, L., Perrin, D., Bénézet, J.-C., & Bergeret, A.** (2019). How to manage biocomposites wastes end of life? A life cycle assessment approach (LCA) *focused on polypropylene (PP)/wood flour and polylactic acid (PLA)/flax fibres biocomposites*. *Waste Management*, 83, 184-193. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.012>

**Bergman, R., Oneil, E., Han, H.-S., & Eastin, I.** (2013). *Comparative life-cycle assessment of California redwood decking*.

**Beşergil, B.** (2016). *Kompozitler, Temel İlkeler – Test Metotları*. Ankara: Gazi Kitabevi.

**Biçergil, G.** (2020). *PVC Profil Sistemlerinin Yaşam Döngüsü Çevresel Sürdürülebilirliği*. (Yüksek Lisans), Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/14658011.2023.2190293>

**Bledzki, A. K., Franciszczak, P., Osman, Z., & Elbadawi, M.** (2015). Polypropylene biocomposites reinforced with softwood, abaca, jute, and kenaf fibers. *Industrial Crops and Products*, 70, 91-99. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.013>

**Bolin, C. A., & Smith, S.** (2011). Life cycle assessment of alkaline copper quaternary-treated lumber with comparison to wood plastic composite decking. *Journal of Cleaner Production*, 19(6), 620-629. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.004>

**Bruijn, H., van Duin, R., & Huijbregts, M.** (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment* (Vol. 7).

**Chen, J., Wang, Y., Gu, C., Liu, J., Liu, Y., Li, M., & Lu, Y.** (2013). Enhancement of the Mechanical Properties of Basalt Fiber-Wood-Plastic Composites via Maleic Anhydride Grafted High-Density Polyethylene (MAPE) Addition. 6(6), 2483-2496.

**Circular Ecology.** (2023). *Environmental Impacts*. [Erişim: 20.12.2023, <https://circularecology.com/environmental-impacts.html>]

**Clyne, T. W., & Hull, D.** (2019). *An introduction to composite materials*: Cambridge university press.

**Collard, F.-X., & Blin, J.** (2014). A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 594-608. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.013>

**Cuellar Franca, R.** (2013). *Sustainability assessment framework for the residential construction sector in the UK*. (PhD), The University of Manchester, UK.

**Çelik, M., & Kılıç, E.** (2020). Bitkisel Kaynaklı Biyopolietilenin Biyokompozit Üretiminde ve Polimer Karışımlarında Kullanımı. [Usage of Plant- Based Biopolyethylene in Biocomposite Production and Polymer Blends]. *Tekstil ve Mühendis*, 27(119), 197-215.

**Dai, D., & Fan, M.** (2014). 1 - Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites: structure, properties, processing and applications. In A. Hodzic & R. Shanks (Eds.), *Natural Fibre Composites* (pp. 3-65): Woodhead Publishing.

**Davis, D. C., Wilkerson, J. W., Zhu, J., & Ayewah, D. O. O.** (2010). Improvements in mechanical properties of a carbon fiber epoxy composite using nanotube science and technology. *Composite Structures*, 92(11), 2653-2662. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.03.019>

**de Araujo, M.** (2011). Natural and man-made fibres: Physical and mechanical properties. *Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications*, 3-28. doi:10.1016/B978-1-84569-558-3.50001-6

**Demirer, G. N.** (2011). *Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim Yayınları - I, Yaşam Döngüsü Analizi, Pratik Yaşam Döngüsü Analizi Klavuzu AB Sürecinde İşletmeler ve Kamu için Yaşam Döngüsü Analizi Yöntem ve Örnekleri*, ed. Y. Çağlayan.

**Dixit, S., Goel, R., Dubey, A., Shivhare, P. R., & Bhalavi, T.** (2017). Natural Fibre Reinforced Polymer Composite Materials - A Review. 8(2), 71-78. doi:10.1177/204124791700800203

- Doan Tran, H., Kim, C., Chen, L., Chandrasekaran, A., Batra, R., Venkatram, S., . . . Ramprasad, R.** (2020). Machine-learning predictions of polymer properties with Polymer Genome. *Journal of Applied Physics*, 128(17). doi:10.1063/5.0023759
- Ecoinvent.** (2023). Ecoinvent Database v.3.9.1. from Swiss Centre for Life Cycle Inventories: St Gallen, Switzerland
- EPA.** (2006). Life-cycle assessment: principles and practice, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-06/060. In.
- EPD International AB.** (2023). *Environmental Product Declaration: Wood Plastic Composite from Anhui Hongshanlin New Material Technology Co., Ltd.* Retrieved from
- Feifel, S., Stübs, O., Seibert, K., Hartl, J. J. E. j. o. w., & products, w.** (2015). Comparing wood polymer composites with solid wood: the case of sustainability of terrace flooring. 73(6), 829-836. doi:10.1007/s00107-015-0953-6
- Fortune Business Insights.** (2020). Wood Plastic Composite Market Size, Share & Industry Analysis, By Material (Polyethylene, Polypropylene, Polyvinyl Chloride and Others), By Application (Decking, Automotive, Sliding & fencing, Technical Application, Furniture, Consumer Goods and Others), and Regional Forecast, 2020-2027.
- Goldhahn, C., Cabane, E., & Chanana, M.** (2021). Sustainability in wood materials science: An opinion about current material development techniques and the end of lifetime perspectives. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 379, 20200339. doi:10.1098/rsta.2020.0339
- Gubana, A., & Melotto, M.** (2018). Experimental tests on wood-based in-plane strengthening solutions for the seismic retrofit of traditional timber floors. *Construction and Building Materials*, 191, 290-299. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.177>
- Guinée, J. B.** (2002). *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards (Vol. 7)*: Springer Science & Business Media.
- Guinée, J. B., Gorree, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Udo de Haes, . . . Wrisberg, M. N.** (2002). Life cycle assessment. An operational guide to ISO standards, (Vol 1–3). Centre of Environmental Science Leiden University Ed, The Netherlands.
- Güneşkaya, O.** (2017). *Meyan kökü lifi takviyeli termoplastik esash kompozit malzemelerin ısı geçirgenlik ve ses yutum özelliklerinin incelenmesi.* (Yüksek Lisans), Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.

- Hale, D. K.** (1976). The physical properties of composite materials. *Journal of Materials Science*, 11(11), 2105-2141. doi:10.1007/BF02403361
- Harris, J. M.** (2003). Sustainability and sustainable development. *International Society for Ecological Economics*, 1(1), 1-12.
- Hauschild, M., Jeswiet, J., & Alting, L.** (2005). From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54, 1-21. doi:10.1016/S0007-8506(07)60017-1
- Haylock, R., & Rosentrater, K. A.** (2018). Cradle-to-Grave Life Cycle Assessment and Techno-Economic Analysis of Polylactic Acid Composites with Traditional and Bio-Based Fillers. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(4), 1484-1503. doi:10.1007/s10924-017-1041-2
- Hill, C., Norton, A., & Kutnar, A.** (2015). 12 - Environmental impacts of wood composites and legislative obligations. In M. P. Ansell (Ed.), *Wood Composites* (pp. 311-333): Woodhead Publishing.
- Hon, D. N. S., & Shiraishi, N.** (2000). *Wood and Cellulosic Chemistry, Revised, and Expanded* (2nd ed.). CRC Press.
- Hossain, M. U., & Poon, C. S.** (2018). Comparative LCA of wood waste management strategies generated from building construction activities. *Journal of Cleaner Production*, 177, 387-397. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.233
- Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall, J. R., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M., . . . WIECZOREK, C. J.** (2015). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*: Springer New York.
- IPCC.** (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Retrieved from Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA:
- ISO.** (2006a). *ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. In. Geneva, Switzerland.
- ISO.** (2006b). *ISO 14044: Environmental Management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. In. Geneva, Switzerland.

- Jacob, A.** (2006). WPC industry focuses on performance and cost. *Reinforced Plastics*, 50(5), 32-33. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(06\)71010-4](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(06)71010-4)
- Jones, R. M.** (1999). *Mechanics Of Composite Materials (2nd ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781498711067>.
- Karakuş, K.** (2008). *Üniversitemizdeki polietilen ve polipropilen atıkların polimer kompozit üretiminde değerlendirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş.
- Kaymakci, A.** (2015). *Çeşitli güçlendirici dolgularla üretilen ahşap plastik nanokompozitlerin karakterizasyonu* (Doktora), İstanbul Üniversitesi Türkiye.
- Kazemi Najafi, S.** (2013). Use of recycled plastics in wood plastic composites - a review. *Waste Manag*, 33(9), 1898-1905. doi:10.1016/j.wasman.2013.05.017
- Khan, M. M. H., Deviatkin, I., Havukainen, J., & Horttanainen, M.** (2021). Environmental impacts of wooden, plastic, and wood-polymer composite pallet: a life cycle assessment approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(8), 1607-1622. doi:10.1007/s11367-021-01953-7
- Khatib, J.** (2016). *Sustainability of Construction Materials (2nd ed.)*. Elsevier Science. Retrieved from <https://www.perlego.com/book/1829911/sustainability-of-construction-materials-pdf> (Original work published 2016).
- Kim, J., & Pal, K.** (2011). *Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites*: Springer Berlin, Heidelberg.
- Kristak, L., Kubovský, I., & Réh, R.** (2021). New Challenges in Wood and Wood-Based Materials. 13(15), 2538.
- Kumar, V., Tyagi, L., & Sinha, S.** (2011). Wood flour–reinforced plastic composites: a review. 27(5-6), 253-264. doi:10.1515/REVCE.2011.006
- Kumlutaş, D., Tavman, İ. H., & Turhan Çoban, M.** (2003). Thermal conductivity of particle filled polyethylene composite materials. *Composites Science and Technology*, 63(1), 113-117. doi:[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00194-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00194-X)
- La Rosa, A. D., Recca, G., Summerscales, J., Latteri, A., Cozzo, G., & Cicala, G.** (2014). Bio-based versus traditional polymer composites. A life cycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*, 74, 135-144. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.017>

- Liikanen, M., Grönman, K., Deviatkin, I., Havukainen, J., Hyvärinen, M., Kärki, T., . . . Horttanainen, M.** (2019). Construction and demolition waste as a raw material for wood polymer composites – Assessment of environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 225, 716-727. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.348>
- Mammadov, A., & Cılız, N.** (2017). Yaşam Döngüsü Analizi: Tanımı, Amacı, Sürdürülebilirlik Kavramları ile İlişkisi ve Sanayideki Yeri. *TC Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı “Kalkınmada Anahtar Verimlilik” Dergisi*, Eylül.
- Markets and Markets.** (2024). *Automotive Composites Market*. [Erişim: 09.01.2024, <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/automotive-composite.asp#:~:text=The%20report%20%22Automotive%20Composites%20Market,USD%2014.3%20billion%20by%202028%2C> ]
- Martins, G., Antunes, F., Mateus, A., & Malça, C.** (2017). Optimization of a wood plastic composite for architectural applications. *Procedia Manufacturing*, 12, 203-220.
- Mason, H.** (2023). *Natural fiber composites: Growing to fit sustainability needs*. [Erişim: 10.11.2023, <https://www.compositesworld.com/articles/natural-fiber-composites-growing-to-fit-sustainability-needs>]
- McKendry, P.** (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource technology*, 83(1), 37-46. doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- Najafi, S. K.** (2013). Use of recycled plastics in wood plastic composites—A review. *Waste management*, 33(9), 1898-1905.
- Nordelöf, A., Messagie, M., Tillman, A.-M., Ljunggren Söderman, M., & Van Mierlo, J.** (2014). Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(11), 1866-1890. doi:10.1007/s11367-014-0788-0
- Operato, L., Vitiello, L., Aprea, P., Ambrogi, V., Salzano de Luna, M., & Filippone, G.** (2023). Life cycle assessment of poly(lactic acid)-based green composites filled with pine needles or kenaf fibers. *Journal of Cleaner Production*, 387, 135901. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135901>
- PAGEV.** (2023). *Türkiye Plastik Sektör İzleme Raporu 2020*. [Erişim: 09.10.2023, <https://pagev.org/turkiye-plastik-sektor-izleme-raporu-2020-601b95c394d04>]

- Pokhrel, G., Gu, H., Gardner, D. J., & O'Neill, S.** (2021). Life Cycle Assessment (LCA) of Wood Flour and Pellets for Manufacturing Wood-Plastic Composites. *Recent Progress in Materials*, 4(1), 1-1. doi:10.21926/rpm.2201003
- Potters, G., van Goethem, D., & Schutte, F.** (2010). Promising biofuel resources: lignocellulose and algae. *Nature education*, 3(9), 14.
- Pritchard, G.** (2004). Two technologies merge: wood plastic composites. *Plastics, Additives and Compounding*, 6(4), 18-21. doi: [https://doi.org/10.1016/S1464-391X\(04\)00234-X](https://doi.org/10.1016/S1464-391X(04)00234-X)
- Qiang, T., Chou, Y., & Gao, H.** (2019). Environmental Impacts of Styrene-Butadiene-Styrene Toughened Wood Fiber/Poly lactide Composites: A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment. *Journal of Cleaner Production*, 16(18), 3402.
- Qiang, T., Yu, D., Zhang, A., Gao, H., Li, Z., Liu, Z., . . . Han, Z.** (2014). Life cycle assessment on polylactide-based wood plastic composites toughened with polyhydroxyalkanoates. *Journal of Cleaner Production*, 66, 139-145. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.074>
- Rajendran, S.** (2020). *Applications of Recycled Plastics and Life Cycle Assessment*. (PhD), University of Sheffield, UK.
- Rebiter, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., . . . Pennington, D. W.** (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701-720. doi:10.1016/j.envint.2003.11.005
- Rowell, R. M.** (2006). Advances and challenges of wood polymer composites. Proceedings of the 8th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium, Advances and Challenges in Biocomposites : 20-23 November 2006, Kuala Lumpur, Malaysia. Kepong, Malaysia : Forest Research Institute Malaysia,. 2-11.
- Roy, P., Defersha, F., Rodriguez, A., Misra, M., & Mohanty, A.** (2020). Evaluation of the life cycle of an automotive component produced from biocomposite.
- Saçak, M.** (2012). *Polimer Teknolojisi*. Ankara: Gazi Kitabevi.
- Sahmaran, M., Li, V., & Andrade, C.** (2008). Corrosion resistance performance of steel-reinforced engineered cementitious composite beams. *ACI Materials Journal*, 105, 243-250.

- Sahoo, K., Bergman, R., Alanya Rosenbaum, S., Gu, H., & Liang, S.** (2019). Life Cycle Assessment of Forest-Based Products: A Review. *Sustainability*, 11, 4722. doi:10.3390/su11174722
- Schwarzkopf, M. J., & Burnard, M. D.** (2016). Wood-Plastic Composites—Performance and Environmental Impacts. In A. Kutnar & S. S. Muthu (Eds.), *Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts* (pp. 19-43). Singapore: Springer Singapore.
- Seile, A., Spurina, E., & Sinka, M.** (2022). Reducing Global Warming Potential Impact of Bio-Based Composites Based of LCA. 10(9), 79.
- Sommerhuber, P. F., Wenker, J. L., Rüter, S., & Krause, A.** (2017). Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying an environmental sound end-of-life option. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 235-248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.012>
- Sørensen, B.** (2011). From life cycle analysis to life cycle assessment. In *Life-Cycle Analysis of Energy Systems: From Methodology to Applications* (pp. 67-78): The Royal Society of Chemistry.
- Sphera.** (2023). GaBi V10.7 software and database.
- Stripple, H.** (2001). Life cycle assessment of road. A pilot study for inventory analysis. In: IVL Svenska Miljöinstitutet.
- Sun, J., Jiang, Z., Liang, Y., & Liu, J.** (2018). Research status and prospects of bamboo-wood composite container flooring. *World Forestry Research*, 31(6), 36-41.
- Süinanç, Ö.** (2007). *Odun Plastik Kompozitlerinin Üretimi, Özellikleri ve Kullanım Yerleri Üzerine Araştırmalar, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.* (Yüksek Lisans), Türkiye.
- Şahin, Y.** (2006). *Kompozit Malzemelere Giriş.* Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Taufiq, M. J., Mansor, M. R., & Mustafa, Z.** (2018). Characterisation of wood plastic composite manufactured from kenaf fibre reinforced recycled-unused plastic blend. *Composite Structures*, 189, 510-515. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.090>
- TEIAS.** (2023). *Electricity Generation and Transmission Statistics of Turkey.* [Erişim: 12.12.2023, <http://www.teias.gov.tr/TurkiyeElektrikIstatistikleri.aspx>]

**Thamae, T., & Baillie, C.** (2008). 13 - Life-cycle assessment (LCA) of wood–polymer composites: a case study. In K. O. Niska & M. Sain (Eds.), *Wood–Polymer Composites* (pp. 273-299): Woodhead Publishing.

**Tufan, M. Z., & Özel, C.** (2018). Sürdürülebilirlik Kavramı Ve Yapı Malzemeleri İçin Sürdürülebilirlik Kriterleri. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 2(1), 6-13.

**Turku, I., & Kärki, T.** (2014). Research progress in wood-plastic nanocomposites:A review. 27(2), 180-204. doi:10.1177/0892705713486131

**United Nations.** (1987). *The Brundtland Commission, Our Common Future, The Report of the World Commission on Environment and Development Oxford University Press, Oxford.* Retrieved from

**Väntsi, O., & Kärki, T.** (2015). Environmental assessment of recycled mineral wool and polypropylene utilized in wood polymer composites. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 38-48. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.009>

**Vidal, R., Martínez, P., & Garraín, D.** (2009). Life cycle assessment of composite materials made of recycled thermoplastics combined with rice husks and cotton linters. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14, 73-82. doi:10.1007/s11367-008-0043-7

**Xu, X., Jayaraman, K., Morin, C., & Pecqueux, N.** (2008). Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1), 168-177. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.087>

**Yılmaz, E.** (2018). *Çinko borat maddesinin odun plastik kompozitlerde antifungal etkisinin incelenmesi.* (Yüksek Lisans), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Türkiye.

**Yılmaz, E.** (2016). *Çinko borat maddesinin odun plastik kompozitlerde antifungal etkisinin incelenmesi.* (Yüksek Lisans), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Türkiye.

**Yılmaz, G.** (2020). *Termal işlem uygulanmış mısır saplarından üretilen odun plastik kompozitlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri* (Yüksek Lisans), Düzce Üniversitesi, Türkiye.

**Yuca, B., Kurt, Ş., Korkmaz, M., & Aysal, S.** (2014). Determination of the influence of some boric acid added adhesives on combustion properties of beech wood. [Borik Asit İlave Edilen Bazı Tutkalların Kayın Odununun Yanma Özelliklerine Etkisinin Belirlenmesi]. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 14(2), 182-190.

**Zhu, H., Qu, F., & Zhu, L. H.** (1993). Isolation of genomic DNAs from plants, fungi and bacteria using benzyl chloride. *Nucleic Acids Res*, 21(22), 5279-5280.  
doi:10.1093/nar/21.22.5279