KOMPOZİT YAKIT TANKLARI ÜRETİM VE KULLANIM SÜREÇLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Elif Gamze TAŞKIN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT YAKIT TANKLARI ÜRETİM VE KULLANIM SÜREÇLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Elif Gamze TAŞKIN
0000-0003-3777-6331

Prof. Dr. Gökhan Ekrem ÜSTÜN
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

KOMPOZİT YAKIT TANKLARI ÜRETİM VE KULLANIM SÜREÇLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Elif Gamze TAŞKIN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Gökhan Ekrem ÜSTÜN

Bu tez, filament sarım yöntemiyle üretilen karbon fiber sargılı ve termoplastik astara sahip kompozit yakıt tanklarının üretim süreçlerini ve kullanım aşamalarını, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) metodolojisi ile inceleyerek çevresel performanslarını değerlendirmektedir. Çalışma, doğalgaz depolama amacıyla geliştirilen 20 farklı prototip modelin çevresel etkilerini inceleyerek, en uygun modelin şehir içi otobüs senaryosunda kullanımını ele almıştır. Bulgular, kullanılan malzemeler ve üretim süreçlerinin çevresel etkilerini net bir şekilde ortaya koymuştur. Karbon fiber üretiminde yüksek enerji tüketimi ve fosil kaynakların, özellikle kömür ve ham petrolün kullanımı ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, kürleme ve astar üretim süreçlerinin de çevresel etkiler üzerinde önemli bir rolü olduğu belirlenmiştir. 12 litrelik tank prototipleri arasında en iyi sonuçları veren A11 modelinin 270 bar basınç dayanımına ve düşük çevresel etkilere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu modelin geliştirilmesi gerektiği belirlenmiştir. 63 litrelik B9 prototip modeli ise 535 bar basınca dayanarak ve küresel ısınma potansiyeli (GWP) 328,86 kg CO_2 eşdeğeri ile optimal performans sergileyen model olarak seçilmiş ve otobüs senaryosu için tercih edilmiştir. Şehir içi otobüs senaryosunda, GWP'nin %78,17'sinin otobüsün operasyonel emisyonlarından kaynaklandığı bulunmuştur. Otobüs parçalarının üretimi, GWP'ye %19,16 katkı sağlarken, kompozit tankların çevresel etkisi ise %2,42'dir. Çelik tanklar yerine kompozit yakıt tanklarının kullanımı, tank ağırlığında %66,8 ve araç ağırlığında %5,97 oranında düşüş ile yakıt tüketimi ve operasyonel emisyonlarda olumlu etkiler oluşturma potansiyeli taşır. Sonuç olarak, kompozit yakıt tankları, sundukları hafiflik ve düşük çevresel etkilerle sürdürülebilir ulaşım için etkili ve çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yaşam döngüsü değerlendirmesi, kompozit yakıt tankı, küresel ısınma potansiyeli, filament sarma, karbon fiber, sürdürülebilir ulaşım
2025, xvi+ 122 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THE PRODUCTION AND USAGE PROCESSES OF COMPOSITE FUEL TANKS

Elif Gamze TASKIN

Bursa Uludağ University
Institute of Science and Technology
Department of Environmental Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Gokhan Ekrem USTUN

This thesis examines the environmental performance of composite fuel tanks with carbon fiber winding and a thermoplastic liner, produced using the filament winding method, through the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The study evaluates the environmental impacts of 20 different prototype models developed for natural gas storage and discusses the most suitable model for use in an urban bus scenario. The findings clearly reveal the environmental impacts of the materials and manufacturing processes employed. High energy consumption in carbon fiber production and the use of fossil resources, particularly coal and crude oil, are prominent. Additionally, the curing and liner production processes were found to play a significant role in the environmental impacts. Among the 12-liter tank prototypes, the A11 model, which demonstrated the best performance, was identified for its 270-bar pressure resistance and low environmental impact. It was concluded that this model requires further development. The 63-liter B9 prototype model, which withstands 535-bar pressure and exhibits optimal performance with a Global Warming Potential (GWP) of 328.86 kg CO_2 eq, was selected and preferred for the bus scenario. The study found that 78.17% of the GWP emissions in the urban bus scenario originated from the bus's operational emissions. The production of bus parts contributed 19.16% to the GWP, while the environmental impact of the composite tanks was only 2.42%. The use of composite fuel tanks instead of steel tanks has the potential to reduce tank weight by 66.8% and vehicle weight by 5.97%, resulting in positive effects on fuel consumption and operational emissions. Therefore, composite fuel tanks stand out as an effective and environmentally friendly alternative for sustainable transportation, offering advantages such as lighter weight and lower environmental impact.

Keywords Life Cycle Assessment, composite fuel tank, global warming potential, filament winding, carbon fiber, sustainable transportation
2025, xvi + 122 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın hazırlanmasında bilgi ve tecrübeleriyle bana rehberlik eden, sürecin her aşamasında ilgi ve desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Gökhan Ekrem ÜSTÜN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesindeki değerli hocalarım Prof. Dr. Sıddık CİNDORUK ve Doç. Dr. Ahmet AYGÜN'e tez çalışmamın şekillenmesinde sağladıkları değerli katkılar ve destekleri için içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesine sağladığı destekler için TÜBİTAK BİDEB'e (2244 Sanayi Doktora Programı, Proje No: 119C102) teşekkür ederim. Ayrıca, proje yürütücüsü Prof. Dr. Mehmet KARAHAN'a, proje ortağı BUTEKOM Genel Müdürü Murat KURTLAR'a ve BUTEKOM Bursa Teknoloji Koordinasyon ve Ar-Ge Merkezi A.Ş.'deki değerli çalışma arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmama sağladıkları kıymetli katkılar için Dr. Mustafa HATİPOĞLU'na, Tuğrul KARASARLIOĞLU'na, Gaye KANALTI BAŞ'a, A. Umur GÜNGÖR'e, Floteks A.Ş. ve tüm çalışanlarına şükranlarımı sunarım.

Her zaman yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme; annem Suzan GÜNDOĞAN ve babam Abdurrahman GÜNDOĞAN'a, bilgi ve deneyimiyle bana her zaman rehberlik eden eşim Doç. Dr. Onur TAŞKIN'a ve yaşam enerjimi daima artıran sevgili kızlarım Zeynep Alya ve Hazel'e en derin teşekkürlerimi sunarım.

Bu sürecin başarıyla tamamlanmasında emeği geçen ve katkı sağlayan tüm kişi ve kurumlara içtenlikle minnettarım.

Elif Gamze TAŞKIN
20/02/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
ŞEKİLLER DİZİNİ xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ xvi
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 5
2.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Metodolojisi ve Geliştirilmesi 5
2.1.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde amaç ve kapsam tanımı 8
2.1.2. Yaşam Döngüsü Envanteri ve Yaşam Döngüsü Etki Analizi 10
2.1.3. Yorumlama, eleştirel inceleme ve raporlama 12
2.2. Kompozit Materyal ile Güçlendirilmiş Basınçlı Tank 12
2.2.1. Filament sarma teknolojisi ve proses parametreleri 13
2.2.2. Kompozit sargılı basınçlı tanklar 15
2.3. Önceki Çalışmalar 18
3. MATERYAL ve YÖNTEM 34
3.1. Materyal 34
3.1.1. Veri tabanı ve kullanılan yazılım 35
3.1.2. Kompozit tank üretiminde kullanılan materyaller 35
3.1.3. Üretim prosesinde kullanılan makine ve ekipmanlar 37
3.2. Yöntem 39
3.2.1. Patlama testi 39
3.2.2. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ve etki değerlendirmesi kapsamında kullanılan yöntemler 40
3.2.3. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesine göre sistem sınırları 42
3.2.5. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi (YDEA) aşaması 48
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 58
4.1. Karbon Elyaf Üretiminin Beşikten Kapıya Çevresel Etki Değerlendirmesi 58
4.2. Tip IV Tank Prototiplerinin Çevresel Etkilerinin 12 Litrelik Modeller Üzerinden Karşılaştırılması ve Değerlendirmesi 64
4.3. 12 Litrelik Tank Prototipleri için Patlama Testi Sonuçları ve Çalışmaların Çevresel Etki Karşılaştırması 76
4.4. Tip IV Tank Prototiplerinin Çevresel Etkilerinin 63 Litrelik Modeller Üzerinden Karşılaştırılması ve Değerlendirmesi 82
4.5. 63 Litrelik Tank Prototipleri için Patlama Testi Sonuçları ve Çalışmaların Çevresel Etki Karşılaştırması 92
4.6. Şehir İçi Bir Otobüsün Yaşam Döngüsünün Değerlendirilmesi ve Tank Üretiminin Çevresel Etkilerdeki Rolü 98
5. SONUÇ 108
KAYNAKLAR 113
ÖZGEÇMİŞ 123

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
°C	Santigrat derece
T	Sıcaklık (°C)
GPa	Gigapaskal (Birim Alan Başına Basınç - 1 GPa = 10^9 Pa)
µg	Mikrogram (1 µg = 10^{-6} g)
lt	Litre
m^3	Metreküp
gr	Gram
kg	Kilogram
kWh	Kilovat-Saat (Enerji Birimi)
MJ	Megajul (Enerji Birimi- 1 MJ = 10^6 J
M	Metre
Km	Kilometre
kg Sb eq	Antimona eşdeğer kilogram; Abiyotik Tükenme Potansiyeli (Elementler) için ölçüm birimi
MJ	Megajoule; enerji birimi, 1 MJ = 1.000.000 joule Megajoule (MJ)
kg CO_2 eq	Karbondioksite eşdeğer kilogram; Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) göstergesi
kg CFC^{-11} eq	CFC^{-11}'e eşdeğer kilogram; Ozon Tabakası Tükenme Potansiyeli (ODP) göstergesi
kg C_2H_4 eq	Etilene eşdeğer kilogram; Fotokimyasal Oksidasyon Potansiyeli (PO) göstergesi
kg 1,4-DB eq	1,4-Diklorobenzene eşdeğer kilogram; Ekotoksisite Potansiyeli için kullanılır
kg SO_2 eq	Kükürt dioksite eşdeğer kilogram; Asitlenme Potansiyeli (AC) göstergesi
kg PO_4^{3-} eq	Fosfat iyonuna eşdeğer kilogram; Ötrofikasyon Potansiyeli (EUT) göstergesi

Kısaltmalar	**Açıklama**
YDD (LCA)	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment)
CNG	Sıkıştırılmış Doğal Gaz (Compressed Natural Gas)
GHG	Sera Gazları (Greenhouse Gas)
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
EEA	European Environment Agency (Avrupa Çevre Ajansı)
ISO	Uluslararası Standartlar Organizasyonu (International Organization for Standardization)
YDE (LCI)	Yaşam Döngüsü Envanteri (Life Cycle Inventory)
YDEA (LCIA)	Yaşam Döngüsü Etki Analizi (Life Cycle Impact Assessment)

IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
EU	European Union
BEB	Elektrikli otobüsler (Battery Electric Bus)
FCEB	Yakıt hücreli elektrikli otobüsler (Fuel Cell Electric Bus)
SETAC	Çevresel Toksioloji ve Kimya Derneği (Society of Environmental Toxicology and Chemistry)
CO_2	Karbondioksit
NOx	Azot Oksitleri
SOx	Kükürt Oksitleri
PM	Partikül Madde
PAN	Poliakrilonitril
AN	Akrilonitril
CML-IA	CML Etki Değerlendirme Yöntemi (Environmental Impact Assessment Methodology)
GWP100a	Küresel Isınma Potansiyeli- 100 Yıllık Zaman Dilimi (Global Warming Potential for 100 Years)
EPD	Çevresel Ürün Beyanı (Environmental Product Declaration)
ADPE	Abiyotik Tükenme Potansiyeli (Elementler)
ADPF	Abiyotik Tükenme Potansiyeli (Fosil yakıtlar)
ODP	Ozon Tabakası Tükenme Potansiyeli
HT	İnsan Toksisitesi
FAE	Akarsu Ekotoksisitesi (Tatlı Su Ekosistemine Zararlılık Potansiyeli)
MAE	Deniz Suyu Ekotoksisitesi (Deniz Ekosistemine Zararlılık Potansiyeli)
TE	Karasal Ekotoksisite (Kara Ekosistemine Zararlılık Potansiyeli)
PO	Fotokimyasal Oksidasyon
AC	Asidifikasyon
EUT	Ötrofikasyon
ISO11439	Sıkıştırılmış Doğal Gaz (CNG) için Silindirik ve Küresel Gaz Depolama Tanklarının Tasarımı, Yapımı ve Testi
UNECE R110	Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu Düzenlemesi 110
EU No 79	Avrupa Birliği Regülasyonu No. 79
CF	Karbon Elyaf (Carbon Fiber)
LNG	Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (Liquefied Natural Gas)
NGL	Doğal Gaz Sıvıları (Natural Gas Liquids)
EuCIA	Avrupa Kompozit Sanayi Derneği (European Composites Industry Association)
PAH	Poli Aromatik Hidrokarbonlar

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil	2.1.	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi aşamaları……	5
Şekil	2.2.	SETAC üçgeni (Sjöqvist ve Ibrahem, 2021'den uyarlanmıştır).	7
Şekil	2.3.	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi gelişim çerçevesi (Sjöqvist ve Ibrahem., 2021'den uyarlanmıştır) …….	7
Şekil	2.4.	Yaşam döngüsü etki değerlendirmesinde envanterden kategori uç noktalarına giden şematik adımlar (European Commission, 2010'dan uyarlanmıştır.) …….	10
Şekil	2.5.	Basınçlı tankların farklı üretim yöntemleri……..	13
Şekil	2.6.	Filament sarma prosesi diyagramı (Jesrani, 2015'den uyarlanmıştır.)……..	13
Şekil	2.7.	Basınçlı tankların beş farklı tasarımı	16
Şekil	2.8.	AB'de ulaşım kaynaklı sera gazı emisyonları (EEA Raporu, 2022'dan uyarlanmıştır)……...	18
Şekil	3.1.	Tip IV tankların yazılım çizimleri……	37
Şekil	3.2.	Filament sarma makinası…….	38
Şekil	3.3.	Kür fırını……..	39
Şekil	3.4.	Şehir içi otobüslerin ve Tip IV karbon fiber tanklarının üretiminin yaşam döngüsüne odaklı sistem sınırı…….	43
Şekil	3.5.	Tip IV tank üretim akışı……	45
Şekil	3.6.	PAN tabanlı karbon fiber üretim süreci ve sistem sınırları (The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association Raporu, 2022)..	45
Şekil	4.1.	Karbon elyaf üretiminde girdilerin çevresel etkileri (sıcak nokta analizi) …….	60
Şekil	4.2.	Etki kategorileri normalizasyon karşılaştırma ve sıcak nokta analizi……...	62
Şekil	4.3.	PAN tabanlı karbon fiberin küresel ısınmaya ait etkisinin sankey diyagramı…….	63
Şekil	4.4.	PAN tabanlı karbon fiberin küresel ısınmaya ait etkisinin % sankey diyagramı…….	63
Şekil	4.5.	12 litrelik karbon fiber sargı prototiplerinin yüzde karakterizasyon karşılaştırması……	68
Şekil	4.6.	12 litrelik karbon elyaf sarım denemelerine ilişkin normalizasyon karşılaştırması…….	69
Şekil	4.7.	A9 prototipinin karaterizasyona bağlı sıcak nokta analizi……	70
Şekil	4.8.	A9 prototipi küresel ısınma potansiyeline ilişkin sankey diyagramı…….	72
Şekil	4.9.	12 litrelik prototip modellerin iklim değişikliği etkisinin yüzde karşılaştırması……..	76
Şekil	4.10.	A11 prototipinin karaterizasyona bağlı sıcak nokta analizi……..	78
Şekil	4.11.	A9 prototip modelin küresel ısınma potansiyeline ilişkin sankey diyagramı…….	79
Şekil	4.12.	Karbon elyaf sarım denemelerine ilişkin yüzde olarak karakterizasyon karşılaştırması……	84
Şekil	4.13.	Karbon elyaf sarım denemelerine ilişkin normalizasyon karşılaştırmas……...	85

Şekil 4.14. 63 litrelik prototip modellerin iklim değişikliği etkisinin yüzde karşılaştırması…….. 86
Şekil 4.15. B5 prototipinin karaterizasyona bağlı sıcak nokta analizi……... 87
Şekil 4.16. B5 prototip modelin küresel ısınma potansiyeline ilişkin sankey diyagramı……. 88
Şekil 4.17. B9 prototipinin karaterizasyona bağlı sıcak nokta analizi…… 95
Şekil 4.18. B9 prototip modelin küresel ısınma potansiyeline ilişkin sankey diyagramı……. 97
Şekil 4.19. Sıkıştırılmış Doğal Gaz (CNG) yakıtlı otobüsün çevresel etkilerinin karakterizasyonu……. 98
Şekil 4.20. Tank üretiminin parçaların ve araçların imalatı ile taşıma aşamasında girdilerin yüzde dağlımı…… 100
Şekil 4.21. Otobüs üretim aşamasında kompozit tank kullanımına bağlı küresel ısınma potansiyeli üzerindeki etki dağılımı 101
Şekil 4.22. Otobüs üretim aşamasında çelik tank kullanımın küresel ısınma potansiyeli üzerindeki etki dağılımı 102

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge	3.1.	Prototip üretimde kullanılan kimyasallar……...	36
Çizelge	1.3.	Analiz edilen çevresel etki kategorileri (Menouf, 201) …….	41
Çizelge	3.3.	Veri kaynaklarının özeti…….	47
Çizelge	3.4	Alt sistem girdi verileri……..	49
Çizelge	3.5	Alt sistem çıktı verileri……...	50
Çizelge	3.6	Prototip denemeleri için ortak süreçlerin envanteri……...	50
Çizelge	3.7.	12 litre kapasiteli Tip IV yakıt tankı için Yaşam Döngüsü Envanter Analiz……..	53
Çizelge	3.8.	63 litre kapasiteli Tip IV yakıt tankı için Yaşam Döngüsü Envanter Analizi…….	53
Çizelge	3.9.	Otobüsün beşikten kapıya üretim envanter…….	54
Çizelge	3.10.	Otobüsün kullanım süresi boyunca emisyon envanteri……..	55
Çizelge	3.11.	Otobüsün kullanım süresi boyunca bakım onarım envanteri….	56
Çizelge	3.12.	Otobüsün bertaraf senaryosu envanteri……..	57
Çizelge	4.1.	CML Baseline YDD Etki kategorileri karakterizasyon sonuçları…….	59
Çizelge	4.2.	Karbon elyaf sarım çalışmalarının karakterizasyon sonuçları…	65
Çizelge	4.3.	A9 küresel ısınma potansiyeline ait karakterizasyon tablosunda öncelikli olan ilk altı etken madde……..	74
Çizelge	4.4.	12 litrelik karbon elyaf sarım denemelerinin IPCC GWP 100a'ya göre değerlendirmesi…….	75
Çizelge	4.5.	Prototiplerde öne çıkan çevresel bileşenlerin ve patlama testi sonuçlarının karşılaştırılması……..	77
Çizelge	4.6.	Optimum verilerinin çevresel etkilerinin referans çalışmalar ile karşılaştırılması……...	80
Çizelge	4.7.	63 litre karbon elyaf sarım denemelerine ilişkin karakterizasyon sonuçları……	83
Çizelge	4.8.	Karbon elyaf sarım denemelerinin IPCC GWP 100a'ya göre değerlendirmesi……...	85
Çizelge	4.9.	B5 küresel ısınma potansiyeline ait havaya emisyon olan ilk yedi etken madde…….	91
Çizelge	4.10.	Prototiplerde öne çıkan çevresel bileşenleri ile patlama test sonuçlarının karşılaştırılması……...	92
Çizelge	4.11.	Şehir içi bir otobüsün ömrü boyunca 124.800.000 yolcu-kilometre başına çevresel etki……..	99
Çizelge	4.12.	Otobüs üretimi parçalarının çevresel etkisinin karşılaştırılması	104
Çizelge	4.12.	Otobüs üretimi parçalarının çevresel etkisinin karşılaştırılması(devamı)…….	105

1. GİRİŞ

İnsan faaliyetlerinin giderek dünyanın karmaşık sistemlerini olumsuz etkilemekte, bu sistemlerin sınırları ve önemi konusunda farkındalık ise her geçen gün artmaktadır. Bu kapsamda son yıllarda, üreticilerin çevresel sorumluluğunu ve tüketicilerin çevre bilincini artırmak amacıyla çeşitli endüstriyel stratejiler geliştirilmektedir. Son otuz yılda küresel sera gazı emisyonları %60'tan fazla artış göstermiştir (Global Carbon Project, 2021). Bu artış, sanayi, tarım ve enerji üretimi gibi faaliyetlerin yoğunluğuna bağlı olarak daha da hızlanmıştır. Dünya genelinde karbondioksit (CO_2) yoğunluğu, 1990 seviyelerine kıyasla 2022 yılında %58 artmış ve 420 ppm seviyesine ulaşmıştır (NOAA, 2023). Sera gazı birikimindeki bu hızlı artış, küresel sıcaklık artışına neden olmakta; son yüzyılda, küresel ortalama yüzey sıcaklıklarında yaklaşık 1,1°C'lik bir yükseliş gözlemlenmiştir (IPCC, 2021). Bu durumun bir sonucu olarak, aşırı sıcak hava dalgaları, orman yangınları, seller ve buzulların hızla erimesi gibi çevresel problemler giderek daha sık ve şiddetli bir şekilde yaşanmaktadır (Jha ve Dev,2024). Bu gelişmelere bağlı olarak Avrupa Birliği ve Üye Devletleri, Paris Anlaşması (UNFCCC, 2016) ve Avrupa Yeşil Mutabakatı (Avrupa Komisyonu, 2019) gibi küresel taahhütlere bağlı olarak sera gazı (GHG) emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir (Candelaresi ve ark., 2021; Pelsa ve ark., 2022; Pasad ve ark., 2023).

Bu hedefler doğrultusunda birçok alanda olduğu gibi temiz ve sürdürülebilir bir gelecek için şehir içi otobüsler gibi ulaşım araçlarını ön plana çıkaran politikalar da geliştirilmiştir. Ulaştırma sektörü, fosil yakıt kullanımını ve sera gazı emisyonlarını azaltma çabalarında kritik bir rol oynamaktadır (Mastinu ve ark., 2023).

Avrupa Çevre Ajansı ve Avrupa Komisyonu İklim Eylemi Genel Müdürlüğü verilerine göre, 2020 yılında karayolu taşımacılığı sektörü, AB'de sera gazı emisyonlarının en büyük ikinci kaynağı olmuş ve toplam CO_2 emisyonlarının %21'ini oluşturmuştur (Grazieschi ve ark., 2023). Avrupa Komisyonu, ulaştırma sektöründe 2050 yılına kadar emisyonların sıfıra indirilmesini hedeflemiştir (Mittal ve ark., 2023; Ranieria ve ark., 2023). Aynı zamanda, 2050 yılına kadar yeni otomobiller, minibüsler ve ağır hizmet

araçlarının neredeyse tümünün sıfır emisyonlu olması öngörülmektedir (Mastinu ve ark., 2023).

Bu hedefler ışığında, AB Konseyi'nin 16 Ekim 2023'te yayınladığı basın bülteninde, şehir içi otobüsler için 2030 yılına kadar %85'lik, 2035 yılına kadar ise %100'lük sıfır emisyon hedefi getirilmiştir (EU Konseyi Basın Bülteni, 2023). Şehirler, enerji kaynaklı CO_2 emisyonlarının %71-76'sından sorumlu olup, kentsel faaliyetlerin yoğun enerji tüketimi nedeniyle büyük bir emisyon payına sahiptir. Bu nedenle, ulaşım stratejileri genellikle hız, verimlilik, esneklik ve güvenli ulaşım unsurlarının yanında çevresel faktörleri de göz önünde bulundurmaktadır (Leichter ve ark., 2021).

Bunun bir sonucu olarak, benzinli motorlu taşıtların sera gazı emisyonlarını artırması sürdürülebilir kalkınma ve enerji verimliliği hedefleri doğrultusunda alternatif yakıtlar üzerinde yoğun araştırmaları teşvik etmiştir. Biyodizel, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), sıvılaştırılmış propan, etanol, yakıt hücreleri ve hibrit-elektrik gibi alternatifler öne çıkmıştır (Sharma ve ark., 2017).

Son yıllarda ise, elektrikli araçların pazar payının artış göstermesi, hidrojeni temiz yakıt seçenekleri arasında önemli bir konuma taşımıştır. Whiston ve ark. (2021), sıkıştırılmış hidrojen depolama yöntemlerinin 2035 yılına kadar tüm hidrojen depolama yöntemlerinin %67'sini, 2050 yılına kadar ise %56'sını oluşturacağını öngörmektedir. Bu durum hem hidrojen hem de CNG yakıtının depolama teknolojilerinin gelişimi açısından önem taşımaktadır.

Araştırmalar, sıkıştırılmış doğal gazla çalışan otobüslerin dizel otobüslerle karşılaştırıldığında hava emisyonları ve gürültü konularında üstünlük sağladığını göstermiştir. Ancak hidrokarbon emisyonlarının dizel otobüslerden daha yüksek olabileceği belirtilmiştir (Tica ve ark., 2019; Gomez ve ark., 2021). Ek olarak, NOx ve partikül konsantrasyonlarının, yüksek kirletici konsantrasyonlarına sahip alanların oluşmasında belirleyici faktör olduğu tespit edilmiştir.

Öte yandan, hidrojen ve CNG'nin teknik olarak benzer depolama altyapıları gerektirmesi, yeni nesil Tip IV tank gelişimlerini önemli hale getirmiştir. Karbon fiber kompozit malzeme kullanılan bu tanklar, metal tanklardaki ani patlama riskini azaltmakta ve gaz sızıntı avantajı sunmaktadır (Kashyzadeh ve ark., 2023).

Sonuç olarak, sürdürülebilir temiz enerji kaynaklarının yakıt olarak kullanımı, Tip IV ve Tip V yakıt tanklarının teknik gelişimini teşvik ederek bu tankların ulaşım sektöründeki kullanımını artıracaktır. Bu bağlamda, ilgili depolama tanklarının üretim süreçlerine yönelik Ar-Ge çalışmaları giderek daha kritik hale gelmektedir. Ürün geliştirme süreçlerinde sürdürülebilirlik öncelikli bir hedef olmalı ve bu süreçler çevresel, ekonomik ve teknik yeterlilik çerçevesinde detaylı bir şekilde değerlendirilmelidir.

Alternatif yakıtlı araçlar, örneğin CNG yakıtlı otobüsler, YDD yöntemiyle analiz edildiğinde, üretimden imhaya kadar olan tüm süreçlerde çevresel etkilerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi mümkündür. Bu analiz, çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesi, etkili politika ve düzenlemelerin oluşturulması ve çevre dostu teknolojik çözümler üretilmesi açısından kritik bir araçtır.

Stratejik gelişim perspektifinden bakıldığında, YDD çevresel etkilerin analizinde en etkili yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. YDD, süreçlerin çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerinin bütüncül bir şekilde ele alınmasına olanak tanır ve bu sayede sürdürülebilir stratejiler geliştirilmesine zemin hazırlar (Mahmud ve ark., 2021; França ve ark., 2021; Gulcimen ve ark., 2021; Cremer ve ark.,2020; Jakub ve ark., 2022). Kentsel ulaşım özelinde yapılan YDD çalışmaları, otobüs üretimi, çeşitli otobüs bileşenleri ve yakıt kullanımı gibi unsurların çevresel etkilerini analiz etmeyi amaçlamıştır. Ancak, bu çalışmaların büyük bir kısmı malzeme envanteri ve üretim detayları gibi önemli verilere yeterince yer vermemekte, bu da üretim aşamalarını tam olarak yansıtamayan üstten aşağıya bir modelleme yaklaşımına neden olmaktadır (Harris ve ark., 2018). Bu veri eksikliği, özellikle gelişmiş kompozit tanklar ve bunların çevresel etkilerini değerlendiren çalışmalarda açık bir şekilde görülmektedir.

Bu araştırma boşluğunu gidermek amacıyla, otobüslerde kullanılmak üzere geliştirilen prototip tank üretim süreçlerine ilişkin çevresel etkiler, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi yöntemi ile analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, tamamı termoplastik astar üzerine karbon fiber kompozit sargıdan oluşan Tip IV tank prototiplerinin çevresel etkileri karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonel birim olarak bir kompozit yakıt tankı belirlenmiş ve analizler, hammaddenin çıkarılmasından ürünün kullanımına kadar tüm süreçleri kapsayan "beşikten kapıya" modeli üzerinden yapılmıştır.

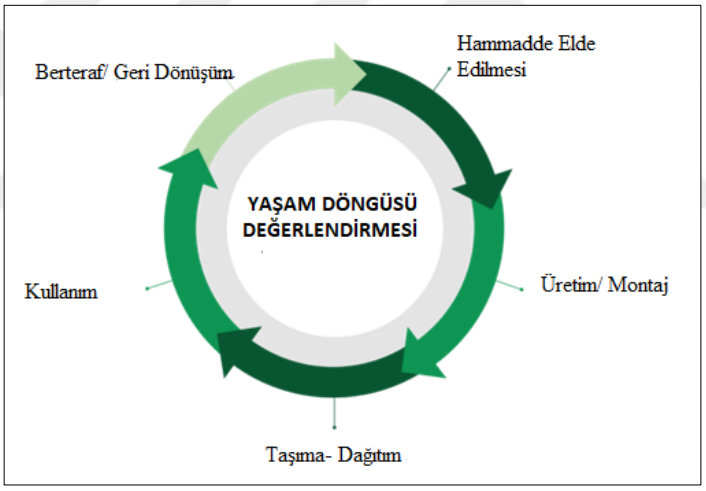
Prototip tanklar arasındaki çevresel etkiler analiz edildikten sonra, bu ürünlerin patlama test sonuçları temel alınarak çevresel ve teknik açıdan optimum ürün seçilmiştir. Daha sonra, optimum ürün belirlendikten sonra, CNG yakıtlı otobüs bileşenleri ve bertaraf süreçleri için senaryolar oluşturularak yaşam döngüsü modeli geliştirilmiş ve otobüsün genel çevresel etkileri analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan veri tabanı Ecoinvent V3 (2014), yazılım platformu ise SimaPro 8.02'dir. Çevresel etki değerlendirme süreçleri, ISO 14040:2006 ve ISO 14044:2006 standartları çerçevesinde yürütülmüştür.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, ilk olarak teorik bilgilere yer verilerek Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi yönteminin temel yaklaşımı, ardından tezde araştırılan Tip IV tankları hakkında bilgi ve yapılan çalışmalar alt başlıklar halinde incelenmiştir.

2.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Metodolojisi ve Geliştirilmesi

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi bir ürünün, hizmetin veya sürecin başlangıcından sonuna kadar olan tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendirmek için kullanılan kapsamlı bir yöntemdir. YDD kapsamında dikkate alınan aşamalar Şekil 2.1'de gösterilmiş olup aşağıdaki gibi açıklanabilir.



Şekil 2.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi aşamaları

Hammadde Çıkarma ve Üretim (Kapıdan Kapıya): Bu aşama, hammaddenin çıkarılmasından ürünün oluşturulmasına kadar olan tüm hammadde işlemlerini kapsar. Bu süreçte, enerji ve kaynak tüketimi, emisyonlar ve bu çıkarım ve üretim faaliyetleriyle ilişkili diğer çevresel etkiler üzerine odaklanılır.

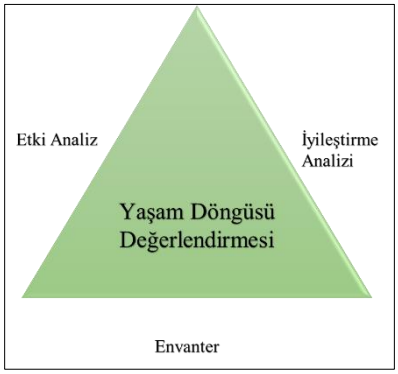
Taşıma ve Dağıtım: Bu aşama, hammadde, bileşenler ve nihai ürünün farklı konumlara taşınmasını içerir. Taşıma ve dağıtımla ilgili enerji tüketimi, emisyonlar ve diğer çevresel etkiler burada değerlendirilir.

Kullanım Aşaması: Bu aşama, ürünün kullanımına bağlı olarak ortaya çıkan enerji tüketimi, emisyonlar ve diğer çevresel etkileri kapsar. Örneğin, bir araç için bu aşama, kullanım süresince gerçekleşen yakıt tüketimi, emisyonlar, parça değişimi ve bakım gibi adımları içerir.

Yaşam Sonu Aşaması: Bu aşama, ürünün kullanım ömrünün sonunda atıldığı, geri dönüştürüldüğü veya işlendiği süreçleri kapsar. Katı atık depolama, yakma ve geri dönüşüm gibi yöntemlerin çevresel etkileri bu aşamada detaylı olarak değerlendirilir. Bu değerlendirmeler, atık yönetimi uygulamalarının sürdürülebilirliğini ve çevre üzerindeki potansiyel etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etmeyi amaçlar.

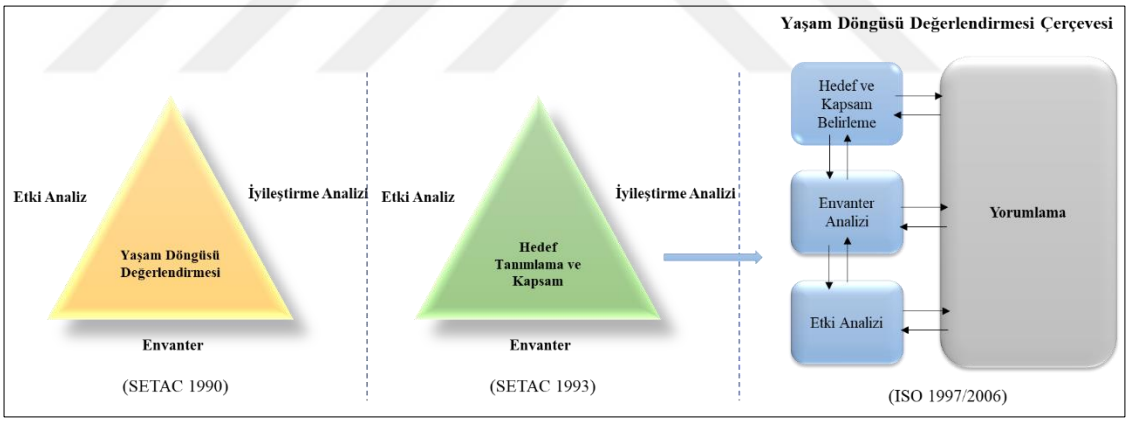
Geçmişten bugüne kirliliği azaltmayı amaçlayan yasa ve yönetmeliklerin geliştirilmesi yoluyla stratejik çevre yaklaşımları gelişmiştir. İlk yaklaşımlarda, 'Boru Sonu (End-Of-Pipe) çözümlerine ve atık minimizasyonuna odaklanılmıştır. Bu önlemler, ürün sistemi için tüm yaşam döngüsü aşamalarında veya kullanım ömrünün sonunda neden olunan potansiyel kirliliği ele almaz. Bu nedenle, bir ürünün genel yaşam döngüsü aşamaları boyunca üretilen tüm potansiyel kirleticileri kapsamak için daha bütüncül bir yaklaşıma ihtiyaç olduğu ortaya konmuştur (Sjöqvist ve Ibrahem, 2021). Bu duruma bağlı olarak geliştirilen metodolojilerden biri YDD olmuştur.

YDD, ürün sistemlerinin çevresel etkilerinin bilime dayalı, karşılaştırmalı bir analizidir. Diğer çevresel değerlendirme yöntemlerinden iki temel özelliği olan "beşikten mezara" analiz ve "fonksiyonel birim" ile ayrılır. Birlikte, bu özelliklerin uygulanması, aynı veya çok benzer amacı gerçekleştiren ürün sistemlerinin karşılaştırılmasına olanak tanır. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) tarafından YDD hakkında temel tartışmalar 1990 ve 1993 yılları arasında başlamıştır. Uygun bir YDD yapısı geliştirmeye yönelik ilk girişim, Ağustos 1990'da Smugglers Notch, Vermont, ABD'de düzenlenen "Yaşam Döngüsü Değerlendirmeleri için Teknik Bir Çerçeve" çalıştayı sırasında gerçekleştirilmiştir. Ünlü "SETAC üçgeni" olan YDD yapısı envanter, etki analizi ve iyileştirme analizi olarak üç bileşenden oluşuyordu. (Sjöqvist ve Ibrahem, 2021; Diemer, 2023).



Şekil 2.2. SETAC üçgeni (Sjöqvist ve Ibrahem, 2021'den uyarlanmıştır.)

Öncelikle "İyileştirme Analizi" daha sonra, dördüncü bileşen olan "Hedef ve Kapsam Tanımı" eklenmiştir. ISO, Çevresel yönetimi- Yaşam döngüsü değerlendirmesi- İlkeleri ve çerçeveyi açıklayan ISO 14040:1997 adlı ilk standardını 1997'de yayınlamıştır. 2006'da güncellendiğinde de çerçeve Şekil 2.3'deki halini aldı (bkz. Şekil 2.2) (Sjöqvist ve Ibrahem, 202; Diemer, 2023).



Şekil 2.3. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi gelişim çerçevesi (Sjöqvist ve Ibrahem., 2021'den uyarlanmıştır.)

ISO 14040, YDD'nin temel prensiplerini ve çerçevesini belirleyen genel bir rehberdir. ISO14044 ise daha detaylı teknik gereksinimler ve adım adım talimatlar içeren somut bir uygulama standardıdır. ISO 14040, ISO 14044'ün temelini oluşturur. LCA sonuçlarında ISO 14044'ün kullanılması, LCA çalışmalarının daha kapsamlı, güvenilir ve karşılaştırılabilir olmasına olanak sağlar.

Uluslararası Standardizasyon Örgütü, ISO 14001:2015 – Çevre Yönetim Sistemleri – Kullanım Kılavuzlu Gereksinimler standardının revizyonunu 14 Eylül 2015 tarihinde yayımlamıştır. Bu standart, çevre yönetim sistemlerinin uygulanması, sürdürülmesi ve sürekli iyileştirilmesine yönelik gereklilikleri korurken, önceki versiyonuna kıyasla önemli değişiklikler içermektedir. Söz konusu revizyon, çevre yönetiminin daha iyi anlaşılması ve bu alandaki güncel ihtiyaçlara etkin bir şekilde yanıt verilmesi gerekliliğinden kaynaklanmaktadır. Güncellenen standartta, YDD yaklaşımının benimsenmesi önemli bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. ISO 14040:2006 ve ISO 14044:2006 standartlarına göre YDD, uluslararası standartlarda tanımlandığı şekliyle Şekil 2.2'de gösterilen dört temel aşamadan oluşmaktadır.

2.1.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde amaç ve kapsam tanımı

Amaç ve kapsam tanımı, bir YDD çalışmasının yalnızca giriş veya açıklama kısmı değil, aynı zamanda temel unsurlarından biridir. Bu tanım, YDD'nin uluslararası standartları olan ISO 14040 ve ISO 14044 doğrultusunda çalışmaya rehberlik eden kuralları belirler. Bu kurallar, çalışmanın amacı, kapsamı, sistem sınırları ve verilerin detay seviyesini kapsar. Bir YDD çalışmasının amacı ve kapsamı, çalışmanın tasarlandığı uygulamayla tam uyum içinde olacak şekilde açık, anlaşılır ve ayrıntılı bir şekilde tanımlanmalıdır.

ISO 14044 standardına göre, bir YDD çalışmasının amacını tanımlarken aşağıdaki unsurlar açıkça belirtilmelidir:

- Amaçlanan uygulamanın belirli bir çerçevede ifade edilmesi,
- Çalışmanın gerçekleştirilme nedenlerinin açıklanması,
- Çalışma sonuçlarının ulaştırılmasının hedeflendiği kitlelerin tanımlanması,
- Sonuçların kamuya açıklanacak karşılaştırmalı beyanlarda kullanılıp kullanılmayacağına dair bilginin net bir şekilde sunulması.

Bu unsurlar, çalışmanın hedef ve yönelimini belirlemek için kritik bir rol oynar ve ilgili taraflara kapsamlı bir çerçeve sunar (ISO 14044:2006).

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi kapsamı tanımlanırken, birtakım noktalar göz önünde bulundurulmalı ve açık bir şekilde tarif edilmelidir. Bunlar; çalışılacak ürün sistemi, fonksiyonel birim, sistem sınırı, tahsisat prosedürleri, Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi metodolojisi ve etki tipleri, veri gerekleri, kabuller, değer seçimleri ve isteğe bağlı unsurlar, sınırlamalar, veri kalitesi gerekleri, varsa, eleştirel gözden geçirmenin tipi gibi prosedürün takip edilmesi önemlidir. Kapsam çerçevesinde tanımlanması gereken ve çalışmalarda yaygın olarak karşılaşılan temel unsurlardan olan "fonksiyonel birim" ve "sistem sınırı" şu şekilde tanımlanabilir:

Fonksiyonel birim: YDD çalışmalarında, çalışılan sistemin fonksiyonel birimi mutlaka belirlenmelidir. Fonksiyonel birim, çalışmanın amacı ve kapsamı ile uyumlu olmalıdır. Aynı zamanda, fonksiyonel birim tüm girdi ve çıktı verilerinin matematiksel olarak hesaplanmasında referans görevi görür. Bu nedenle, fonksiyonel birim açıkça tanımlanmalı ve ölçülebilir olmalıdır. Karşılaştırmalı YDD için ürünler, hangi ürünün çevresel olarak daha iyi performans gösterdiğini belirlemek ve iyileştirme alanlarını belirlemek için ortak bir işlevsel birime göre tanımlanan tutarlı sistem sınırları içinde değerlendirilir (Kim ve ark., 2001).

Sistem sınırı: YDD çalışmalarında, hangi birim süreçlerin değerlendirmeye dahil edilmesi gerektiğini ifade eder. Sistem sınırının seçiminde, çalışmanın amacıyla uyum gözetilmelidir. Ayrıca, sistem sınırının belirlenmesinde kullanılan kriterler net bir şekilde tanımlanmalı ve açıklanmalıdır (Albertí ve ark., 2019).

Kapsam ve sistem sınırlarının belirlenmesi aşamasında Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi; beşikten kapıya, beşikten mezara ve beşikten beşiğe olmak üzere üç değerlendirme modeli kapsamında incelenir. Burada değerlendirme genellikle hammadde çıkarmadan nihai bertarafa veya potansiyel geri dönüşüm, yeniden kullanıma kadar ürünün tüm yaşam döngüsünü ele alabilir. Sınırın seçimi, değerlendirmenin belirli hedeflerine ve kapsamına bağlıdır (Enguven ve ark., 2023).

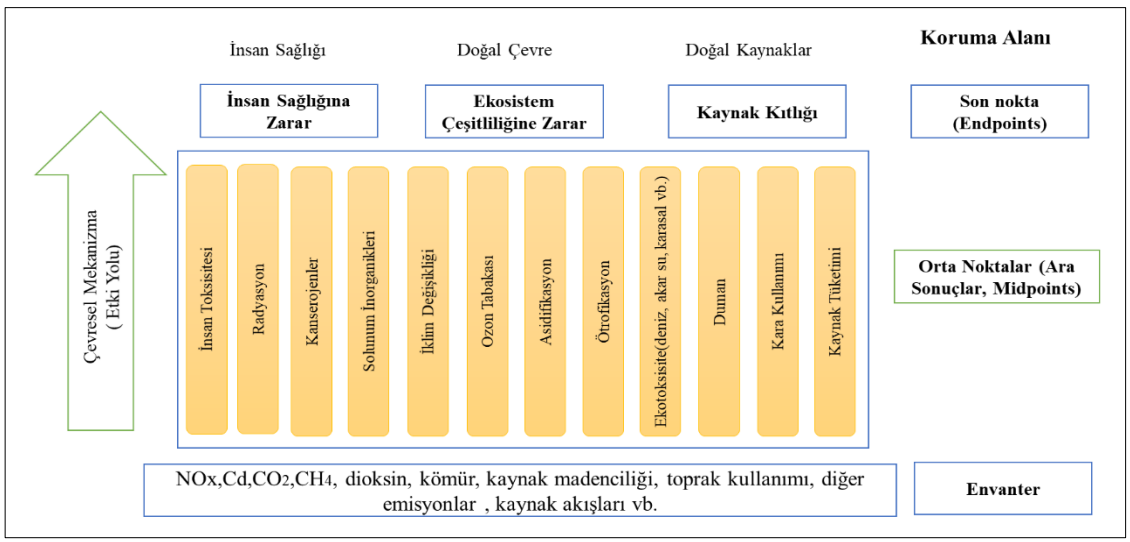
Beşikten mezara modeli, hammadde ekstraksiyonundan (beşikten) atık aşamasına (mezar) kadar olan YDD adımlarını kapsar. Beşikten kapıya model, hammaddenin

çıkarılmasından (beşikten) kullanım aşamasına kadar ürünün YDD'ni kapsar. Bu senaryoda, ürünün tüketiciye ulaştırılması ve ürünün ömrünün sonuna gelinmesi söz konusu değildir. Beşikten beşiğe değerlendirmeler, hammaddenin çıkarılmasıyla başlayan, ürünün kullanım ömrünün sonuna ve geri dönüşüm aşamasına kadar olan süreçte yer alır. Bu değerlendirme, ürünün geri dönüşüm süreci olduğu için beşikten mezara değerlendirmeyi içerir.

2.1.2. Yaşam Döngüsü Envanteri ve Yaşam Döngüsü Etki Analizi

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin ikinci aşaması olan Yaşam Döngüsü Envanter (YDE/LCI), sistem modelleme yöntemleri ve veri toplama ile ilgilidir. YDE, YDD'nin en eski aşaması ve bilimsel aşaması olarak kabul edilir. Envanter analizi, amaç ve kapsam tanımının gerekliliklerine göre bir sistem modeli oluşturmak anlamına gelir.

Yaşam Döngüsü Etki Analizi (YDEA), envanter analizinde tespit edilen envanter verilerini farklı çevresel etki kategorilerine dönüştürerek çevresel etkilerin değerlendirilmesidir. Yaşam Döngüsü Etki Analizi, yorumlamayı desteklemek için envanter verilerinin toplanmasına hizmet eder. İsteğe bağlı olarak, bunu daha da desteklemek için normalleştirme ve ağırlıklandırma uygulanabilir.



Şekil 2.4. Yaşam döngüsü etki değerlendirmesinde envanterden kategori uç noktalarına giden şematik adımlar (European Commission, 2010'dan uyarlanmıştır.)

European Commission (2010) tarafından yayımlanan ILCD Handbook'ta, Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme (YDED) yöntemleri, orta nokta (midpoint) ve son nokta (endpoint) seviyelerine entegre edilmiş metodolojiler sunulmaktadır (Şekil 2.4). Her iki seviyenin de kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Orta nokta seviyesinde, genellikle daha fazla sayıda etki kategorisi tanımlanır ve sonuçların daha ayrıntılı bir şekilde raporlanmasına olanak tanınır. Öte yandan, son nokta seviyesindeki değerlendirmeler, yaygın olarak kullanılan üç ana koruma alanına odaklanır.

Orta nokta seviyesindeki etki kategorilerinin ve son nokta seviyesindeki koruma alanlarının, çalışmayla ilgili olup olmadığının değerlendirilmesi gerekir. Bu değerlendirme, Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme aşamasında hangi YDED yöntemlerinin kullanılacağını belirlemek için önemli bir adım teşkil etmektedir.

Etki kategorileri;

- İklim değişikliği,
- Ozon incelmesi(stratosferik),
- İnsan toksisitesi,
- Solunumla ilgili inorganikler,
- İyonlaştırıcı Radyasyon,
- Fotokimyasal ozon oluşumu,
- Asitleşme (toprak ve su),
- Ötrofikasyon (kara ve su),
- Ekotoksisite,
- Arazi kullanımı,
- Kaynakların tükenmesi (mineraller, fosil ve yenilenebilir enerji kaynakları, su). Koruma Alanları:
- İnsan sağlığı,
- Doğal çevre,
- Doğal kaynaklar.

şeklindedir.

Varsayılan olarak, yukarıdaki tüm etki kategorileri, seçilen YDED yöntemlerinin kombinasyonu tarafından kapsanmalıdır. Varsa ve uygunsa, son nokta düzeyinde tutarlı etki faktörleriyle birlikte kullanılması önerilir (European Commission, 2010).

2.1.3. Yorumlama, eleştirel inceleme ve raporlama

Yaşam döngüsü yorumlaması, Yaşam Döngüsü Envanteri ve Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi sonuçlarının tanımlandığı, incelendiği ve değerlendirildiği sistematik bir prosedürdür. Bu yorumlama süreci aşağıdaki aşamalardan oluşur:

- Önemli sorunları belirlemek: Bu aşamada, YDE (LCI) ve YDEA (LCIA) sonuçlarına en fazla katkıda bulunan unsurlar tanımlanır. Belirlenen sorunlar, spesifik envanter parametreleri (örneğin, enerji kullanımı), etki kategorileri (örneğin, küresel ısınma) veya belirli yaşam döngüsü aşamaları (örneğin, üretim) olabilir.

- Veri eksiksizliğini, hassasiyetini ve tutarlılığını değerlendirmek: İkinci aşamada, belirlenen kritik veri unsurları kapsamlı bir şekilde analiz edilir. Bu analiz, verilerin eksiksizliği, duyarlılığı ve çalışmanın amaç ve kapsamıyla tutarlılığını kapsar. Güvenilir ve anlamlı sonuçlara ulaşmak için bu tür değerlendirmeler hayati önem taşır.

- Sonuç çıkararak önerilerde bulunmak: Son aşamada, elde edilen bulgular yorumlanarak çevresel iyileştirmeler için öneriler geliştirilir (Nieuwlaar, 2013).

2.2. Kompozit Materyal ile Güçlendirilmiş Basınçlı Tank

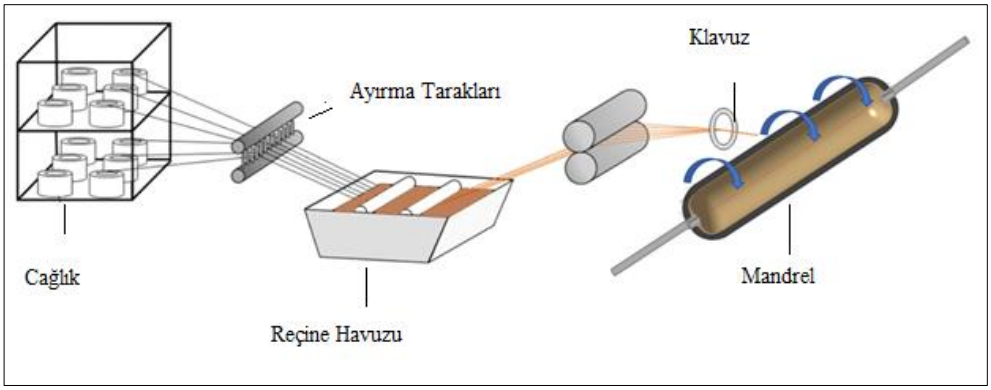
Tip IV basınçlı tankların üretiminde kullanılan kompozit sargı kısmının üretim teknikleri, tankın mukavemetini, ağırlığını ve çevresel performansını doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir. El laminasyonu, RTM (Reçine Transfer Kalıplama), filament sarma, radyal örme ve prepreg yatırma yöntemleri gibi üretim teknikleri bu tür tankların üretiminde tercih edilmektedir (Gascons ve ark., 2012; Bianchi ve ark., 2023; Eryılmaz ve ark., 2024)



Şekil 2.5. Basınçlı tankların farklı üretim yöntemleri

2.2.1. Filament sarma teknolojisi ve proses parametreleri

Filament sarma yöntemi, kompozit basınç kapları üretiminde kullanılan en eski ve yaygın tercih edilen tekniklerden biridir. Bu yöntem, temelde iki ana bileşeni içerir: takviye malzemesi ve matris malzemesi. Bu teknikte, reçine ile doyurulmuş takviye malzemeleri dönen bir mandrel etrafına sarılır. Daha sonra belirli sıcaklık koşulları altında sertleştirme işlemi uygulanır (Shaw-Stewart, 1985; Rauf, 2017).



Şekil 2.6. Filament sarma prosesi diyagramı (Jesrani, 2015'den uyarlanmıştır.)

Filament sarma ile üretim süreci temel olarak aşağıdaki adımları içerir. İlk olarak takviye malzemesi ıslatılır. Takviye malzemesi olan elyafın reçine gibi bir matris malzeme ile doyurulması sağlanır. Bu takviye ve matris kombinasyonu, bitmiş ürüne gerekli

dayanıklılığı ve diğer istenen özellikleri sağlayan kompozit malzeme oluşturur. Daha sonra sarma aşamsına geçilir. Filament sarmada farklı geometri ve mekanik ihtiyaçlara uygun üretim yapmak için helisel, çember, eksenel, biaxial (kafes), polar gibi farklı sarma çeşitleri uygulanır. Reçineyle doyurulmuş takviye malzemeler, dönen bir mandrel etrafında belirli açılarda sarılır (Kartav, 2020). Sarma işlemi tamamlandığında, ürün sertleştirme (kürleme) işlemini başlatmak için belirli sıcaklık koşullarına tabi tutulur. Sertleştirme, reçine malzemesinin sertleşmesini içerir, güçlü ve rijit bir kompozit yapı oluşturulur (Azeem ve ark., 2022).

Sarma işlemi, basınçlı kabın tasarım gereksinimlerine uyacak şekilde gerçekleştirilir. Filament sargılı parçalar, helisel ve çember (90°) sargı katmanlarından oluşur. Sarım deseni 10°-89° açıları arasında tasarlandığında, helisel sarım olarak adlandırılır. Helisel katmanlar, pozitif ve negatif sarım açılarına sahip iki dokuma alt katmandan oluşur. Öte yandan, adından da anlaşılacağı gibi, iç basınç için mukavemetin artırılması gerektiğinde, çember mukavemeti olarak da bilinen 90° "çember" sarımı gereklidir. Filament sargılı parçanın tasarımında hem uzunlamasına hem de radyal eksenlerde optimum mukavemeti elde etmek amacıyla dengeli bir şekilde sarmal ve çember katmanları seçilmelidir. Filament sarma işlemi otomatik olsa da parçanın kalitesi birçok parametreden etkilenir, bunlar arasında reçine viskozitesi, elyaf gerilmesi, sarma hızı ve elyaf ıslanması yer alır. Reçine viskozitesi, reçine tipi ve banyosunun sıcaklığı ile ilgilidir ve işlem süresince viskozitedeki değişiklik nedeniyle her katmanda farklılık gösterebilir. Reçine emprenye edilmesi, kompozit üretiminde kritik bir parametre olup, özel emprenye ünitesi tasarımları üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Sarma gerilmesi de katman kalınlığını ve elyaf/hacim oranını etkileyen önemli bir parametredir, her elyaf tipi için optimum gerilim değeri sarma denemeleriyle belirlenir (Yurdakul, 2022).

Modern sarma makineleri, katman sayısını otomatik olarak ayarlayabilmekte ve mandrelin bir ucundan diğer ucuna zıt yönlü sarım yaparak yüksek hassasiyet sağlamaktadır. Bu yöntem, yüksek mukavemetli ve hafif yapılar üretme imkânı sunduğu için özellikle roket motorları, askeri uygulamalar, yüksek basınçlı boru hatları, yer altı depolama tankları ve basınçlı kaplar gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca, filament

sarma ile üretilen malzemeler yüksek korozyon direnci ve elektrik yalıtımı gibi avantajlar da sağlamaktadır (Azeem ve ark., 2022).

Filament sarma prosesi, yüksek dayanıklı ve hafif yapılar oluşturma yeteneği sayesinde özellikle basınçlı kapların üretimi için son derece uygundur. Basınçlı kapların aksiyal simetrik yapıları, sarma işlemiyle uyumlu bir şekilde tasarlanabilmesini sağlar ve bu da tutarlı, homojen malzeme dağılımına olanak tanır. Bu süreçte, fiber malzemenin mekanik özellikleri ve reçine, kompozitin genel mekanik özelliklerini büyük ölçüde belirler. Liflerin kompozite katkısı, dört temel faktörle doğrudan ilişkilidir: Elyafın temel mekanik özellikleri, elyaf ve reçine arasındaki yüzey etkileşimi (arayüz), kompozitteki lif miktarı (lif hacim oranı) ve liflerin oryantasyonu. Kompozit malzeme endüstrisinde yaygın olarak kullanılan elyaf türleri arasında karbon, cam ve aramid elyafı öne çıkar. Özellikle karbon fiberler, üstün mekanik özellikleri ile dikkat çeker. Düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek yorulma direnci, düşük termal genleşme ve iyi elektriksel ve termal iletkenlik gibi özellikleri, karbon fiberleri pek çok yüksek mukavemet gereksinimi taşıyan yapılar, örneğin havacılık yapıları ve yüksek basınçlı gaz tankları için ideal hale getirir (Erturan, 2019).

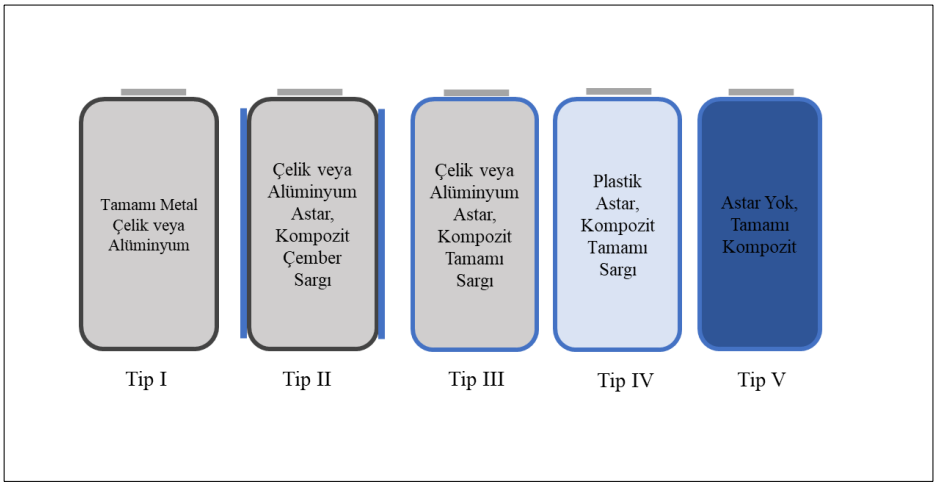
2.2.2. Kompozit sargılı basınçlı tanklar

Son yıllarda, kompozit malzemeler pek çok farklı alanda kullanılmaya başlanmıştır. Metal malzemelere kıyasla daha yüksek özgül mukavemet ve üstün çevresel direnç özelliklerine sahip olmanın yanı sıra, kompozit malzemeler güvenlik açısından da daha avantajlıdır. Bu özellikler nedeniyle, eski tip metal basınçlı kaplar, yerini kompozit sarılı basınçlı kaplar tasarımına bırakmaktadır. Patlama durumunda, metal basınçlı kapların parçaları, kompozit sarılı basınçlı kaplara kıyasla çok daha tehlikeli olabilmektedir. Basınçlı kaplar, tasarım, üretim ve test süreçlerinin standart hale getirilmesi amacıyla kullanılan malzemelere göre sınıflandırılmaktadır (McLaughlan ve ark., 2011).

Tipik basınçlı kaplar, bir silindirik kısmı ve iki kubbe bölgesini içerir ve yüksek iç basınçlara dayanacak şekilde tasarlanır. ISO 11439 standardına göre, basınçlı kaplar kullanılan malzemelere göre beş tipe ayrılır (Yurdakul, 2022).

Tip V tankı, hidrojen depolama tanklarının geliştirilmesindeki son aşama olarak kabul edilmekte ve şu anda yoğun bir araştırma konusu oluşturmaktadır. Bu bağlamda, hedeflenen çözümler mikro çatlaklı yapısal plastiklerin ve/veya bariyer kaplamaların geliştirilmesini içermektedir. Basınçlı kaplar aşağıdaki gibi beş tip kategoriye ayrılmaktadır:

Tip I: Tamamen metal konstrüksiyon, genellikle çelik yapıdadır.
Tip II: Çoğunlukla metal, kasnak yönünde bir miktar fiber sargılı, çoğunlukla çelik veya cam elyaf kompozitli alüminyum; metal kap ve kompozit malzemeler yaklaşık olarak eşit yapısal yükü paylaşır.
Tip III: Bir karbon fiber kompozit ile, genellikle alüminyum olmak üzere, tam bir kompozit kaplamaya sahip metal astar; kompozit malzemeler yapısal yükleri taşır.
Tip IV: Tamamı kompozit yapı, polimer tipik olarak karbon fiber veya hibrit karbon/cam fiber kompozit ile poliamid (PA) veya yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) astar; kompozit malzemeler tüm yapısal yükleri taşır.
Tip V: Astarsız, tamamı kompozit yapıdan oluşur.



Şekil 2.7. Basınçlı tankların beş farklı tasarımı

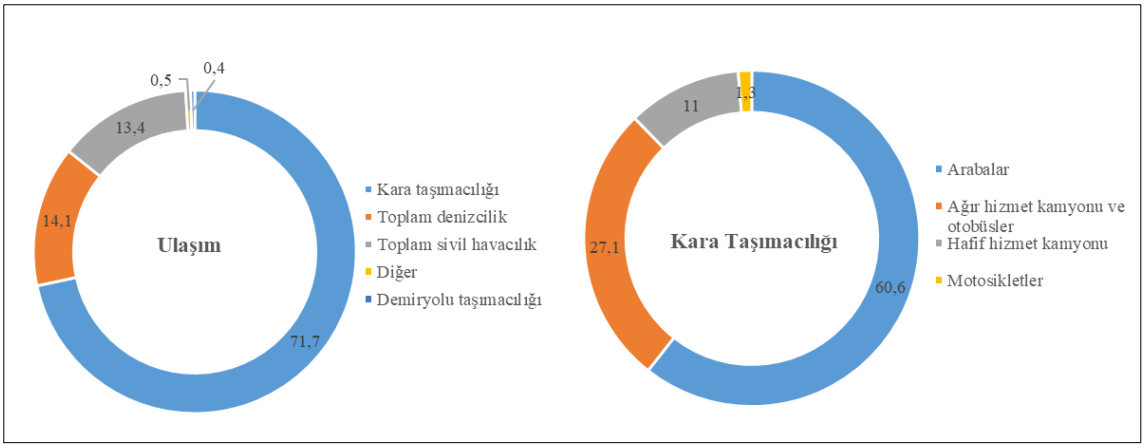
200 bar yüksek basınçlı tanklar, sıkıştırılmış doğalgazla çalışan araçlarda yaygın olarak kullanılırken, yüksek mukavemetli kompozit malzemelerden geliştirilmiş versiyonları, hidrojen yakıtlı araçlarda daha geniş bir menzil elde etmek amacıyla artık daha yüksek

basınçlarda (350 ve 700 bar) hidrojen depolamak için de tercih edilmektedir. Bu gelişme, hidrojenin daha verimli bir şekilde depolanmasını ve araçların menzilinin artırılmasını sağlamaktadır (Addcomposites, 2024).

Yakıt hücreli elektrikli araçlar, enerji vektörü olarak hidrojeni kullanarak yakıt hücresinde elektrik enerjisine dönüştürür. Bu tür güç aktarma organları, hidrojenin yüksek basınçlarda depolanması için en yaygın kabul edilen standartlar olan 350 ve 700 bar'a ihtiyaç duyar. Ancak yüksek volatilite ve enerji içeriği, basınçlı depolama ile birlikte yolcuların güvenliği konusunda zorluklar oluşturabilir. Metal tanklar ağırdır ve enerji tüketimini ile araç dinamiklerini büyük ölçüde etkiler, bu nedenle şu anda CFRP sarma teknolojisi ile yapılan Tip IV ve V tanklar, yakıt depolama için önde gelen seçeneklerdir. (Espino Gómez, 2023). Bu tanklar, karbon içermeyen bir ekonomiye geçişte etkileşim potansiyeli sağladığından, gelecekte net sıfır ulaşım ve akıllı şehir içi uygulamalarda, özellikle şehir içi ulaşımda doğalgaz ve elektrik depolama için büyük bir pazar potansiyeli sunmaktadır.

Avrupa Çevre Ajansı'na (European Environment Agency, EEA) göre Avrupa Birliği (AB), ulaşım sektöründen kaynaklanan sera gazı (GHG) emisyonlarını 1990'a kıyasla 2050'ye kadar %90 azaltmayı hedeflese de bu hedef doğrultusunda ilerleme sınırlı kalmıştır. AÇA verilerine göre ulaştırma sektörü, son 30 yılda AB'de sera gazı emisyonlarının arttığı tek büyük ekonomik sektördür. Ulaşımda enerji verimliliği artmış olsa da artan ulaşım hacimleri bu kazanımları gölgede bırakmıştır. Şu anda, AB'de ulaştırma kaynaklı emisyonlar, toplam sera gazı emisyonlarının dörtte birinden fazlasını oluşturmakta olup, karayolu taşımacılığı emisyonlarının büyük kısmı otomobillerden ve ağır hizmet kamyonu ve otobüslerden kaynaklanmaktadır (Şekil 2.8) (EEA,2022).

Bu bağlamda, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) ve hidrojenle çalışan taşıtlar, özellikle Tip IV tanklarla donatılmış olanlar, ulaştırma emisyonlarının azaltılmasında önemli bir fırsat sunmaktadır. Tip IV tanklar, karbon fiber ile sarılmış hafif yapıları sayesinde taşıma araçlarının karbon ayak izini düşürmekte ve enerji tüketimini optimize etmektedir. Bu teknolojilerin yaygınlaşması, AB'nin karbon nötrlüğü hedeflerine ulaşmasında kritik bir rol oynayabilir.



Şekil 2.8. AB'de ulaşım kaynaklı sera gazı emisyonları (EEA Raporu, 2022'dan uyarlanmıştır)

2.3. Önceki Çalışmalar

Cooney ve ark. (2013), ABD'deki Temiz Hava Yasası'nın dizelle çalışan motorlu taşıtları, toplu taşıma otobüsleri de dahil olmak üzere, yer seviyesinde ozon oluşumuna veya dumana katkıda bulunan çeşitli kriterlerdeki kirleticilerin önemli kaynakları olarak tanımladığını belirtmişlerdir. Kentsel alanlarda daha belirgin olan hava kirliliğinin, solunum ve kardiyovasküler sağlık etkilerine yol açabileceğini ifade etmişlerdir. Yaptıkları literatür araştırmasında, geleneksel benzinle çalışan binek araçlarını çeşitli elektrikli ve hibrit alternatiflerle karşılaştırmak için yaşam döngüsü değerlendirmesi kullanıldığını, ancak toplu taşıma otobüsleri için benzer şekilde ayrıntılı çalışmalara ulaşamadıklarını belirtmişlerdir. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi sonuçlarına göre, konvansiyonel otobüs için dizel üretimi ve yanması ile elektrikli otobüs için elektrik üretiminin oluşturduğu kullanım aşamasının, çoğu etki kategorisine hakim olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte, pil üretiminin etkilerinin küresel ısınma, kanserojenler, ozon tabakasının incelmesi ve eko-toksisite açısından önemli olduğunu ortaya koymuşlardır. Yaptıkları çalışmada, elektrikli otobüsün Washington ve Oregon da dahil olmak üzere yalnızca sekiz eyalette tercih edildiğini belirtmişlerdir. Pil teknolojisindeki gelişmelerin, elektrikli otobüsün kullanım ömrü üzerindeki etkilerini azaltacağını, ancak elektrik şebekesi yapısının baskın değişken olduğunu vurgulamışlardır.

Grazieschi ve ark. (2023), ulaştırma sektörünün küresel ısınmanın kontrolüne yönelik mevcut çabalarda önemli bir rol oynadığını, ancak farklı aktarma organı teknolojilerinin yaşam döngüsü çevresel performansının eleştirel olarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Bu çalışmalarında toplu taşıma otobüslerinin yaşam döngüsü analizini yapmışlardır. Analiz kapsamında şehir filosundaki dizel, tam elektrikli ve hidrojen otobüslerini karşılaştırmışlardır. Bolzano'da otobüslerin enerji tüketimleri ve hidrojen üretimi için yapılan verileri kullanmışlardır. Elektrikli araçların, geleneksel dizel otobüslerle karşılaştırıldığında, dikkate alınan en kötü sonuç senaryosunda bile yenilenemeyen birincil enerji talebinde %43 ve küresel ısınma potansiyelinde %33 azalma gösterdiğini bulmuşlardır.

Candelaresi ve ark. (2021), hidrojen yakıtlı binek otomobillerin karşılaştırmalı yaşam döngüsünü değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında hidrojenle çalışan üç farklı binek otomobilin (yakıt hücreli elektrikli araç, içten yanmalı motorlu araç ve hibrit elektrikli araç) çevresel yaşam döngüsü performansını karşılaştırmışlardır. Ayrıca doğalgaz veya benzin ile karışım halinde hidrojen kullanan iki aracı da ele almışlardır. Tüm durumlarda, rüzgar enerjisi elektrolizi ile üretilen hidrojeni varsaymışlardır. Saf hidrojen ile çalışan üç aracın hepsinin mükemmel bir dekarbonizasyon çözümü olduğunu bulmuşlardır. Doğalgaz veya benzinle karıştırılmış hidrojen kullanan araçların ise sıradan araçlara kıyasla emisyonları düşürürken kısa vadede hidrojen kullanımını teşvik etmek için iyi fırsatlar sunduğunu bildirmişlerdir.

Yao ve ark. (2022), araştırmalarında, yakıt hücreli bir elektrikli aracın ve sıkıştırılmış doğal gazlı bir aracın farklı yakıt senaryoları altında su ayak izlerini değerlendirmişlerdir. Yakıt hücreli bir elektrikli aracın 27,2 L/100 km'lik düşük bir su ayak izi sergilediğini bulmuşlardır. Buhar metan reformasyonu ve rüzgar yoluyla su elektrolizi kullanılarak hidrojen üretimi sayesinde, yakıt hücreli elektrikli araç endüstrisinin daha fazla su kaynağı tasarrufu sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Otomobillerdeki farklı metalik malzemelerin yüzdelik farklarını analiz etmişlerdir. Çeliğin su tüketiminin sırasıyla %73,6 ve %80,5 olduğunu tespit etmişlerdir. Su ayak izinin dalgalanma yasasını, farklı güç yapıları ve çelik su tüketim katsayılarına göre analiz etmişlerdir. Çeliğin su tüketim katsayısı düşük bulunmuş ve rüzgar enerjisinin tüm yaşam döngüsü boyunca su

tüketimini yavaşlatmaya elverişli olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, yakıt hücreli bir elektrikli aracın ve sıkıştırılmış doğal gazlı bir aracın farklı yakıt senaryoları altında hassasiyet analizini yapmışlardır. Yakıt teknolojisi ve malzeme yapısının toplam su ayak izi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Yaptıkları araştırmanın sonuçlarının, otomobil endüstrisinin gelecekteki su tasarrufu önlemleri için rehberlik sağlayabileceğini ifade etmişlerdir.

Moca ve ark. (2020), üç farklı otobüs türünün yaşam döngüsü değerlendirmesini bataryalı elektrikli otobüsler (BEB), dizel otobüsler ve yakıt hücreli elektrikli otobüsler (FCEB) yapmıştır. FCEB ve dizel otobüsler için ömür boyu karbondioksit emisyonlarının %75'inden fazlasının kullanım aşamasında meydana geldiği, üretim aşamasından kaynaklanan emisyonların ise ortalama %15 civarında olduğu tespit edilmiştir. Ancak, BEB'ler için emisyonların %50'den fazlasının üretim aşamasından kaynaklandığı belirlenmiştir.

Alves ve ark. (2022) yaptıkları derlemede, hidrojenin yakıt hücresi teknolojisinin dekarbonizasyon için önemli olduğunu, gelişmiş mobilite ve enerji devriminin geleceğinde bir yer edindiğini belirtmişlerdir. Hidrojen bazlı yakıt hücresi araçlarının uygulanabilirliği, özellikle hidrojen depolama için güvenli, hafif ve maliyet açısından rekabetçi çözümlerin geliştirilmesine bağlıdır. Yüzlerce prototip aracın tanıtımından sonra, bugün ticari hidrojen tankları, kompozit malzemeler kullanan konfigürasyonları benimseyerek pazara giriş yapmaktadır. Ancak günümüzde üretim oranları düşük ve maliyetler yüksektir. Düşük hızlı yolculuklar için kullanılan hafif hizmet binek araçları, elektrikli piller ve menzil genişletici cihazlarla yönetilebilirken, kamyonlar ve otobüsler gibi uzun mesafeli ağır taşıtlar daha yüksek kullanım gerektirir ve gelişmelerle birlikte hidrojene ihtiyaç duyacaklardır. Birçok büyük şehir merkezinde dizel kamyonların programlı olarak yasaklanmasıyla birlikte, MAN, Scania, VDL ve Hyundai gibi birçok araç tedarikçisi hidrojen yakıt hücreli kamyonlar geliştirmiştir. Yakıt hücreli elektrikli kamyonlar için yerleşik hidrojen deposunun tasarım alanı değerlendirmesi, farklı çalışma basınçlarını ve araç paketlerini keşfederken, çeşitli pazar sektörlerinin menzil taleplerini karşılamak için IV. Tip tankların kullanılmasının fizibilitesini göstermiştir. Ayrıca Avrupa CUTE (Avrupa için Temiz Kentsel Ulaşım) otobüs programı, ABD Ulusal Yakıt

Hücresi Otobüs Programı ve Kore hidrojen ekonomisi yol haritası gibi uygulamalar bu süreci destekleyici bir rol üstlenmektedir. Yerleşik tanklar tipik olarak otobüsün çatısında saklanır ve daha yüksek alan mevcudiyeti, 35 MPa'da depolamaya izin vererek tank ve sıkıştırma maliyetlerini düşürür.

Gomez ve ark. (2021), araştırmalarında biri dizel yakıtla, diğeri sıkıştırılmış doğal gazla çalışan iki Euro VI-C otobüsün ürettiği gerçek sürüş emisyonlarını ölçmüşlerdir. Farklı motor teknolojilerine sahip ancak aynı kirletici emisyon sertifikasına sahip her iki aracı, aynı rotadaki emisyonlarını karşılaştırmak amacıyla Madrid'de (İspanya) test etmişlerdir. Düzenlenmiş gaz emisyonları ve parçacık sayısını farklı araç parametreleriyle (hız, egzoz kütle akış hızı, hava ve yakıt tüketimi, çevre koşulları ve rota sırasındaki küresel konum koordinatları) birlikte kaydetmişlerdir. Sıkıştırılmış doğal gazla çalışan otobüslerden kaynaklanan toplam hidrokarbon emisyonları dizel otobüslerden elde edilenlerin iki katı çıkarken, dizel otobüsün NO_x emisyonlarını biraz daha yüksek bulmuşlardır. Sonuç olarak, rota boyunca NO_x ve parçacık sayısı konsantrasyonlarının trafikte yüksek kirletici konsantrasyonlarına sahip alanlar yaratmada belirleyici bir faktör olduğunu göstermişlerdir.

Harris ve ark. (2018), alternatif otobüs teknolojilerinin yaşam döngüsü etkilerinin belirsizliğini değerlendirmede karar vericilere yardımcı olacak yeni bir çerçeve geliştirmeyi amaçlamışlardır. Keşif amaçlı değerlendirme ortamında, tüm yaşam döngüsü etkilerini araştırmak için yaşam döngüsü modeline entegre edilen teknoloji etki tahmini metodolojisini kullanmışlardır. Araştırmaları, dizel ve akülü elektrikli otobüslerin üretim, kullanım, bakım ve altyapı aşamaları için tüm yaşam döngüsü maliyetleri ve sera gazı emisyonlarındaki belirsizliği ele almak için kapsamlı ve yenilikçi bir çerçeve sunmaktadır. Pil teknolojileri, depoya giden yollar, şarj altyapısı ve yardımcı taleplerin kombinasyonları ile değerlendirilen on bir senaryoyu incelemişlerdir. Her akülü elektrikli otobüs senaryosu için, yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarının dizel otobüslere kıyasla %10-58 oranında azalacağına dair %80'lik bir güvene ulaşmışlardır. Ancak, yaşam döngüsü maliyetlerinin %129- 247 oranında daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Vargas ve ark. (2019), çalışmalarında Brezilya'nın güneydoğusunda bataryalı elektrikli araç ve bataryalı elektrikli otobüs üretiminin çevresel etkilerini değerlendirmişlerdir. Araştırmalarında araç kütlesinin azaltılması, malzeme değişimi, enerji tüketimi, batarya iyileştirme, yaşam döngüsü envanterlerinin coğrafi adaptasyonu ve elektrik karışım etkilerini incelemişlerdir. Brezilya ve küresel koşullar için 2015 ve 2030 yıllarındaki bataryalı elektrikli araç ve bataryalı elektrikli otobüs üretimlerini karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri verilere göre, Brezilya'da üretilen bataryalı elektrikli araçların ve bataryalı elektrikli otobüslerin küresel referansa göre tutarlı bir çevresel avantaj sergilemediği ve hatta düşük üretim kapasitesine sahip tesislerde daha büyük çevresel etkilere neden olabileceği belirlenmiştir. Sonuç olarak, araç gelişiminin olumsuz sonuçları özellikle insan sağlığı ve su kütleleri açısından endişe vericidir ve bu etkinin azalmasının en azından 2030'a kadar pek mümkün olmayacağını bildirmişlerdir.

Shin ve Ha (2023), yakıt hücreli araçlarda hidrojen gazını depolamanın en pratik yolu kompozit üzeri sarılmış basınçlı kap kullanmaktır. Araçların sürüş mesafesi aralığına ve güç ihtiyacına bağlı olarak binek araçlardan ağır kamyonlara kadar çeşitli çalışma basınçları ve tank hacim kapasiteleri bulunabilmektedir. Araçlar için mevcut ticari hidrojen depolama yöntemi, sıkıştırılmış hidrojen gazının, binek araçlar için 700 bar ve ağır hizmet kamyonları için 350 bar ila 700 bar basınçlarda yüksek basınçlı tanklarda depolanmasını içerir. Özellikle hidrojen, hızla yeniden doldurulabilen yerleşik tanklarda depolanarak, bölgesel ve hat taşımacılığı gibi ağır hizmet uygulamalarının sürüş menzili ihtiyaçlarını karşılıyor. Yakıt hücreli araçların başarılı olabilmesi için en önemli faktörlerden biri maliyet etkinliğidir. Dolayısıyla bu incelemede süreç analizi, hammadde ve üretim süreçlerini içeren maliyet analizi gözden geçirilmektedir. Çeşitli uygulamalara yönelik sıkıştırılmış hidrojen depolama tanklarının hem maliyetinin hem de performansının optimizasyonuna katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Çalışma kapsamında yapılan literatür araştırmalarında sıkıştırılmış hidrojen depolama yöntemlerinin 2035 yılına kadar ağırlıklı olarak kullanılacağını ve tüm hidrojen depolama yöntemlerinin %67'sini oluşturacağını ve bu oranın 2050 yılına kadar %56'ya çıkacağını öngördü. 1 kg hidrojeni bir tankta depolamanın maliyetinin 400-700 ABD Doları olacağına vurgu yapılmıştır.

Munoz ve ark. (2022), enerji geçişi kapsamında dizel yakıtlı şehir içi ulaşım araçlarının kademeli olarak değiştirilmesi için çeşitli alternatifler üzerinde çalışmaktadır. Çalışmada, maliyet, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları açısından en verimli otobüs teknolojisi ve enerji karışımını belirlemek amaçlanmıştır. Farklı şehir içi otobüs filosu teknolojilerini karşılaştırmak için enerji kullanımı, karbondioksit eşdeğeri emisyonlar açısından küresel ısınma potansiyeli ve toplam sahip olma maliyetini ölçen entegre bir endeks kullanılmıştır. Bu yöntem, 2019 senaryosundan 2030 yılına kadar Arjantin örneğine uygulanmış ve beş sonuca ulaşılmıştır. Mevcut enerji senaryosunda bile, pil ve hidrojen yakıt hücreli otobüslerin sera gazı emisyonlarını azaltmakta olduğu görülmüştür. Sıkıştırılmış doğal gazlı otobüslerin hem şehir içi hem de şehirlerarası yolcu taşımacılığı için daha düşük emisyon ve maliyet sunduğu (%10,07 karbondioksit eşdeğeri emisyon ve %5,3 toplam sahip olma maliyeti azaltımı) tespit edilmiştir. Akülü ve hidrojen yakıt hücreli araçların, mevcut on yıl boyunca sıkıştırılmış doğal gaz ve dizel araçlarla maliyet açısından rekabetçi hale geldiği gösterilmiştir. Ayrıca, akülü elektrikli otobüslerin 2023 yılına kadar en iyi seçenek olduğu, hidrojen yakıt hücreli otobüslerin ise 2027'den itibaren en iyi seçenek haline geleceği belirlenmiştir. Arjantin'deki tüm şehir içi otobüs filosunun sıfır emisyon teknolojilerine geçişinin enerji tüketimi, çevresel emisyonlar ve ekonomi açısından faydalı olacağı öngörülmüştür. Tüm filonun hidrojen yakıt hücreli otobüslere geçişi, 1,3 Mt karbondioksit eşdeğeri emisyon azaltımı sağlayarak sera gazı emisyonlarında %87'lik bir azalma yaratacak, akülü elektrikli otobüslere geçiş ise enerji tüketimini %25-38 ve emisyonları %52-61 oranında azaltacaktır.

Keoleian ve ark. (1998), yakıt tankı sistemi tasarımında yaşam döngüsü envanter analizini uygulamışlardır. Michigan Üniversitesi Ulusal Kirlilik Önleme Merkezi, General Motors Araştırma ve Geliştirme ve ABD Çevre Koruma Ajansı Ulusal Risk Yönetimi Araştırma Laboratuvarı arasındaki ortak çalışmaya dayanan bu makalede, iki yakıt deposu sisteminin yaşam döngüsü envanter profilleri rapor edilmiştir. Çalışmada, 1996 yılında üretilen ve hafif hizmet taşıtında kullanılan 31 galonluk yakıt deposu sistemine sahip çok katmanlı yoğunluklu doğrusal polietilen tank (çelik kalkanlı ve PVC kaplı çelik kayışlı) ve çelik tank (doğrusal polietilen tank kaplı ve boyalı çelik kayışlı) incelenmiştir. Envanter sonuçlarına göre, yoğunluklu doğrusal polietilen tank yakıt sisteminin çevresel

açıdan çelik tank sistemine göre daha tercih edilebilir olduğu belirlenmiştir. Yaşam döngüsü envanteri analizi, yoğunluklu doğrusal polietilen tank sistemi için daha düşük enerji yükü olduğunu ve her iki sistem için de benzer katı atık yükü bulunduğunu göstermiştir. Çelik ve yoğunluklu doğrusal polietilen tank sistemlerinin toplam yaşam döngüsü enerji tüketiminin, tank başına sırasıyla 4,9 GJ ve 3,6 GJ olduğunu bildirmişlerdir.

Sengir (2009), araştırmasında Tip IV basınçlı tankların çalışma basınçlarını 200 bar ve 250 bar olarak belirtmiştir. Beklenen en yüksek çalışma basıncı, 200 bar normal çalışma basıncı için 260 bar, 250 bar normal çalışma basıncı için ise bu değerin 1,25 katıdır. CNG tankının servis ömrü 15.000 dolum olarak tanımlanmış olup, tankların bir yılda en fazla 1.000 defa doldurulduğu ve en uzun servis ömrünün 20 yıl olduğu belirtilmiştir.

Benitez ve ark. (2021), Tip IV karbon elyaf hidrojen tankına odaklı yakıt hücreli elektrikli araçların ekolojik değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Yakıt hücreli elektrikli araçların yenilenebilir enerji kaynakları tarafından üretilen fazla enerjinin kullanılması için uygun bir teknik seçenek olmayı vaat ettiğini ve karşılığında ulaşım sektörünün çevresel etkileri azaltmasına yardımcı olduğunu ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, teknolojisinin hala geliştirme aşamasında olduğunu ve hidrojen depolama tankı gibi bazı bileşenler için çevresel performans belirsizliğini bildirmişlerdir. Üreticilerin mekanik özelliklerinden dolayı karbon kompozit malzemelerden oluşan hidrojen tankları ürettiğini, karbon elyaf üretiminin ise karmaşık ve enerji yoğun süreçler olduğunu söylemişlerdir. Yaptıkları çalışmada bir yakıt hücreli elektrikli aracın yaşam döngüsü değerlendirmesini ele almışlar ve hidrojen depolama tankının üretim sürecine ve bunun üretimi için gerekli olan karbon elyafa odaklanmışlardır. Çalışmalarının; tankın iklim değişikliği, iyonlaştırıcı radyasyon ve fosil tükenmesi için önemli olduğunu, ancak zararlı çevresel göstergelerde daha az ilgili olduğunu öne sürmüşlerdir. Gelecek senaryosu değerlendirilmesinde, tankın çevresel performansında bir iyileşme önermişlerdir. Sonuç olarak, 150.000 km ömürlü yakıt hücreli elektrikli araç mevcut senaryoda 15 kg CO_2 eq/100km ve gelecek senaryosunda 9 kg CO_2 eq/100km'den sorumlu olduğunu bulmuşlardır.

Wang ve ark. (2022), Tip IV hidrojen tanklar astarı, metal ve plastik astardan oluşmaktadır. Astar şekillendirme araştırmasının odak noktası, bariyer özelliğini, yorulma direncini, şekillendirme hassasiyetini, boyutsal kararlılığı, diğer malzemelerle bağlanma mukavemetini ve hassasiyetini ve ayrıca işlenebilirliği geliştirmektir. Tip IV hidrojen tankı gömleğinin kalıplama süreci enjeksiyon ve kaynak kalıplama, şişirme kalıplama ve rotasyonel kalıplamayı içerir. Farklı kalıplama süreçlerinin avantajları ve dezavantajları vardır.

Motaharinejad ve ark. (2021), Tanklar genellikle iki ana bölümden oluşur: hidrojen kaçışını önleyen plastik astar ve tankın dayanıklılığını artırmak için kullanılan Karbon Fiber Takviyeli Polimer (CFRP) katman. Astar plastikleri, rotasyonel kalıplama veya üflemeli kalıplama yöntemleriyle üretilebilir. Rotasyonel kalıplamada, metalik çıkıntı doğrudan kalıba gömülür ve sarma aşamasından önce polimere yapışır. Ancak, ekstrüzyon üfleme kalıplamada, metalik göbek astar polimerine kaynaklanır. Bu iki yöntemi karşılaştırdığımızda, rotasyonel kalıplama, göbek ve astar parçalarını birleştirme ve aynı anda kusursuz parça üretme yeteneği nedeniyle daha iyi geri bildirim sağlar, aynı zamanda kaynağın neden olduğu kusurları azaltma potansiyeline sahiptir.

Alshgari ve ark. (2022), çalışmalarında filament sargı kullanarak abaka elyaf kompozitlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Filament sargılı abaka elyaf kompozitlerin performansını test etmek için jüt elyafı ve cam elyafı ile daha güçlü hale getirilen kompozitler kullanmışlardır. Kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme, eğme ve dinamik mekanik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Elyaf kompozitlerin ve cam elyaf kompozitlerin, elyaf esaslı kompozitlere göre daha yüksek yoğunluk ve mekanik özelliklere sahip olduğu bulmuşlardır. Bunun nedenini, reçinenin lifin iç doku yapısındaki hücre boşluğuna girmemesi olarak açıklamışlardır. En kötü abaka elyaf kompozitlerini, yüzeydeki elyaflar yırtılırken elyafların çekildiği kompozitler olarak belirlemişlerdir. Elyaf takviyeli epoksi dairesel kompozit bağlantılı bükümlü abaka fiber kompozitin diğer kompozitlerin herhangi birinden (6000 MPa) daha yüksek bir cam geçiş sıcaklığına ve daha esnek olduğuna ulaşmışlardır. Ayrıca, Bükümlü abaka fiberle hazırlanmış dairesel kompozitin en düşük frekans bağımlılığına ve performans değişkenliğine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Kompozit özellikleri iyileştirmek için,

bükümlü abaka lifinin hem dış hem de iç yapılarının sabitlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Azeem ve ark. (2022), kompozit basınçlı tanklarda elyaf sarma teknolojisinin uygulanması ve karşılaşılan zorluklar üzerine bir derleme makale oluşturmuşlardır. Elyaf sarma teknolojisini, gaz depolama ve taşımada devrim yaratan, yüksek derecede mükemmellik ve otomasyona sahip gelişmekte olan üretim uygulamalarından biri olarak kabul etmişlerdir. Son on yılda, öncelikle ağırlık tasarrufu ve yüksek basınç değerleri için metalden fiber takviyeli tanklara kadar çeşitli basınçlı kapların geliştirildiğini bildirmişlerdir. Tip IV kompozit basınçlı tankların, metal tanklara kıyasla ağırlık tasarrufunu %75'e kadar etkilediğini ve üretimlerinin arttığını ifade etmişlerdir. Tasarım ve üretim zorlukları sarım teknolojisinde yer alan çeşitli süreçlerle ilişkilendirilse de güvenilir bir ürün yaratmak için dikkatli değerlendirmelerin yapılması gerektiğini önermişlerdir.

Air ve ark. (2023), araştırmalarında Tip V kompozit basınçlı tankları ve otomatik elyaf sarma tabanlı imalatı incelemişlerdir. Hidrojeni çok çeşitli endüstrilerde gelecek vaat eden bir enerji olduğunu ve taşınabilir uygulamalar için genellikle yüksek basınçlı kompozit ile sarılmış basınçlı tanklar içinde gaz halinde depolandığını belirtmişlerdir. Tip V olarak bilinen mevcut en gelişmiş basınçlı tank teknolojisinin, Tip IV tanklarda kullanılan dahili polimer gaz bariyerini ortadan kaldırdığını ve bunun yerine yapısal özellikler sağlamak ve gaz sızıntısını önlemek için karbon elyaf tabaka kullanıldığını ifade etmişlerdir. Bu işlevselliği yüksek basınçta elde etmenin ticari uygulamaları engellediğini ve çeşitli mühendislik zorluklarını da beraberinde getirdiğini bildirmişlerdir. Ek olarak, yüksek basınçlı kompozit ile sarılmış basınçlı tanklar için geleneksel üretim süreci olan elyaf sarımında tasarım alanını sınırlayan çeşitli kısıtlamalar olduğunu belirtmişlerdir. Son derece esnek, robotik bir kompozit üretim tekniği olan otomatik elyaf sarmanın, kompozit basınçlı tank üretimi için elyaf sargısının yerini alma ve daha fazla tank optimizasyonu için yollar sağlama potansiyeline sahip olduğunu açıklamışlardır. İki teknolojinin kombinasyonu ile yeni nesil yüksek performanslı kompozit basınçlı tanklar için bir yol sağlanabileceğini düşünmüşlerdir. Sonuç olarak, endüstri standardı olan Tip IV tankların Tip V teknolojisine giden yolda

mevcut durumu, üretim gelişimlerini, zorlukları, maliyeti, ticari standartlarla uygunluğu ve gelecekteki fabrikasyon çözümler üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Rasheed ve ark. (2023), filament sargıya karşı pultrüzyon bazlı cam elyaf kompozit teknolojilerinin tekno-ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın Pakistan gibi düşük-orta gelirli ülkelere temiz üretim, çevre yönetimi ve sürdürülebilir endüstriyel kalkınma konusunda yardımcı olacağını ifade etmişlerdir. Tekno-ekonomik sürdürülebilirliği yaşam döngüsü maliyeti ve tekno-ekonomik göstergeleri (fayda-maliyet oranı, net bugünkü değer, iç verim oranı ve geri ödeme süresi) kullanılarak belirlemişlerdir. Pultrüzyon tabanlı üretim teknolojisine göre elyaf sargı teknolojisinin tekno-ekonomik göstergeleri sırasıyla %5, %7 ve %15 daha yüksekken, toplam net yaşam döngüsünü elyaf sargısı için yaklaşık %80 daha fazla ve geri ödeme süresi daha kısa bulmuşlardır. Her iki teknoloji için yaşam döngüsü analizi kullanılarak çevresel sürdürülebilirliği belirlemişlerdir. Elyaf sarma teknolojisinin ekolojik performansının özellikle ötrofikasyon potansiyeli, partikül madde oluşumu ve su tüketim potansiyeli kategorilerinde pultrüzyon teknolojisinden daha iyi olduğunu göstermişler, diğer tüm yaşam döngüsü etki kategorileri için pultrüzyon teknolojisinin önemli ölçüde daha düşük etki gösterdiğini ve çevresel olarak daha sürdürülebilir olduğunu belirlemişlerdir.

Mindermann ve ark. (2022), doğal elyafın sarıma imalat uygunluğunu, yapısal performansını ve sürdürülebilirliğini incelemişlerdir. Mandrelsiz elyaf sarımı, tamamen otomatikleştirilebilirken inşaat malzemesi tüketimini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahip, bina inşaatı alanında gelişmekte olan bir üretim teknolojisi olarak ifade etmişlerdir. Bu teknoloji ile malzeme kullanımını optimize ederek ve azaltarak, önümüzdeki yıllarda bina taban alanı için dünya çapında artan talebe bir çözüm sunulabileceğini düşünmüşlerdir. Mevcut araştırmalardan farklı olarak daha sürdürülebilir yapılara doğru yol almak için diğer elyaf ve reçine malzeme sistemlerinin de değerlendirilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Yapılan araştırma ile fabrika ekipmanını ve sürecini uyarlayarak, potansiyel alternatif elyafı mandrelsiz elyaf sarma işlemine entegre etmişlerdir. Biyo-bazlı bir epoksi reçinesi tanıtmışlar ve geleneksel petrol bazlı olanla karşılaştırmışlardır. Seçilen alternatif liflerin üretim uygunluğunu

değerlendirmek için genel mandrelsiz sarım bileşenleri oluşturmuşlardır. On iki alternatif elyaf ve iki reçinenin sürdürülebilirliği ile ilgili yapısal performansı değerlendirmek için dört noktalı eğme testleri yapmışlardır. Malzeme sistemlerini karşılaştırmak için yaşam döngüsü değerlendirme indeksleri olarak literatürdeki somutlaşmış enerji ve küresel ısınma potansiyelini kullanmışlardır. Araştırılan lifler arasında keten en yüksek potansiyeli gösterirken, düşük lif hacim oranlarında biyo-bazlı reçineleri tavsiye etmişlerdir.

Quanjin ve ark. (2019), çalışmalarında elyaf sarma tekniği kullanım oranını artırabilecek uygulamalı faktörlere uygun bir analiz yöntemi gerçekleştirmişlerdir. Öncelikle elyaf sarma tekniğinin SWOT analizini tam olarak incelemişlerdir. İkinci olarak, uygulanan tüm elverişli faktörleri rüzgar enerjisi, bina ve inşaat, toplu taşıma, kimyasal/korozyon, altyapı ve askeriye ve savunma ile ilgili altı kategori altında sınıflandırmışlar ve tartışmışlardır. Sonuç olarak, elyaf sarma tekniğini ilerletebilecek ve elyaf sargılı kompozit ürün uygulama alanlarını artırabilecek sonuçları vurgulamışlardır.

Gopalraj ve Kärki (2020), değerli karbon ve cam elyafları içeren karbon elyaf takviyeli polimer ve cam elyaf takviyeli polimer kompozit atıklarının üretiminde artışa yönelik tahminde bulunmuşlardır. Bu kompozitlerin son zamanlarda rüzgar türbinlerinde ve uçaklarda benimsenmesi ile bu uygulamalardan kaynaklanan kullanım ömrü sonu atık miktarını da artırdığı bildirmişlerdir. Bu nedenle, AB düzenlemeleri sayesinde geri dönüşümü ve yeniden kullanımın teşvik edilmesine ihtiyaç duymuşlardır. Ağır vergilendirme politikalarının, atık depolama alanlarının kullanımını büyük ölçüde sona azalttığını ifade etmişlerdir. Bu kompozit atıkların düzgün bir şekilde geri dönüştürülmesine yönelik düzenlemeler ile endüstrilerin sürdürülebilir atık tutumları değiştirmiş ve yaşam döngüsü değerlendirmesinin bu geçiş aşamasında önemli bir rol oynadığını açıklamışlardır. Araştırmalarında, kompozitleri geri dönüştürmek ve yeniden üretmek için bir termal geri dönüşüm yolunun çevresel etkilerini incelemiş ve iklim değişikliği sonuçlarını ve fosil yakıt tüketimini kullanmışlardır. Ek olarak, düzenli depolama, enerji geri kazanımlı yakma ve çimento fırını için hammadde gibi geleneksel atık yönetimi seçenekleriyle karşılaştırmalı kapsamlı bir analiz yapmışlardır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi sonuçlarına göre karbon elyaf takviyeli polimer atıkların termal

geri dönüşüm yolu kullanılarak geri dönüştürülmesinin daha düşük çevresel etkilerini bulmuşlardır. Bununla birlikte, çimento fırını üretiminde hammadde olarak kullanılan cam elyaf takviyeli polimer atıkların, işlenmemiş kompozit üretime ikame etmek için termal olarak geri dönüştürülenlere göre daha fazla azaltılmış çevresel etki gösterdiğini bulmuşlardır.

Hermansson ve ark. (2022), karbon elyaf kompozitlerin cam elyaftan daha düşük çevresel etkisi olup olmadığı konusunda araştırma yapmışlardır. Araçların kullanım aşamasındaki yakıt tüketimini azaltmak için karbon elyaf kompozitler giderek daha fazla kullanıldığını ancak enerji yoğun üretim nedeniyle cam elyaf malzemeler kadar yaşam döngüsünde çevresel tasarruflara yol açmayabileceğini bildirmişlerdir. Çalışmalarında, biyo-bazlı hammaddelerin kullanımı, mikrodalga teknolojisi ve elyafların geri kazanılmasıyla kompozitlerin geri dönüştürülmesi dâhil olmak üzere gelecekteki farklı geliştirme yollarının araçlarda hem karbon elyaf kompozitlerin hem de cam elyafın çevresel etkisini nasıl etkilediğini değerlendirmek için yaşam döngüsü değerlendirme metodunu kullanmışlardır. Sonuçlar, farklı geliştirme yollarının birleştirilmesi ile gelecekte karbon elyaf kompozitlerin cam elyaf kompozitlerden daha düşük çevresel etkiye sahip olabileceğini ve elyafların geri kazanılmasıyla geri dönüştürülen kompozitlerin tek başına büyük bir potansiyeli olduğunu bulmuşlardır.

Ramachandran ve ark. (2023), vakum torbalama tekniği ile hazırlanan karbon elyaf ve biyo-elyaf kompozitlerin yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirmişlerdir. Bu yaşam döngüsü değerlendirmesi ile geri dönüşüm yeteneklerine odaklanarak vakum torbalı karbon fiber ve biyokompozitlerin emisyon oranını anlamaya odaklanmışlardır. Karbon kompozitlerin 54 kg CO_2 eşdeğerlik bir küresel ısınma potansiyeli gösterdiğini, biyokompozitlerin ise 12 kg CO_2 eşdeğerlik gösterdiğini bulmuşlardır. Sonuçlara göre karbon kompozitlerinden yaklaşık dört kat daha az olduğu ve diğer genel enerji tüketiminin düşürülmesi ile birlikte emisyonların daha da azaltılabileceğini bildirmişlerdir. Biyokompozitler her senaryoda daha düşük çevresel etki göstermiş olsa da karbon fiber kompozitlere kıyasla mekanik özelliklerin geliştirilmesine ilişkin boşlukların doldurulması için hala araştırma yapılmasını gerektiğini ifade etmişlerdir.

La Rosa ve ark. (2021) yaptıkları uygulamalı çalışmada karbon elyafı ile güçlendirilmiş termoset kompozitin geri dönüştürülmesi için kullanılan bir kimyasal arıtma işleminin yaşam döngüsü değerlendirmesini incelenmişlerdir. Bu araştırmada yaşam döngüsü değerlendirmesi ile ekonomik değerlendirme için yaşam döngüsü maliyet analizini ile birleştirmişlerdir. Ayrıca, kimyasal geri dönüşüm süreciyle geri kazanılan malzemelerin yeniden kullanımı için mevcut en iyi teknolojiyi belirlemeye çalışmışlardır. Laboratuvarda yapılan araştırma sonuçlarına göre epoksi termoplastikleri geri kazanmak için kimyasal işlemden önce bunları parçalamanın pratik bir yol olduğunu ifade etmişlerdir.

Stelzer ve ark. (2022), döngüsel ekonomi fırsatları ile sıkıştırılarak kalıplanmış karbon elyaf kompozitlerin deneysel fizibilitesi ve çevresel etkileri araştırmışlardır. Araştırma kapsamında yapısal bir otomotiv bileşenini (şanzıman traversi) incelemişlerdir. Yaklaşık iki dakikalık döngü süreleriyle uygun maliyetli, büyük ölçekli üretime olanak sağlayan tek adımda bir sıkıştırma kalıplama işlemi geliştirmişlerdir. İşlem-yapı-özellik-performans ilişkisi, imalat çalışmaları ve prototip testlerini deneysel olarak karakterize etmişlerdir. Çevresel etkileri karşılaştırmalı bir yaşam döngüsü değerlendirmesi ile değerlendirmişler ve üretilen bileşenler için farklı malzeme ve geri dönüşüm senaryoları analiz etmişlerdir. Çoğu etki kategorisinde endüstriyel referans olarak kullanılan alüminyumdan daha düşük çevresel etkiler ortaya çıkarmışlardır. Sıkıştırmalı kalıplama teknolojisinin çok katmanlı hibrit karbon elyaf kompozitlerle birleşimi, hafif uygulamalarda değişen kalite gereksinimleri ve döngüsellik için fırsatlar ortaya koyduğunu belirtmişlerdir.

Stoiber ve ark. (2021) mevcut veri mevcudiyeti ve standardizasyonu durumuna göre beton yapılarda karbon elyaf takviyeli polimer eklemenin çevresel performansını değerlendirmişlerdir. Beşikten kapıya bir yaşam döngüsü değerlendirmesi yapmışlar ve fosil kaynakların abiyotik tükenmesi, asitleşme potansiyeli ve küresel ısınma potansiyeli etki kategorileri ele almışlardır. Karbon elyaf takviyeli polimer ve geleneksel çelik takviyenin karşılaştırılmasında dikkate alınan tüm etki kategorileri arasında karbon elyaf takviyeli polimer takviyesinin nispeten yüksek çevresel etki gösterdiğini bulmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre ekolojik etkinin nicel bir değerlendirmesine dayalı olarak

takviye olarak karbon elyaf polimer kullanmanın ekonomik potansiyelini kanıtlamışlardır.

Hu ve ark. (2022) yaptıkları araştırmada araç ve yakıt döngülerini kapsayan çevresel yük farklılıkları için bir yaşam döngüsü hesaplama modeli geliştirmiştir. LNG çekici treylerinin daha az alüminyum ama daha çok demir ve enerji tükettiğini bulmuşlardır Daha az nitrojen oksit, kükürt oksit, metan olmayan uçucu organik bileşikler ve partikül madde yaydıklarını ancak daha fazla sera gazı (GHG) ve karbon monoksit (CO) oluşumuna neden oldukları tespit edilmiştir. Bunlara bağlı olarak abiyotik tükenme potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli ve insan sağlığı toksisitesi potansiyel etkilerine neden olurken daha fazla küresel ısınma potansiyeli (GWP) ve foto oksidan oluşturma potansiyeli (POCP) etkilerine neden olduğu analiz edilmiştir. LNG çekici-treylere geçiş, dizel muadili ile eşit yakıt ekonomisi elde ederse, karbondioksiti %52,73, GWP etkisini %44,60 ve POCP etkisini %49,23 azaltabilir. Çalışmada politika yapıcıların, LNG motor verimliliğinde iyileşmeyi engelleyen yakıt vergisi ve araç erişimine ilişkin düzenlemeleri değiştirmesi gerektiği ve teknolojileri geliştirmek için teşvik edici politikalar izlemeleri önerilmiştir.

Krauklis ve ark. (2022) yaptıkları derleme çalışmada sürdürülebilir kalkınma için kompozit malzeme geri dönüşüm teknolojisini araştırmışlardır. Son zamanlarda, sürdürülebilir kompozit geri dönüşüm çözümlerinin geliştirilmesine yönelik sosyoteknik baskıyı büyük ölçüde artıran önemli olayların meydana geldiğini bildirmişlerdir. Bunları sırasıyla, 2009 yılında Almanya'da kompozit atık depolama alanının yasaklanması, kompozit rüzgâr türbinlerinin kullanım ömrünün sona ermesi ve 2019-2020'de kullanım dışı bırakılması, COVID-19 salgını nedeniyle uçakların hizmet dışı bırakılmasının hızlanması ve yüksek hacimli teknolojilerin gelişmesi sayesinde seri üretim arabalarda termoplastik kompozitlere dayalı kompozitlerin artışı olarak ifade etmişlerdir. Bu nedenle elyaf takviyeli kompozit malzemelerin geri dönüşümünü, gelecekte özellikle rüzgar enerjisinin yanı sıra havacılık, otomotiv, inşaat ve denizcilik sektörlerinde çevresel etkilerin azaltılması ve talebin karşılanması açısından önemli bir rol oynayacağını ifade etmişlerdir. Yaptıkları derlemede hem düşük hem de yüksek teknoloji hazırlık düzeylerine sahip fiber takviyeli kompozitler için mevcut geri dönüşüm teknolojilerini

özetlemiş ve son teknoloji ürününe bir genel bakış sunmuşlardır. Çalışmada sürdürülebilir geri dönüşüm teknolojisinin geliştirilmesindeki en önemli hususlardan birinin, farklı türdeki elyaf takviyeli kompozitler için en uygun geri dönüşüm yöntemlerini belirlemek olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu nedenle, ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir kullanım ömrü sonu çözümleri ve fiber takviyeli kompozit malzeme geri dönüşümünün geliştirilmesi için net yönergeler sağlamayı amaçlamışlardır.

Meng ve ark. (2018) karbon elyaf kompozit atıklarının kullanım ömrü sonu seçeneklerinin çevresel bir karşılaştırması sunmuşlardır. Yaygın olarak kullanılan yüksek performanslı karbon elyaf takviyeli polimerlerin yıllık küresel üretiminin 2020 yılına kadar 140.000 tonun üzerinde olmasının beklendiğini ancak atık miktarının artması ve karbon elyaf üretiminin yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması nedeniyle sürdürülebilir arıtma seçeneğine olan ihtiyacın altını çizmişlerdir. Bu çalışmada yaşam döngüsü değerlendirmesi modelleri ile mevcut en iyi literatür verilerine dayanarak, mekanik, piroliz, akışkan yatak ve kimyasal geri dönüşüm süreçlerini içeren mevcut geri dönüşüm tekniklerini geleneksel depolama ve yakma ile karşılaştırarak atık geri dönüşümü ve bertaraf yollarının çevresel etkilerini ölçmüşlerdir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi sonuçlarına göre, karbon elyaf kompozit atıklarıyla mücadelede birincil enerji talebinin ve küresel ısınma potansiyelinin en aza indirilmesi için geri dönüşüm senaryolarının çevresel olarak en çok tercih edilen seçenekler olduğunu göstermişlerdir. Geri dönüşüm süreçleri ile kg karbon elyaf kompozit başına, birincil enerji talebinin 19- 27 kg CO_2 eşdeğeri kadar bir azalma ve küresel ısınma potansiyelinin 395- 520 MJ düşürülmesinin mümkün olduğunu bulmuşlardır. Bu veriler ile diğer imha yollarına kıyasla karbon elyaf kompozitin geri dönüşüm potansiyelinin faydalarını göstermişlerdir.

Gopalraj ve Kärki (2020), atık karbon elyaf/cam elyaf takviyeli kompozitlerin geri dönüşümüne ilişkin bir derleme inceleme yapmışlardır. Değerli karbon elyafları ve cam elyafları içeren tonlarca kompozit atık her yıl çeşitli uygulamalardan dolayı biriktiğini ve bunun sonuncunda karbon ve cam elyaflarının artan kullanımı nedeniyle atık bertaraf yöntemlerine ilişkin farkındalığın arttığını bildirmişlerdir. Bu kompozit atıkların ise çevresel olumsuz etkiye yol açmadan uygun maliyetli şekilde geri dönüştürülmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Ek olarak uygulanan mekanik ya da kimyasal yöntemlerin

sürdürülebilirlik değerlerine öncelik verilerek bu yöntemlerin çevresel ve ekonomik yönlerini için de kısa bir analiz yapmışlardır. Sonuç olarak, döngüsel ekonominin faktörlerini ve bu değerli elyafların yaşam döngüsünün önemini vurgulamışlardır.

Rasheed ve ark. (2023) sürdürülebilir kalkınma çağında, cam-fiber takviyeli polimer (GFRP) kompozitleri, üstün özellikleri nedeniyle modern mühendislik, inşaat ve yapı sektörlerine girmiştir. Bu sektördeki hızlı büyüme ve gelişmeyi göz önüne alarak, araştırmalarında iki tür GFRP kompozit teknolojisinin (a) filament sarma ve (b) pultrüzyonun, etkin bir şekilde değerlendirmek için çevresel ve teknik-ekonomik sürdürülebilirliklerini değerlendirmiştir. Teknik-ekonomik sürdürülebilirlik, yaşam döngüsü maliyetlendirme ve teknik-ekonomik göstergeler kullanılarak belirlenmiştir; bu göstergeler arasında fayda-maliyet (F/M) oranı, net bugünkü değer (NBD), iç getiri oranı (İGÖ), ve geri ödeme süresi bulunmaktadır. F/M oranı, bir teknolojinin göreceli maliyet ve faydeleri arasındaki ilişkiyi gösterirken, NBD, bir teknolojik yatırımın gelecekteki geri ödeme akışının hesaplanmış bugünkü değerini ifade eder. İGÖ, bir yatırımın etkin teknik-ekonomik göstergelerinden biridir ve geri ödeme süresi, bir teknolojinin yatırımını geri kazanma süresini tahmin eder. Bu teknik-ekonomik analizler, filament sarma tabanlı GFRP teknolojisi için net yaşam döngü maliyet performansının, F/M oranının ve İGÖ'nün pultrüzyon tabanlı üretim teknolojisinden sırasıyla %5, %7 ve %15 daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte genel net yaşam döngü faydaları filament sarma için yaklaşık %80 daha büyüktür. Benzer şekilde, geri ödeme süresi filament sarma için pultrüzyona kıyasla daha kısadır. Çevresel sürdürülebilirlik, her iki teknoloji için göreli bir yaşam döngüsü analizi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma için sistem sınırları "kapıdan kapıya", yani imalat aşamasıdır, bu aşamada bu teknolojiler çevresel dışsallıklar açısından değerlendirilmiştir. "1 kg mamul ürün" fonksiyonel birimi kullanılarak, pultrüzyon ve filament sarma teknolojileri ile üretilen ürünler için sekiz yaşam döngüsü etki değerlendirme kategorisi; iklim değişikliği potansiyeli, karasal ekotoksisite potansiyeli, ozon tükenmesi potansiyeli, fosil kaynak tükenme potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli, partikül madde oluşumu ve su tüketimi potansiyeli seçilmiştir. Önemli ekolojik etki puanları, filament sarma ve pultrüzyon tabanlı GFRP teknolojileri için sırasıyla küresel ısınma potansiyeli 10,8 ve 5,01 kg CO_2 eşdeğeridir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında, temelde iki farklı fonksiyonel birim üzerinden incelenmiştir. İlk fonksiyonel birimde, termoplastik astara sahip ve tamamen karbon fiber ile sarılmış Tip IV yakıt tanklarının üretim aşamasındaki çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, 12 litre ve 63 litre kapasitelerine sahip farklı tipteki yakıt tanklarının çevresel performanslarını karşılaştırabilmek amacıyla, fonksiyonel birim bir adet yakıt tankı olarak ele alınmıştır. Fonksiyonel birim, her iki farklı hacimde toplam 20 adet tankın üretim süreçlerindeki malzeme tüketimi, enerji kullanımı ve çevresel emisyonları ve patlama basıncı dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

CNG yakıtı için geliştirilen tankların, otobüs uygulamalarında standart olarak kabul edilen 200- 250 bar çalışma basıncına dayanacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu tezde CNG depolama odağında şehir içi otobüs uygulamaları önceliklendirilmiş ve uluslararası standartlara göre tanklar için hedef 200, 250 ve 470 bar patlama basıncı olarak belirlenmiştir (Sharma ve ark., 2021; Tschirschwitz ve ark., 2019).

Optimum ürünün belirlenmesinin ardından, bu tankların şehir içi otobüslerde kullanımı senaryosu oluşturulmuş ve ikincil verilerle desteklenerek bir YDD modeli geliştirilmiştir. CNG tankının çevresel katkısını belirlemek amacıyla, bir şehir içi otobüsün yaşam boyu değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, otobüs değerlendirmesi için ikinci fonksiyonel birim tanımlanmıştır.

Otobüs modeli için fonksiyonel birim, 1.300.000 km ömür süresi boyunca bir şehir içi otobüsün yolcu taşıma kapasitesi dikkate alınarak, “yolcu kilometre” başına çevresel etkilerin değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır. Otobüs, 11.662 kg kerb ağırlığına ve 96 yolcu kapasitesine sahiptir (MAN Truck & Bus SE EPD raporu, 2022) yakıt depolama sistemine yönelik tank adedi belirlenirken International Council on Clean Transportation (ICCT) toplam hacim üzerinden modelleme yapılmıştır. Bu kapsamda hesaplanan toplam tank hacim 960 litredir. Pratikte uygun tank belirlendikten sonra toplam hacime tank hacmi oranlanarak tank adedi model için belirlenmiştir. Tip IV CNG tankında 200 bar

basınç altında yakıt depolamaktadır (Posada ve Lowell, 2009). Bu kapsamda ele alınan otobüs için fonksiyonel birim, 124.800.000 yolcu-km (96 yolcu x 1.300.000 km) başına hesaplanmıştır.

Bu bağlamda otobüs parçalarının üretimi, montajı, kullanım süresince emisyonlar, bakım ve bertaraf süreçleri dikkate alınmıştır. Otobüs üretimi, kullanımı ve bertarafına ilişkin senaryolar; Sandavor (2013), MAN Truck and Bus SE (2022) ve Dlamini ve ark. (2011) tarafından bildirilen çalışmalara dayanarak oluşturulmuştur.

Tank üretim aşamasına yönelik gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirmesi envanter çalışmasında, üretim verileri, sektördeki bir yakıt tankı üreticisi firma ile BUTEKOM Bursa Teknoloji Koordinasyon ve Ar-Ge Merkezi A.Ş. iş birliğiyle toplanmıştır. Bu kapsamda, tank üretim sürecine ilişkin veriler doğrudan birincil kaynaklardan elde edilmiştir. Kimyasal maddeler, enerji ve malzemeler gibi girdilere ait arka plan verileri ise Ecoinvent veri tabanından sağlanmıştır. Ayrıca, karbon elyaf üretimi ve otobüs üretimi ile ilgili analizlerde ikincil veriler kullanılarak senaryo modellemeleri yapılmıştır.

3.1.1. Veri tabanı ve kullanılan yazılım

Veri tabanı olarak Ecoinvent V3 ve program olarak SimaPro 8.02 kullanılmıştır. Çalışmada çevresel etki değerlendirme ve analizi süreçleri uluslararası ISO 14040 ve ISO standartlarına göre gerçekleştirilmiştir (ISO14040:2006; ISO14044:2006). Araştırmada metot olarak CML-IA Baseline ve IPCC GWP 100a'ya göre çevresel etkiler değerlendirilmiştir.

3.1.2. Kompozit tank üretiminde kullanılan materyaller

Çalışmada, sarım denemelerinde 12k ve 24k sürekli karbon elyaf kullanılmıştır ve bu elyafların tex ağırlığı 800-1650 g/km arasında değişmektedir. Karbon elyaf üretimine ilişkin yaşam döngüsü envanterinde ikincil verilerden yararlanılmıştır. Ancak, karbon elyafın çevresel etkileri önemli ölçüde farklılık gösterebilmektedir (Ramachandran ve ark., 2023; Hohmann, 2018; EuCIA, 2020). Bu nedenle, The Japan Carbon Fiber

Manufacturers Association (2022) tarafından önerilen yöntemle, yaşam döngüsü envanteri kullanılarak SimaPro'da çevresel etkiler değerlendirilmiştir. Tankların astar (iç kaplama) katmanı, HDPE (Yüksek Yoğunluklu Polietilen) termoplastik malzemesiyle üretilmiştir. Reçine ve diğer yardımcı kimyasallar arasında epoksi reçine, hızlandırıcı ve sertleştirici yer almakta olup, tank astar yüzeyinin temizliğinde ksilen kullanılmıştır. Astar üretiminin ardından, sarım aşamasına geçilmiş ve bu aşamada reçine karışımı ile karbon elyaf, önemli hammadde girdileri olarak kullanılmuştur. Sarımda, sırasıyla 100:90:3 oranında epoksi reçine, sertleştirici ve hızlandırıcı kullanılmıştır. Tank astar yüzeyinin temizliğinde yine ksilen kullanılmıştır. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra kürleme aşamasına geçilmiştir. Ancak, ksilen hariç kimyasalların kullanımına ilişkin veriler Ecoinvent veri tabanında mevcut değildir, bu nedenle kimyasalların sadece üretim kaynaklı verileri kullanılarak modellemeler yapılmıştır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Prototip üretimde kullanılan kimyasallar

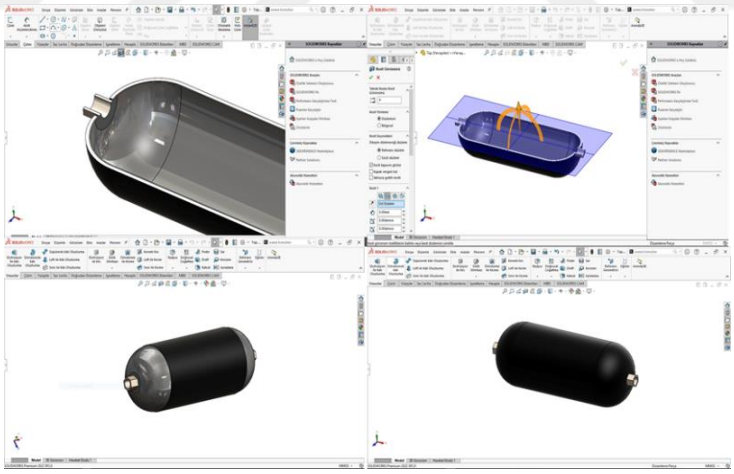
Kimyasal Adı	Kimyasal İçerik	Molekül Formül	Cas No	İçerik Oranı	Kimyasal Türü
Reçine	Bifenol A Bazlı Epoksi Reçine	$C_{21}H_{24}O_4$	1675-54-3	60-90	Organik
Reçine	1-6 bis (2-3 epoksipropil) heksan	ECHA'da formülü verilmemiş	933999-84-9	10--30	Organik
Sertleştirici	Tetrahydro-4-methylphtalic anhydride	$C_9H_{10}O_3$	34090-76-1	60-100	Organik
Sertleştirici	1,2,3,6-tetrahydro-3-methylphthalic anhydride	$C_9H_{10}O_3$	5333-84-6	13-30	Organik
Sertleştirici	1,2,3,6-tetrahydrophthalic anhydride	$C_8H_8O_3$	8543-43-8	7--13	Organik
Serleştirici	Hexahydro-4-methylphthalic anhydride	$C_9H_{12}O_3$	19438-60-9	7--13	Organik
Hızlandırıcı	2,4,6 tris(dimethylaminomethyl)phenol	$C_{15}H_{27}N_3O$	90-72-2	60-100	Organik
Sarım Ön İşlem (Yüzey Temizleyici)	P-Xylene	C_8H_{10}	106-42-3	100	Organik

3.1.3. Üretim prosesinde kullanılan makine ve ekipmanlar

12 litrelik karbon elyaf ve 63 litrelik karbon elyaf Tip IV prototip tank üretimleri için proses adımları aynı şekildedir (Şekil 3.5). Tez kapsamında enerji ölçümleri Extech Marka üç fazlı güç analizörü (Extech 382100: 1200A, ABD) ile gerçekleştirilmiştir.

3.1.3.1. Kalıp modelleme

Kalıp modelleme süreci ticari firma tarafından gerçekleştirilmiş, SolidWorks, ANSYS ve CATIA gibi yazılımların kullanılarak tasarım ve simülasyon çalışmalarının yürütüldüğü aşamadır. Bu aşamada yapılan modelleme işlemleri, YDD kapsamında analiz edilmiş ve yalnızca bu süreçte tüketilen elektrik enerjisi bir girdi olarak ele alınmıştır. Kalıp modelleme işlemi toplamda 40 saat sürmüş olup, kullanılan bilgisayarın yıllık enerji tüketimi 18,54 kWh olarak belirlenmiştir. Bu değeri, saatlik enerji tüketimi üzerinden hesaplayarak, tek bir kalıp tasarımının modelleme süreci için tüketilen toplam enerji miktarı hesaplanmıştır.



Şekil 3.1. Tip IV tankların yazılım çizimleri

3.1.3.2.Toz HDPE üretimi (ekstrüder ve öğütücü aşaması)

Rotasyona kalıplama işleminde toz şekilde HDPE besleme yapılır. Bu nedenle cips şeklinde alınan polimer renklendirme olması için ekstrüdere ardında tekrar öğütücüde (pulverizer) işlenmiştir. Ekstrüderin saatlik üretim kapasitesi 100 kg ve tüketilen elektrik

miktarı ise 80 kwh olarak sayaçtan ölçülmüştür. Öğütücüde 100 kg ürün üretilmesi için tüketilen enerji miktarı 8.8 kwh olarak hesaplanmıştır.

3.1.3.3. Rotasyon kalıplama

Rotasyon kalıplamanın üretim avantajları nedeniyle çalışmada tercih edilmiştir. Kullanılan rotasyon kalıplamada elektrik ve doğalgaz tüketimi gerçekleşmektedir. Ayrıca, üretime bağlı emisyonlar çalışmaya dahil edilmiştir. Bir saatlik baca gazı ölçümleri sonucunda CO, NO, NO_2, SO_2 ve toz değerleri sırasıyla 21,2 g, 6,1 g, 9,7 g, 3,9 g ve 0,7 g olarak ölçülmüştür. Malzeme (polimer astar) kg başına elektrik tüketimi 1.67 kwh/kg ve doğalgaz tüketimi 0.65 m^3/kg'dır.

3.1.3.4. Filament sarma

Sarım denemeleri için Fibermak marka (Fibermark Composites, FSM14 model, Türkiye) dört eksenli filament sarım makinası kullanılmıştır (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Filament sarma makinası

Filament sarma yöntemi, sürekli elyaf liflerinin belirli bir tansiyonda, reçine ile ıslatıldıktan sonra makaralardan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmasıdır. Sürekli lifler farklı açılarla kalıp üzerine sarılarak farklı mekanik özelliklerde ürün elde edilir. Konveks yapılı kalıplara sarım yapılan bu üretim metoduyla istenilen açı ve kalınlıklarda sarım yapılması sonrası malzeme kürleme prosesine alınır. Çalışmada kullanılan dört fiber beslemeli elyaf sarım makinesinde 150 cm uzunlukta 50 cm çapında malzemelerin prototip şeklinde üretilmesi mümkündür.

Prototip üretimde her çalışma kapsamında filament sarma makinasına ilişkin elektrik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda genelde enerji tüketimine üç faktör neden olur; sarım işlemi, reçine banyosu ısıtması ve kürleme işlemi. Kürleme çalışmada farklı bir proses olarak bulunması nedeniyle burda dikate alınan enerji tüketimi reçine banyosu ve sarım işlemi için harcanan toplam elektrik tüketimidir. Ayrıca bu kapsamda kullanılan lif miktarı, reçine miktarı ve diğer kullanılan kimyasalların (kullanılan solventler, sertleştiriciler veya temizlik maddeleri) ölçümleri bu proseste alınmıştır.

3.1.3.5. Kürleme fırını

Elektrik ısıtmalı, hava sirkülasyonlu kompozit kür fırını tez kapsamında kullanılmıştır (Encotherm, CCO-15 Model, Türkiye). Program sekmesinden çalışma koşulları ayarlanmış ve ısıtma programı yüklenmiştir. Kür fırınına yerleştirilen tankın döner hareket yapabilmesi ve uygulamanın homojenizasyonu için fırına tankın yerleştirileceği bir motor desteği ile dönen mekanizma oluşturulmuştur. Bu kapsamda 85°C, 5 saat ve 120°C, 3 saat sıcaklıkta kürleme reçeteleri oluşturulmuş ve envanter için süreç boyunca elektrik verileri alınmıştır.



Şekil 3.3. Kür fırını

3.2. Yöntem

3.2.1. Patlama testi

Basınçlı kaplar, tasarım uygulamalarına bağlı olarak farklı basınç dayanımı özellikleri sergileyebilir (Islam ve ark., 2024; Eryılmaz ve ark., 2024; Newhouse, 2016). Diğer çalışmalara rehberlik edebilmek amacıyla, bu çalışma kapsamında üretim envanteri

analizinin ardından yakıt tankları hidrostatik patlama testine tabi tutulmuştur. Basınçlı kapların patlama testi, yüksek basınç koşullarında güvenliği sağlamak için kritik bir süreçtir. Bu testler, Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu'nun hidrojen yakıt sistemleri için 134 No'lu Yönetmeliği (UN ECE R134), CNG silindir tasarımı için ISO 11439 ve CNG sistemleri için 110 No'lu Yönetmelik (UN ECE R110) gibi uluslararası standartlara uygun olarak gerçekleştirilmektedir.

ISO 11439 spesifikasyonlarına göre, tankların çalışma basıncı p = 200 bar ve maksimum basıncı p = 260 bar olmalıdır. Test basıncı, çalışma basıncının en az 1,5 katı olmalıdır. Tip IV tanklar için patlama basıncı, kullanılan elyaf türüne bağlı olarak en az 470 ile 730 bar arasında olmalıdır (Tschirschwitz ve ark., 2018). Bu doğrultuda, hidrostatik patlama testi düzeneği kullanılarak 200 bar ve 470 bar hedef patlama basınçları test edilmiştir. Tez kapsamında yer alan basınç testi çalışmaları, tank üretimini gerçekleştiren ve çalışmaya destek veren ticari firma tarafından gerçekleştirilmiştir.

3.2.2. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ve etki değerlendirmesi kapsamında kullanılan yöntemler

Bu bölümde tez kapsamında gerçekleştirilen denemelere ilişkin yapılan üretime ait YDD kapsamında SimaPro'da kullanılan metodolojilere yer verilmiştir.

3.2.2.1.CML-IA baseline

CML-IA, Hollanda'daki Leiden Üniversitesi Çevre Bilimleri Merkezi (CML) tarafından geliştirilen bir YDD metodolojisidir. Bu yöntem, CML 2 Temel 2000'in bir güncellemesi olup, CML tarafından Nisan 2013'te yayınlanmıştır (Sürüm 4.2).

CML-IA (temel) yöntemi, problem odaklı (orta nokta) yaklaşımı detaylandırır. CML Kılavuzu, aşağıdaki şekilde gruplandırılmış etki değerlendirmesi kategorilerinin bir listesini sağlar:

- A: Zorunlu etki kategorileri (YDD'lerin çoğunda kullanılan kategori göstergeleri)

- B: Ek etki kategorileri (operasyonel göstergeler mevcuttur, ancak YDD çalışmalarına sıklıkla dahil edilmez)

- C: Diğer etki kategorileri (operasyonel göstergeler mevcut değildir; bu nedenle YDD'ye nicel olarak dahil edilmesi imkansızdır)

Zorunlu etki kategorileri için birkaç yöntemin mevcut olması durumunda, mevcut en iyi uygulama ilkesine dayalı olarak bir temel gösterge seçilir. Bu temel göstergeler, "orta nokta düzeyinde" (sorun odaklı yaklaşım) kategori göstergeleridir. Temel göstergeler, basitleştirilmiş çalışmalar için önerilir. Kılavuz, ayrıntılı araştırmalar ve genişletilmiş çalışmalar durumunda diğer yöntemlerin ve etki kategorisi göstergelerinin dahil edilmesi için yönergeler sağlar.

Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (LCIA), envanter analizinde belirlenen envanter verilerinin farklı çevresel etki kategorilerine dönüştürülerek çevresel etkilerin değerlendirilmesini içerir. Toplanan envanter verilerinin yorumlanmasına yardımcı olma amacına hizmet eder. Çalışmanın kapsamanın sistem sınırları dahilinde Çizelge 3.2'deki çevresel göstergelere göre analiz gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.2. Analiz edilen çevresel etki kategorileri (Menouf, 2011)

Etki kategorisi	**Birim**
Abiyotik Tükenme Potansiyeli (Elementler) (ADPE)	kg Sb eşdeğeri
Abiyotik Tükenme Potansiyeli (Fosil yakıtlar) (ADPF)	MJ
Küresel Isınma Potansiyeli (GWP100a)	kg CO_2 eşdeğeri
Ozon Tabakası Tükenme Potansiyeli (ODP)	kg CFC^{-11} eşdeğeri
İnsan Sağlığı Toksisitesi (HT)	kg 1,4-DB eşdeğeri
Tatlı Su Ekotoksisitesi (FAE)	kg 1,4-DB eşdeğeri
Deniz Ekotoksisitesi (MAE)	kg 1,4-DB eşdeğeri
Kara Ekotoksisitesi (TE)	kg 1,4-DB eşdeğeri
Fotokimyasal Oksidasyon (PO)	kg C_2H_4 eşdeğeri
Asitlenme (AC)	kg SO_2 eşdeğeri
Ötrofikasyon (EUT)	kg PO_4^{3-}eşdeğeri

3.2.2.2.IPCC GWP 100a

İklim değişikliği, ekosistem sağlığı, insan sağlığı ve maddi refah üzerinde olumsuz etkiler yaratabilen önemli bir çevresel sorundur. Bu durum, atmosferdeki sera gazı emisyonları ile doğrudan ilişkilidir. İklim değişikliği etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından geliştirilen ve küresel ısınma potansiyelini (Global Warming Potential, GWP) hesaplamaya yönelik standartlara dayanan IPCC karakterizasyon modeli kullanılmaktadır. Bu model, 100 yıllık bir zaman ufkunda Küresel Isınma Potansiyeli (GWP100) değerlerini kg karbondioksit eşdeğeri (kg CO_2 eşdeğer) cinsinden ifade eder ve küresel ölçekte uygulanabilir bir yöntemdir.

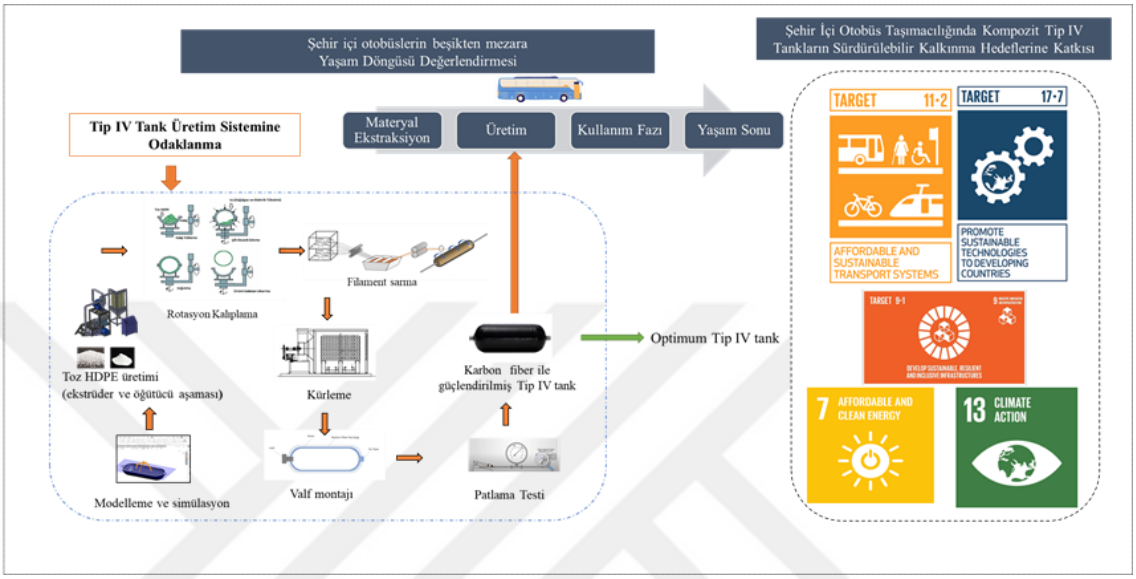
IPCC 2013 yöntemi, IPCC 2007'nin güncellenmiş bir versiyonu olup, hava emisyonlarının küresel ısınma potansiyelini değerlendirmek üzere geliştirilmiştir. Bu yöntem, 20 ve 100 yıllık zaman dilimlerinde iklim değişikliği faktörlerini ele almakla birlikte bazı sınırlamalara sahiptir. Örneğin, dolaylı etkiler (azot emisyonlarından dinitrojen monoksit oluşumu veya CO emisyonlarından CO_2 oluşumu gibi) ve bazı radyatif zorlama etkileri (NOx, su ve sülfat emisyonları gibi) değerlendirmeye dahil edilmez. Ayrıca, normalizasyon ve ağırlıklandırma süreçlerini içermemesi, yöntemin yalnızca doğrudan etkilere odaklandığını göstermektedir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen YDD çalışmasında, iklim değişikliği etkisi önemli bir etki kategorisi olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda, seçilen ürünün iklim değişikliği üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amacıyla, IPCC GWP 100a modeli kullanılmış ve analizler SimaPro yazılımı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yöntemin doğrudan etkilere odaklanması ve dolaylı etkileri dışarıda bırakması, sonuçların sistem sınırları içinde belirgin bir netlik kazanmasını sağlamaktadır.

3.2.3. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesine göre sistem sınırları

Tez kapsamında, CNG ve hidrojen depolamaya yönelik Tip IV yakıt tank prototip üretim proses akışına istinaden kapsam ve sınırlar belirlenmiştir. Üretilmesi amaçlanan tank karbon fiber sargılı ağır sınıf araçlar için Tip IV tank olarak seçilmiştir. Çalışmada CNG

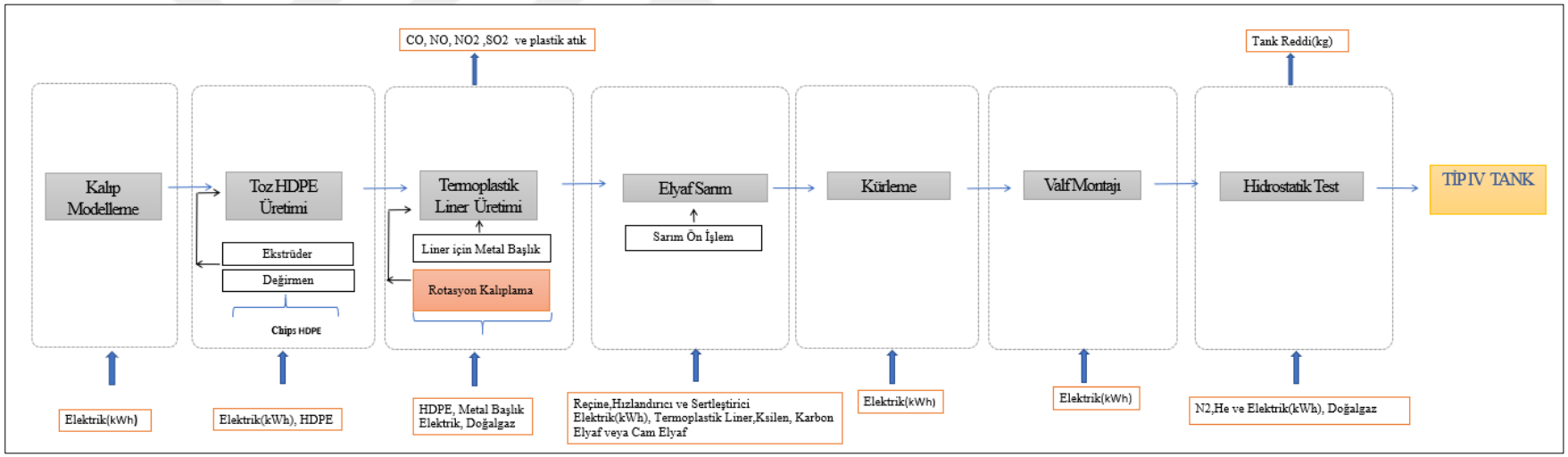
ve hidrojen depolamaya yönelik Tip IV tank YDD'si, işlevsel birim olarak 1 adet bitmiş tank kabul edilmiştir. Üretilen optimum ürün daha sonra bir şehir içi otobüste kullanımı modellenmiş ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışma için sistem sınırları Şekil 3.4'te verilmiştir.



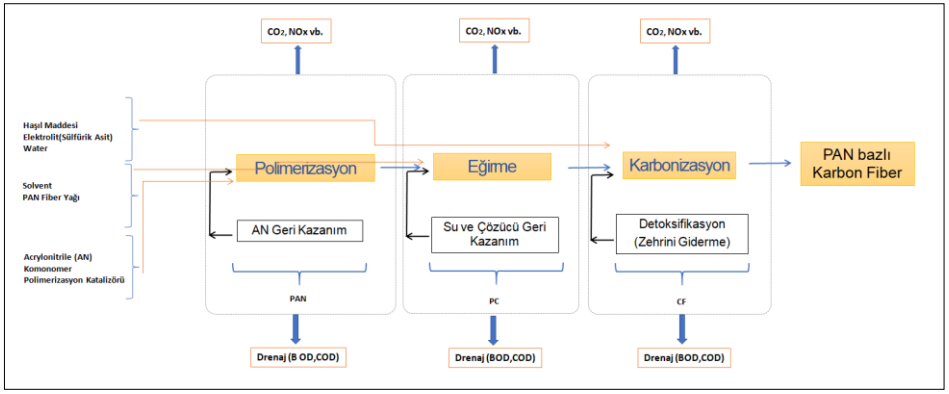
Şekil 3.4. Şehir içi otobüslerin ve Tip IV karbon fiber tanklarının üretiminin yaşam döngüsüne odaklı sistem sınırı

Araştırmada kapıdan kapıya Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi için Tip IV tankın üretim prosesleri detayları Şekil 3.5'te verilmiştir. Tank üretim aşaması için ilgili proses akışı doğrultusunda envanter analizi gerçekleştirilmiştir.

Karbon elyaf için sistem sınırları, bütünlük ve temsiliyetinin ayrıca ele alınması gerekmektedir. Çünkü karbon elyaf üretimi mevcut ecoinvent veri tabanında bulunmamaktadır. Bu nedenle, The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association'ın 2022'de yayınladığı "Overview of LCI data for carbon fiber" raporundaki karbon elyaf üretim verilerinden faydalanılmıştır. Raporda analiz edilen ürünlerin üretim hacmi, dünya çapında PAN bazlı karbon fiberlerin toplam üretim hacmini tam olarak yansıtmasa da ele alınan ürünler karbon fiber pazarının önemli bir kısmını temsil etmektedir (Şekil 3.6). Bu ürünler, havacılık ekipmanı ve otomotiv uygulamaları gibi büyük karbon fiber pazarlarına tedarik edilmektedir. Bu nedenle, raporda sunulan veriler, karbon fiber pazarındaki genel eğilimleri yansıtan güçlü bir temsiliyet sağlayacak şekilde modellenmiştir.



Şekil 3.5. Tip IV tank üretim akışı



Şekil 3.6. PAN tabanlı karbon fiber üretim süreci ve sistem sınırları (The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association Raporu, 2022)

Şekil 3.6. PAN (Poliakrilonitril) bazlı karbon fiber (CF) üretim sürecini detaylı bir şekilde göstermektedir. Bu üretim süreci, üç ana adımdan oluşmaktadır: polimerizasyon, eğirme ve karbonizasyon. Bu bağlamda, veriler "polimerizasyon sürecinden eğirme sürecine" ve "karbonizasyon süreci" olarak iki ayrı aşamada açıklanmıştır. Sonuç olarak, veriler bu ayrım dikkate alınarak derlenmiş ve sunulmuştur (The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association Raporu, 2022).

3.2.4. Envanter Verilerinin Toplanmasında İzlenen Yöntemler

3.2.4.1. Proses üretim verilerinin toplanmasında izlenen yöntem ve envanter

Ürün temelde sarımdan önce ve sonrası olmak üzere iki tabakadan oluşmaktadır. İlk tabakayı termoplastik yüzey oluştururken ikinci tabakayı elyaf ve reçine karışımı oluşturmaktadır. Ardından kürleme yapılır ve teknik yeterlilik için testler gerçekleştirilmiştir. Bir diğer taraftan optimum ürünün seçilmesiyle birlikte şehir içi otobüs kullanım senaryosu üzerinden ilerlenmiştir.

ISO 14044 standardı doğrultusunda sistem sınırları belirlenmiştir. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi otobüs senaryosu, "beşikten mezara" yaklaşımıyla ele alınırken, tank prototip üretimlerinin karşılaştırılması "beşikten kapıya" yaşam döngüsü değerlendirmesi yaklaşımıyla incelenmiştir. Şekil 3.5'te sunulan proses akışına göre girdi ve çıktılar tanımlanmış, ardından bu çerçevede veriler toplanmıştır.

Çalışmada, üretime ait veriler doğrudan ölçüm yapılarak elde edilmiş, ancak referans akışa ilişkin bazı noktalarda anlık sayaç bulunmaması nedeniyle tahsisat yöntemiyle değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Tip IV tankların otobüslerde kullanımı ve yaşam boyu analizi için ikincil verilere başvurulmuştur. Veri kalitesi gereksinimleri kapsamında, üretim süreçlerinde Tamamlanma Kontrolü (Completeness Check) ve Tutarlılık Kontrolü (Consistency Check) uygulanmıştır. Prosesin incelenmesi ve firmanın üretim aşamasında doğrudan şebekeden doğalgaz ve elektrik kullanması nedeniyle mevcut durumda bölüştürme prosedürüne gerek duyulmamıştır. Ayrıca, yaşam döngüsü analizi kapsamında, tüm prototip üretimi boyunca kullanılan girdiler ve çıktılar detaylı bir şekilde belgelendirilmiştir.

Çizelge 3.3. Veri kaynaklarının özeti

Süreç	Envanter	Envanter Kaynağı
Malzemeler	Otobüs üretiminde kullanılan malzemeler (tankta kullanılan karbon fiber ve plastik astar hariç bu veriler üretilen prototip verilerinden alınmıştır)	Sundvor, 2013
Malzemeler	Karbon elyaf üretim envanteri	The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association Raporu, 2022
Üretim	Üretimde tüketilen enerji ve fonksiyonel birim belirlenmesi	MAN Truck & Bus SE, EPD raporu, 2022
Üretim	Otobüste tank adeti ve çelik tank senaryosu hesaplaması	Milojević ve Pešić, 2010; Posada ve Lowell 2009
Üretim	Şirket içi parça, araç üretimi ve nakliye	Sundvor, 2013
Tip IV Tank Üretim	Metal Başlık (g)	Doğrudan Öçlüm
	Termoplastik Astar Ağırlığı (g)	Doğrudan Ölçüm
	Reçine (g)	Doğrudan ölçüme dayalı hesaplama
	Sertleştirici (g)	Doğrudan ölçüme dayalı hesaplama
	Hızlandırıcı (g)	Doğrudan ölçüme dayalı hesaplama
	Sargı Elektrik Tüketimi (kWh)	Doğrudan Ölçüm
	Kullanılan Elyaf Miktarı (g)	Doğrudan ölçüme dayalı hesaplama
	Makinede Okunan Elyaf Uzunluğu (m)	Doğrudan Ölçüm
	Sarılmış Tank (g)	Doğrudan Ölçüm
	Kürleme Elektrik Tüketimi (kWh)	Doğrudan Ölçüm
Kullanım Fazı	İşletme emisyonları, bakım	Sundvor, 2013
Yaşam Sonu	Transit araç için bertaraf envanteri	Sundvor, 2013

3.2.5. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi (YDEA) aşaması

3.2.5.1. Yaşam Döngüsü Envanteri Analizi: Karbon elyaf envanteri

Karbon elyaf üretimi, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık özellikleri nedeniyle çeşitli endüstrilerde geniş kullanım alanı bulmaktadır. Bu çalışmada, PAN (Polyacrylonitrile) bazlı karbon fiberlerin üretim süreçlerine odaklanılmıştır. Özellikle 230-250 GPa elastik modülü ve 12k ila 24k filament sayılarına sahip yüksek mukavemetli elyaflar incelenmiştir. YDD uygulanarak karbon fiber üretiminin çevresel etkileri belirlenmiştir. Üreticilerin, karbon fiberin nihai özelliklerinin manipülasyonuna karşı tutumları ve işletme verilerini paylaşmada oldukça hassas olmaları nedeniyle ikincil veri kullanılmıştır. "The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association" tarafından Ekim 2022 tarihinde yayımlanan ve 2017 yılının 12 ayına ait fiili üretim verilerine dayanmaktadır. SimaPro'da modellenen karbon fiber üretimi için fonksiyonel birim, 1 kg karbon fiber temelinde hesaplanmıştır. Veri kaynağında birim süreç verileri, "Kapıdan-Kapıya" yaklaşımıyla toplanmış ve hesaplanmıştır. Buna karşın, hammadde geriye doğru izleme yoluyla elde edilen yaşam döngüsü envanteri verileri, "Beşikten-Kapıya" yaklaşımıyla toplanmış ve hesaplanmıştır. Bu nedenle, ürün sevkiyatında kullanılan taşıma ve ambalaj malzemeleri hesaplamalara dahil edilmemiştir. Enerji tüketimi ve su kullanımından dolayı, su çekimi, tahliyesi ve transferi için gereken enerji, toplam enerji tüketimine dahil edilmiştir.

Tüm bu varsayımlar ve süreçler, ISO 14044 standardına uygun olarak incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen veriler, karbon fiber üretim süreçlerinin optimize edilmesine ve çevresel etkilerinin azaltılmasına yönelik önemli bilgiler sağlamaktadır. PAN bazlı CF üretim için alt sistem girdi ve çıktıları sırasıyla Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Alt sistem girdi verileri

Kaynak Adı	Değeri	Birim	Açıklama
Ham Petrol	0,546	lt	Doğal kaynakların çıkarılmasından karbon fiber üretimine kadar tüm süreçlerde tüketilen yakıtların ham petrol cinsinden gösterimi ve enerji tüketimi.
Doğal Gaz	2,463	m^3	Doğal gazdan elde edilen doğal kaynakların madenciliğinden karbon fiber üretimine kadar gerekli tüm enerji tüketimi
Kömür	6,354	kg	Doğal kaynakların çıkarılmasından CF üretimine kadar tüm süreçlerde tüketilen kömürü ifade etmektedir.
Sıvılaştırılmış Doğal Gaz	0,260	kg	LNG'nin karbon fiber üretiminde tüketildiği miktar ve gereken enerji tüketimi.
Doğal Gaz Likitleri	4,393	µg	Karbon fiber üretiminde tüketilen NGL ve gereken enerji tüketimi.
Ham Petrol	3,128	lt	Hammadde girdisi olarak karbon fiber üretiminde kullanılan ham petrol miktarı, enerji tüketimi ve emisyonların hesaplanması.
Doğal Gaz	0,156	m^3	Karbon fiber üretiminde kullanılan doğal gaz girdisi, enerji tüketimi ve emisyonların hesaplanması.
Kömür	0,015	kg	Hammadde girdisi olarak kullanılan kömür miktarı, enerji ve emisyon hesaplarıyla birlikte.
Deniz suyu	0,161	kg	Endüstriyel tuz girdisi için kullanılan deniz suyu miktarı ve ithalat süreci dahil enerji/emisyon hesapları.
Sönmemiş Kireç	0,009	kg	Sönmemiş kireç girdisi miktarı; enerji/emisyonlar
Buhar	0,011	kg	Karbon fiber üretiminde buhar girdisi olarak kullanılan miktar; enerji tüketimi ve emisyonların hesaplanması.
Hava	13,905	kg	Buhar girdisi olarak kullanılan hava miktarı; enerji tüketimi ve emisyonların hesaplanması.
Çözücüler	0,093	kg	Karbon fiber üretiminde kullanılan solventlerin miktarı; enerji/emisyonların hesaplanması.
Proses Suyu	2,712	kg	Karbon fiber üretimindeki proses suyu miktarı; enerji ve emisyonların hesaplanması.
Geri Kazanılmış Kükürt	0,052	kg	Petrol arıtma işleminin yan ürünü olan geri kazanılmış kükürt

Not: Veri toplama yöntemi, ikincil ölçüm ve hesaplamanın bir kombinasyonudur. The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association,2022 verilerinden dönüştürülmüştür.

Çizelge 3.5. Alt sistem çıktı verileri

Kaynak Adı	Değeri	Birim	Açıklama
CO_2	19,849	kg	1 kg CF üretimi için tüm yaşam döngüsünün (kaynak madenciliğinden CF üretimine kadar) toplam değeri.
NOx	0,0353	kg	
SOx	0,0161	kg	
Katı Atık	0,157	kg	CF üretiminde boşaltılan katı atık, başlangıç malzemesinden kümülatif bir değer olarak gösterilir.

Not: Veri toplama yöntemi, ikincil ölçüm ve hesaplamanın bir kombinasyonudur.

3.2.5.2.Yaşam Döngüsü Envanteri Analizi: Tip IV yakıt tankı

Bu bölümde 12 lt (A) ve 63 lt (B) hacme sahip HDPE astara karbon elyaf sarım denemelerin envanter analizi yer almaktadır. Yapılan prototip tank üretiminde yer alan ortak süreçler için envanter verileri Çizelge 3.6'da sunulmuştur.

Çizelge 3.6. Prototip denemeleri için ortak süreçlerin envanteri

Prototip Çalışma Adı	A1-A9	A10, A11	B1-B9
Kalıp Modelleme Elektrik Tüketimi (kWh)	0,08		0,08
Ekstrüder Elektrik Tüketimi (kWh)	80 (100 kg HDPE için)		80 (100 kg HDPE için)
Değirmen Elektrik Tüketimi (kWh)	8,8 (100 kg HDPE için)		8,8 (100 kg HDPE için)
Metal Başlık Ağırlığı (g)	1200		2500
Rotasyon Kalıplama Elektrik Tüketimi (kWh/kg)	1,67		1,67
Rotasyon Kalıplama Doğalgaz Tüketimi (m^3/kg)	0,65		0,65
Rotasyon Kalıplama Bacagazı Emisyonları (gr)	CO: 21,2		CO: 21,2
	NO: 6,1		NO: 6,1
	NO_2: 9,7		NO_2: 9,7
	SO_2: 3,9		SO_2: 3,9
	PM (Partikül Madde): 0,7		PM (Partikül Madde): 0,7
Termoplastik Astar Ağırlığı (g)	1750		5750
Kürleme Fırını Elektrik Tüketimi (kWh)	85,294	79,938	79,938

Ticari olarak kullanılan CNG veya hidrojen depolama için Tip IV tanklar, 200 bar ile 700 bar arasında basınca dayanıklılık sergiler (Azeem ve ark., 2022; Hua ve ark., 2010; Hua ve ark., 2017; Saferna, 2021; Sengir, 2009). Çalışmada, sarım denemeleri 200-470 bar arasındaki basınç dayanımı temel alınarak incelenmiştir. YDD karşılaştırma çalışmasında, tank üretim aşamasındaki sarımda birincil veri kullanılmıştır. 12 litre hacmindeki tank üretimi için 11 farklı sarım 63 litre hacmi için 9 farklı prototip üretimi üzerinde çalışılmıştır.

Sarım denemelerinde, fiber olarak 12k ve 24k sürekli karbon fiberler kullanılmıştır. Karbon fiberin tex ağırlığı 800-1650 g/km'dir. Karbon fiber için ikincil veriler kullanılmıştır. Karbon fiberin çevresel etkileri önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir (EuCIA, 2020; Hohmann, 2018; Ramachandran ve ark., 2023). Bu nedenle, çevresel etkiler Japon Karbon Fiber Üreticileri Derneği'nin (2022) yaşam döngüsü envanteri kullanılarak SimaPro'da değerlendirilmiştir.

Çalışmada üretim avantajları nedeniyle rotasyon kalıplama tercih edilmiştir (Motaharinejad ve ark., 2021; Villalonga ve ark., 2011; Wang ve ark, 2022). Bu çalışmada kullanılan rotasyon kalıplama, elektrik ve doğalgaz tüketimini içermekte olup, üretim süreci ile ilişkili emisyonlar analizde dikkate alınmıştır. Astar üretiminin ardından, reçine karışımı ve karbon fiberin önemli hammadde girdileri olduğu sarım aşamasına geçilmiştir. Çalışmada, epoksi reçine, sertleştirici ve hızlandırıcı sırasıyla 100:90:3 oranında kullanılmıştır.

Çizelge 3.7'de 12 litrelik ve Çizelge 3.8'de 63 litrelik hacme sahip astar üzerinde üretilen prototiplere ait sarım denemelerinin envanter analizi sunulmuştur**.** Çevresel araştırmalar, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde karbon fiberin en önemli girdi olduğunu göstermektedir. Karbon fiber üretimi enerji yoğun bir süreç olup yüksek seviyede karbon dioksit emisyonlarına neden olmaktadır (Dér ve ark., 2021; Miotti ve ark., 2015; Shioya ve Kikutani, 2015). Karbon fiber üretim sürecindeki en önemli çevresel etkiler, akrilonitrilin polimerizasyonu, stabilizasyonu ve karbonizasyonundan kaynaklanmaktadır. Özellikle karbonizasyon aşamasında, süreç yaklaşık 750°C ve 1500°C olmak üzere iki sıcaklık aşamasında, azot dolu inert bir atmosferde gerçekleşir (Benitez ve ark., 2020). Dolayısıyla toplam harcanan elyaf miktarını ölçmemiz önemli

bir parametredir. Sarım açısı ve tipindeki değişim sarım süresini ve sarılan karbon elyaf miktarını etkileyebilmektedir. Bu nedenle de her denemeye ait sarım süreleri envantere dahil edilmiş ve buna bağlı elektrik ölçümleri hesaplanmıştır. Standart şekilde üretilen HDPE astara metal başlık takılmasının ardından sarım denemelerine hazır hale getirilirler. 12 litre hacmi için sarılmamış tank ağırlığı 1795 gr olarak ölçülmüştür. Bu ağırlığın 1200 gr'lık kısmını metal başlık oluşturmaktadır. Metal başlık proses üretim hattında yer almayıp tedarik edilmektedir. Aynı şekilde 63 litre için astar ağırlığı 5750 gr ve metal başlık ağırlığı 2500 gr olarak ölçülmüştür.

Hopia (2021), termoset matrislerinin kalıcı katı forma dönüşme sürecini "kürleme" olarak tanımlamış ve bu sürecin üç aşamada gerçekleştiğini belirtmiştir: jelleşme (gelation), kürleme (curing) ve sonrası kürleme (post-curing). Kürleme reaksiyonunun stokiyometrisi çok önemlidir; yetersiz sertleştirici veya yetersiz karışım, tam olarak kürlenmemiş alanlara yol açabilir. Araştırmada, 80°C'de 1 saat ve 120°C'de 4 saat kürleme koşulları incelenmiştir. Gul ve ark. (2023), kademeli kürleme süreci elde etmek için UV lambası kullanarak temiz ve tutarlı bir sarım deseni elde etmişlerdir. Çalışmalarında, 85°C'de 2 saat termal ısıtma uygulanmıştır. Ek olarak Liang ve ark. (2023), karbon fiber kompozit basınç kaplarının performansının kürleme rejimine bağlı olduğunu vurgulamıştır. Kürlemenin enerji yoğun bir süreç olduğu dikkate alındığında, tez kapsamında A1'den A9 denemesine kadar 120°C, 3 saat şartlarında A10, A11 ve B prototipleri için 85°C,5 saat şartlarında kürleme gerçekleştirilmiştir**.**

Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8, 12 litrelik ve 63 litrelik tank prototiplerinin sarım denemelerine ait envanter verilerini göstermektedir. Çizelgelerde her bir prototip için reçine sistemi miktarı, sarım sırasında tüketilen elektrik, karbon fiber tex ağırlığı, makinede okunan fiber uzunluğu, kullanılan fiber ağırlığı ve sarılmış tank ağırlığı gibi YDD için gerekli temel veriler sunulmuştur. Veriler, reçine miktarı ve sarım enerji tüketiminin, tank prototiplerinin toplam ağırlığına ve kullanılan karbon fiber miktarına olan etkisini analiz etmeyi sağlamaktadır. Özellikle karbon fiberin önemli bir çevresel yük oluşturduğu göz önüne alındığında, kullanılan fiber miktarı ve sarım sonrası tank ağırlığındaki farklılıklar çevresel etkiler açısından kritik rol oynamaktadır.

Bu bölüm her bir prototipin üretim sürecinde kullanılan kaynakların, enerji tüketiminin ve çıktıların sistematik bir karşılaştırmasını yapmak için zemin oluşturur. Bu veriler, farklı üretim senaryolarının çevresel etkilerinin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine katkı sağlamıştır.

Çizelge 3.7. 12 litre kapasiteli Tip IV yakıt tankı için Yaşam Döngüsü Envanter Analizi

Prototip Üretim Adı	Reçine Sistemi Miktarı (g)	Sarım Elektrik Tüketimi (kWh)	Karbon Fiber Tex Ağırlığı (g/km)	Makinede Okunan Fiber Uzunluğu (m)	Kullanılan Fiber Ağırlığı(g)	Sarılmış Tank Ağırlığı (g)
A1	190	2,084	800	488	390,4	2375
A2	251	5	800	1049	839,2	2885
A3	769	7,5	800	1287	1029,6	3594
A4	800	5	800	1049	839,2	3434,2
A5	360	5	800	1012	809,6	2965
A6	585	3,34	800	1067	853	3234
A7	560	3,34	800	1067	853	3208
A8	1380	3,34	800	494,4	395,52	5310
A9	1380,8	3,34	800	494,4	395,52	5311
A10	549	10	800	1186,2	948,96	3293
A11	694	7,5	800	1186,2	948,96	3438

Çizelge 3.8. 63 litre kapasiteli Tip IV yakıt tankı için Yaşam Döngüsü Envanter Analizi

Prototip Üretim Adı	Reçine Sistemi Miktarı (g)	Sarım Elektrik Tüketimi (kWh)	Karbon Fiber Tex Ağırlığı (g/km)	Makinede Okunan Fiber Uzunluğu (m)	Kullanılan Fiber Ağırlığı(g)	Sarılmış Tank Ağırlığı (g)
B1	570,8	17,5	800	4834	3867,2	12688
B2	1954,4	17,5	800	4847	3877,6	14082
B3	1779	17,5	800	4847	3877,6	13907
B4	6246	23,34	800	12155	9724	24220
B5	6726	20,84	800	12155	9724	24700
B6	6669	16,67	1650	5164	8521	23440
B7	7149	16,67	1650	5164	8521	23920
B8	7299	20	1650	5073	8371	23920
B9	6109,55	20	1650	5073	8370,45	22730

3.2.5.3.Yaşam Döngüsü Envanteri Analizi: Tip IV tank kullanan şehir içi otobüs

Tip IV tankların şehir içi otobüslerde kullanımı için bir senaryo oluşturulmuş ve ikincil verilerle desteklenen bir YDD modeli geliştirilmiştir. Tip IV tankının katkısını belirlemek için, otobüs bileşenlerinin üretimi, montajı, kullanım sırasındaki emisyonlar, bakım ve bertaraf süreçleri dikkate alınarak bir şehir içi otobüs değerlendirilmiştir. Sandavor (2013), MAN Truck & Bus SE (2022) ve Dlamini ve ark. (2011) tarafından rapor edilen çalışmalara dayanan otobüs üretimi, kullanımı ve bertaraf senaryosunda, otobüs 1,300,000 km ömür için tasarlanmış ve fonksiyonel birim olarak yolcu kilometre (124,800,000 yolcu x km) başına değerlendirilmiştir. 1162 kg kerb ağırlığına ve 96 yolcu kapasitesine sahip ve aracın tavanında 63 litrelik 16 adet tankta 200 bar basınçta CNG depolanmaktadır. Bu doğrultuda oluşturulan envanter Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Otobüsün beşikten kapıya üretim envanteri

Materyal Adı	Miktar	Birim	Ecoinvent Veri Seti
Çelik	2,32E-05	kg	Steel, unalloyed {RoW}| steel production, converter, unalloyed | Alloc Def, U
Demir	9,56E-05	kg	Cast iron {GLO}| market for | Alloc Def, U
Alüminyum	1,39E-05	kg	Aluminum ingot, production mix, at plant/US
Kurşun	7,42E-07	kg	Lead {GLO}| market for | Alloc Def, U
Bakır	4,55E-06	kg	Copper {GLO}| market for | Alloc Def, U
Termoplastikler	4,55E-06	kg	Polyvinylidenchloride, granulate {GLO}| market for | Alloc Def, U
Kauçuk	3,33E-06	kg	Synthetic rubber {GLO}| market for | Alloc Def, U
Cam	4,03E-06	kg	Flat glass, uncoated {GLO}| market for | Alloc Def, U
Boya	2,47E-07	kg	Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RER}| acrylic varnish production, product in 87.5% solution state | Alloc Def, U
Bitüm	4,45E-07	kg	Bitumen, at refinery/kg/US
Proses Elektrik Tüketimi	0,0015	kWh	Electricity, medium voltage {TR}| market for | Alloc Def, U)
Kompozit Tip IV Tank	2,95E-06	kg	Composite Type 4 Tank(B9)

Çizelge 3.10, CNG kullanan otobüsün kullanım süresi boyunca salınan emisyonları göstermektedir. Karbon dioksit en yüksek emisyon kaynağı ikSen, azot oksitleri, metan,

partiküller ve ağır metaller gibi diğer emisyonlar daha düşük seviyelerdedir. Ecoinvent veri setine dayalı bu veriler, CNG'li otobüslerin çevresel etkilerini değerlendirmede önemli bir temel sağlar.

Çizelge 3.10. Otobüsün kullanım süresi boyunca emisyon envanteri

Emisyon Kaynağı	**Miktar**	**Birim**	**Ecoinvent Veri Seti**
Karbon dioksit	0,0067	kg	Carbon dioxide
Kükürt dioksit	3,83E-08	kg	Sulfur dioxide
Kadmiyum	7,96E-11	kg	Cadmium
Bakır	11,93E-10	kg	Copper
Krom	7,16E-10	kg	Chromium
Nikel	6,37E-10	kg	Nickel
Çinko	6,40E-08	kg	Zinc
Kurşun	3,97E-10	kg	Lead
Karbon monoksit	1,75E-05	kg	Carbon monoxide
Azot oksitleri	8,07E-07	kg	Nitrogen oxides
Partiküller, < 2.5 um	3,51E-08	kg	Particulates, < 2.5 um
Partiküller, > 2.5 um ve < 10um	1,40E-07	kg	Particulates, > 2.5 um, and < 10um
Partiküller, > 10 um	8,13E-07	kg	Particulates, > 10 um
NMVOC, metan dışı uçucu organik bileşikler, belirtilmeyen kaynak	4,11E-07	kg	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin
Metan, fosil	1,77E-06	kg	Methane, fossil
1-(1,1-Dimetilhetil)-2-metilbenzen	2,99E-08	kg	1-(1,1-Dimethylethyl)-2-methylbenzene
Toluen	2,06E-07	kg	Toluene
Ksilen	2,11E-07	kg	Xylene
Amonyak	1,35E-06	kg	Ammonia
Dinitrojen monoksit	3,4E-08	kg	Dinitrogen monoxide

Çizelge 3.10. Otobüsün kullanım süresi boyunca emisyon envanteri (devamı)

Emisyon Kaynağı	Miktar	Birim	Ecoinvent Veri Seti
PAH, polikiklik aromatik hidrokarbonlar	4,20E-11	kg	PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons
Çinko, iyon	4,72E-08	kg	Zinc, ion
Bakır, iyon	8,80E-10	kg	Copper, ion
Kadmiyum, iyon	5,88E-11	kg	Cadmium, ion
Atık Isı	0,133	MJ	Heat Waste

Çizelge 3.11. Otobüsün kullanım süresi boyunca bakım onarım envanteri

Materyal Adı	Miktarı	Birim	Ecoinvent Veri Seti
Takviye Çeliği	4,57E-07	kg	Reinforcing steel {RER}| production | Alloc Def, U
Polietilen	2,40E-08	kg	Polyethylene, high density, granulate {GLO}| market for | Alloc Def, U
Sentetik Kauçuk	1,67E-06	kg	Synthetic rubber {GLO}| market for | Alloc Def, U
Hafif Fuel Oil	0,0003	kg	Light fuel oil {RoW}| market for | Alloc Def, U
Musluk Suyu	0,0040	kg	Tap water, at user {RoW}| market for | Alloc Def, U
Yağlama Yağı	1,08E-05	kg	Lubricating oil {GLO}| market for | Alloc Def, U
Kurşun	1,52E-07	kg	Lead {GLO}| market for | Alloc Def, U

Çizelge 3.11, otobüsün kullanım süresi boyunca bakım ve onarım faaliyetlerinde kullanılan materyallerin verilerini sunmaktadır. Takviye çeliği, sentetik kauçuk, polietilen, yağlama yağı gibi maddeler başta olmak üzere çeşitli malzemeler düşük miktarlarda kullanılmıştır.

Çizelge 3.12'de, otobüsün bertaraf senaryosuna ilişkin veriler sunulmuştur. Burada, plastik atık, cam, emülsiyon boya, kullanılan madeni yağ ve alüminyum gibi atıkların bertarafı, municipal incineration (belediye atık yakma tesisi) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu bertaraf tipi, atıkların belediye düzeyindeki yakma tesislerinde işlenmesini ve yakılmasını esas almaktadır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

çerçevesinde atık yönetimi süreçlerinin bu şekilde belirlenmiş olması, genel çevresel etkiyi dikkate alındığında, iyileştirme alanlarına yönelik bir değerlendirme yapmayı gerekli kılmaktadır. Genel olarak araç bertarflarına ilişkin belediye atık yakma yönteminin kullanılması, sınırlı geri dönüşüm imkânları sunmasının yanı sıra, çevresel yükümlülüklerin yerine getirilmesi açısından sürdürülebilirlik için optimizasyon alanları sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

Çizelge 3.12. Otobüsün bertaraf senaryosu envanteri

Materyal Adı	Miktarı	Birim	Ecoinvent Veri Seti
Nakliye (21 t, kamyon)	0,000000144	tkm	Municipal waste collection service by 21 metric ton lorry {GLO}| market for | Alloc Def, U
Plastik Atık Berterafı	0,00000553	kg	Waste plastic, mixture (waste treatment) {CH}| treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration | Alloc Def, U
Cam Atık Berterafı	0,00000112	kg	Waste glass (waste treatment) {CH}| treatment of waste glass, municipal incineration | Alloc Def, U
Emülsiyon Boya Berterafı	0,00000012	kg	Waste paint (waste treatment) {CH}| treatment of waste paint, municipal incineration | Alloc Def, U
Kullanılmış Madeni Yağ Berterafı	0,000000361	kg	Hazardous waste, for incineration (waste treatment) {RoW}| treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration | Alloc Def, U
Alüminyum Berterafı	0,000000256	kg	Scrap aluminium (waste treatment) {RoW}| treatment of scrap aluminium, municipal incineration | Alloc Def, U

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, karbon elyaf üretimi, Tip IV tank prototip üretim süreçleri ve bu süreçlerin alt aşamaları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, üretim sonuçları ve prototiplerden seçilen optimum ürün olarak belirlenen Tip IV tankın şehir içi otobüslerdeki kullanımı üzerine yapılan YDD sonuçlarına yer verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında YDD analizinde en kritik girdilerden biri karbon elyaftır. Ancak, Ecoinvent V3 veri tabanında karbon elyafın envanterinin bulunmaması, ilk adım olarak ikincil veri kullanımıyla bir model oluşturulmasını gerektirmiştir. Bu model üzerinden yapılan analizler, karbon elyaf üretiminin çevresel etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir.

İkinci adımda 12 ve 63 litrelik üretilen 20 adet prototip modelin çevresel etkiler ve patlama dayanımı kriterleri açısından detaylı bir şekilde analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, çevresel sürdürülebilirlik ve patlama direnci açısından en uygun ürün belirlenmiştir. Son adımda bu optimum ürünün şehir içi otobüslerdeki kullanımı, yaşam döngüsü perspektifinden değerlendirilmiştir. Otobüslerde üretim, kullanım ve bertaraf aşamaları incelenirken Tip IV tank odağında ekolojik etkileri ve kullanım aşamalarındaki çevresel yükleri dikkate alınarak, detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu sonuçlar, Tip IV tankların şehir içi ulaşımda sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilmesi açısından önemli bulgular sunmuştur.

4.1. Karbon Elyaf Üretiminin Beşikten Kapıya Çevresel Etki Değerlendirmesi

Envanter çalışması ve modellemeler ardından SimaPro yazılımı kullanılarak seçilen ürün için Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. CML metodunda seçilen etki kategorilerine göre hesaplanan karakterizasyon faktörleri sonuçları Çizelge 4.1'deki gibi analiz edilmiştir.

Etki kategorilerinin karakterizasyon faktörlerinin envanter kapsamında oluşturulan proseslerin etkilerine göre incelemesi Şekil 4.1'deki diyagramda gerçekleştirilmiştir. Buna göre her bir proses girdisinin hangi etki kategorisine ne oranda etki ettiği incelenmiştir.

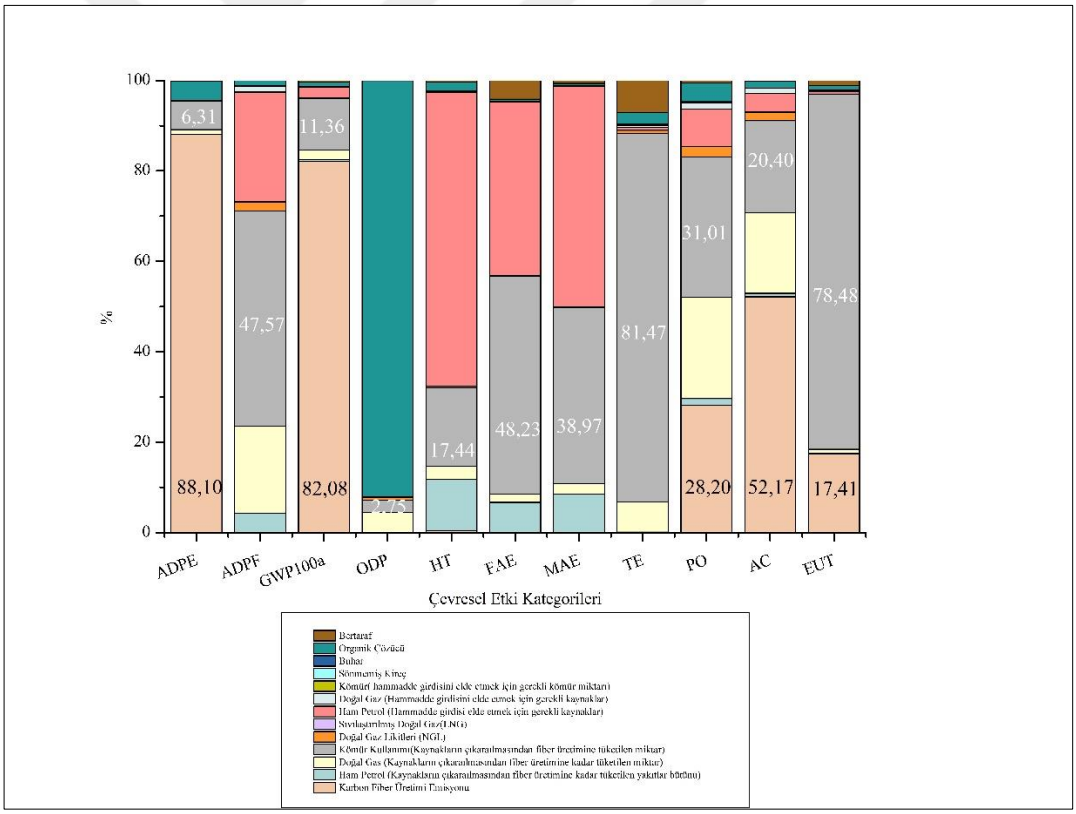
Çizelge 4.1. CML Baseline YDD Etki kategorileri karakterizasyon sonuçları

Etki Kategorisi	**Birim**	**Kategori Göstergesi (Değeri)**
Küresel Isınma (GWP100a)	kg CO_2 eq	24,2
İnsan SağlığıToksisitesi	kg 1,4-DB eq	11,51
Asidifikasyon	kg SO_2 eq	0,07
Ötrofikasyon	kg $PO4^{3-}$eq	0,026
Fotokimyasal Oksidasyon	kg C_2H_4 eq	0,003
Abiyotik Tükenme	kg Sb eq	0,0000114
Karasal Ekotoksisite	kg 1,4-DB eq	0,002
Denizsuyu Ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eq	20499,69
Tatlı Su Ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eq	7,084
Ozon Tabakasının İncelmesi	kg CFC^{-11} eq	0,0000015
Abiyotik Tükenme (fossil fuels)	MJ	478,84

Tez kapsamında üretilen ürünün alt hammaddesi olan karbon fiber üretim girdisinden dolayı oluşan abiyotik tükenme ve küresel ısınmada en fazla çevresel etki, karbon fiber üretiminin beşikten kapıya olan emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Abiyotik tükenmede yaklaşık %88,10 ve küresel ısınmada %82,08 etki ettiği görülmektedir. Ardından asidifikasyon (%52,17), fotokimyasal oksidasyon (%28,20) ve ötrofikasyon (%17,41) gelmektedir.

24,2 kg CO_2 eşdeğeri küresel ısınma potansiyeli, karbon elyaf üretim sürecinde ortaya çıkan sera gazı emisyonlarının bir sonucudur. Bu emisyonlar, büyük ölçüde üretim aşamalarında kullanılan enerji kaynaklarından, özellikle de fosil yakıtların yanmasından kaynaklanmaktadır. Karbon elyaf üretimi enerji yoğun bir süreçtir ve bu nedenle yüksek küresel ısınma potansiyeli değerlerine sahiptir (Prenzel ve ark., 2023). Üretimdeki fosil yakıt kullanımının azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, bu etkinin azaltılmasına katkı sağlayabilir (Benitez ve ark., 2021). Abiyotik tükenme potansiyeli (fosil yakıtlar) 478,84 MJ olarak bulunmuştur. Karbon elyaf üretimi için tüketilen enerji miktarını gösterir. Üretimde fosil yakıtların yoğun kullanımı, bu etkinin yüksek çıkmasına neden olmuştur. 0,07 kg SO_2 eşdeğeri değerindeki asidifikasyon potansiyeli, üretim sürecinde salınan kükürt dioksit (SO_2) ve diğer asit oluşturan gazlardan kaynaklanır. Bu gazlar, fosil yakıtların yanması sırasında ortaya çıkar. Enerji tüketiminde kullanılan yakıt türünün değişimi veya emisyon azaltıcı teknolojilerin uygulanması,

asidifikasyon potansiyelini düşürebilir. 11,51 kg 1,4-DB eşdeğeri değerindeki insan sağlığı toksisitesi, karbon elyaf üretiminde özellikle ham madde işleme ve polimerizasyon aşamalarında kullanılan maddelerle ilgilidir. Ayrıca, üretim sürecinde gerçekleşen kimyasal dönüşümler, önemli miktarda zararlı emisyonların oluşmasına yol açmaktadır. Elyafların kütlesi, işlem sırasında öncü maddeden karbon elyafa dönüştürülürken yaklaşık %50 oranında azaldığından, bu süreçte karbon monoksit, karbon dioksit, hidrojen siyanür ve amonyak gibi tehlikeli gazlar salınmaktadır. Atık gazların arıtılması, en zehirli bileşenlerin azaltılmasına yardımcı olabilir, ancak sera gazları gibi genel emisyonlar artmaya devam etmektedir. Bu durum, sürecin çevresel etkilerini daha da ağırlaştırmaktadır (Groetsch ve ark., 2021). Kimyasalların daha güvenli alternatiflerle değiştirilmesi veya emisyon kontrol teknolojilerinin iyileştirilmesi, bu etkinin azaltılmasına yardımcı olabilir.



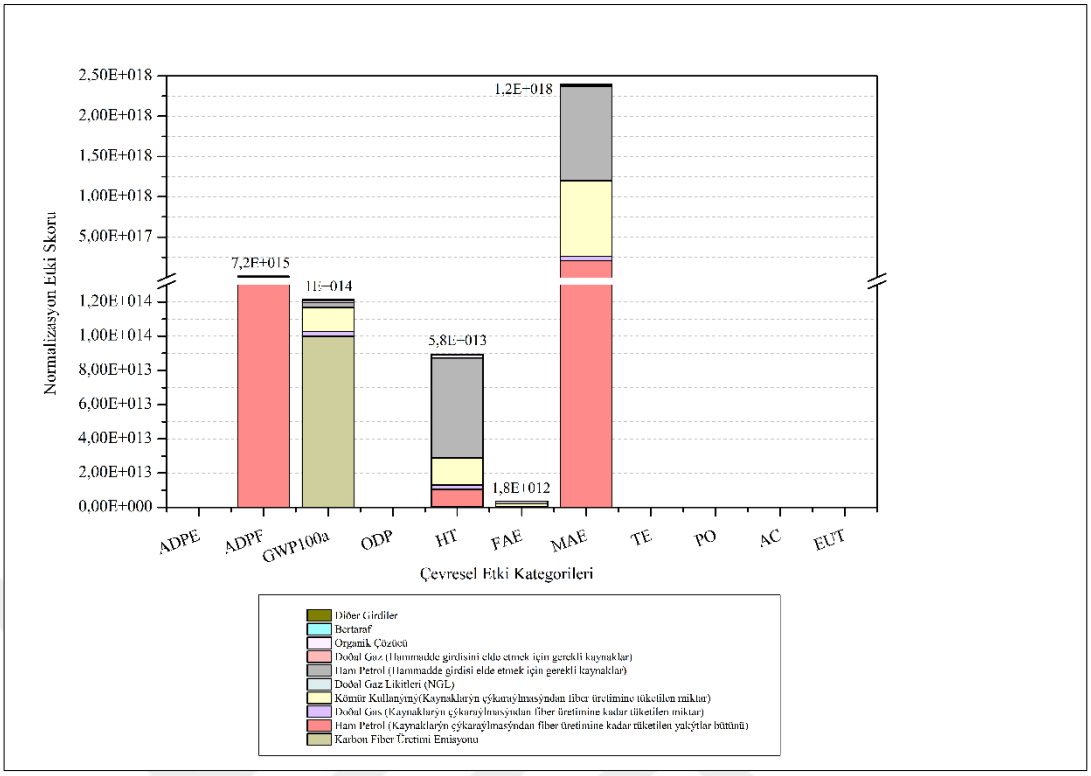
Şekil 4.1. Karbon elyaf üretiminde girdilerin çevresel etkileri (sıcak nokta analizi)

Şekil 4.1 incelendiğinde abiyotik tüketim (fosil yakıtlar) kategorisinde kömür ve doğal gaz yüksek etkiler göstermektedir. Kömür %47,57, doğal gaz %19,31 gibi önemli bir

katkıda bulunur. Küresel ısınma potansiyeli için karbon elyaf üretimine bağlı emisyon %82,08 gibi çok yüksek bir paya sahiptir. Kömür ise %11,36, doğal gaz %2,12 ve ham petrol %0,39 ile daha az etkili bileşenlerdir. Ozon tabakasının incelmesi için en yüksek etkiye sahip olan girdinin buhar olduğu görülmektedir. İnsan toksisitesi ve ekotoksisite kategorilerinde atık yönetimi ve kimyasal solventler önemli paya sahiptir. Asidifikasyon ve fotokimyasal oksidayon gibi kategorilerde ise karbon fiber üretimine bağlı emisyonun etkisi önemli bir orana sahiptir.

Ozon tabakasının incelmesi kategorisinde en yüksek etkiye sahip olan girdiler arasında buhar kullanımı %91,96 ile başı çekerken, karbon elyaf üretimine bağlı emisyon %4,46 ve karbon elyaf üretimine bağlı emisyonlar %2,75 etkide bulunur. İnsan toksisitesi kapsamında ham petrol %64,97 ile en yüksek etkiye sahiptir. Kömür %17,44, karbon elyaf üretimine bağlı emisyon %11,34 ve doğalgaz %2,92 ile onu takip eder. Asidifikasyon adına en yüksek etki karbon elyaf üretimine ait emisyon (%52,17) ve kömür kullanımından (%20,40) gelmektedir. Ötrofikasyona etkide ise %78,48 kömür kullanımı etkili iken %17,41 karbon fiber üretimi emisyonu katkı sağlamaktadır.

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde her bir etki kategorisinin kendine özgü birimleri olduğundan çevresel etkilerin birbiriyle karşılaştırılması mümkün değildir. Üründe hangi etkilere odaklanması gerektiğini anlayabilmek için bu karakterizasyon faktörlerinin belirli bir katsayı kullanılarak eşdeğer hale getirilmesi gerekmektedir. Tez çalışmasında SimaPro yazılımında CML-IA metoduna göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarının yazılım aracılığıyla normalize edilerek karşılaştırılması sağlanmıştır. Buna göre tez kapsamında seçilen karbon elyafın proses bazlı çevresel etkisinin, büyük oranda denizsuyu ekotoksisitesine olduğu tespit edilmiştir. Envanter kapsamında ele alınan prosesler ve girdiler incelendiğinde bu etkinin büyük oranda enerji kaynaklarından olan ham petrolden ve kömür kullanımlarından kaynaklandığı gözlenmektedir. Deniz ekotoksisitesinin ardından abiyotik tükenme (fosil kaynaklı), küresel ısınma ve insan sağlığı toksisitesi ön plana çıkmaktadır.

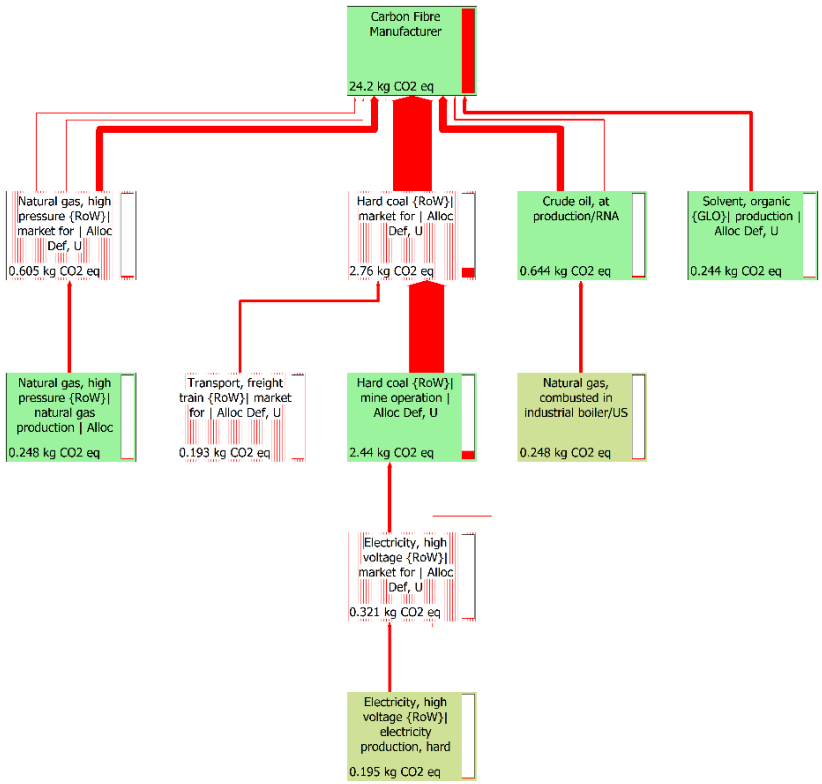


Şekil 4.2. Etki kategorileri normalizasyon karşılaştırma ve sıcak nokta analizi

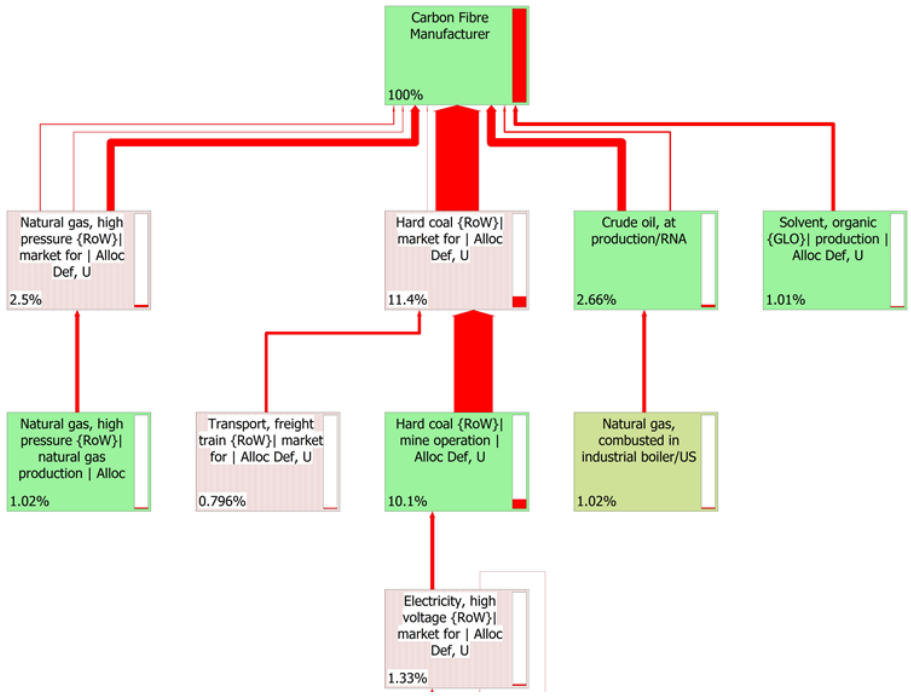
Karakterizasyon faktörlerinin geliştirilmesi için Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından geliştirilen karakterizasyon modeli seçilmiştir. Faktörler, kg karbondioksit eşdeğeri/ kg emisyon cinsinden, 100 yıllık zaman ufku için küresel ısınma potansiyeli olarak ifade edilir.

Şekil 4.3. PAN tabanlı karbon fiberin küresel ısınmaya ait etkisinin sankey diyagramı incelendiğinde küresel ısınma potansiyelinin 24,2 kg CO_2 eşdeğeri olduğu gözlenmektedir. Sebebi yoğunlukla enerji olarak kullanılan kömür, doğal gaz ve ham petrol gibi kaynaklar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.1 diyagramla beraber değerlendirildiğinde yine tüm faaliyetlerden kaynaklı emisyonların da etkisinin oldukça etkili olduğu görülmektedir.

PAN tabanlı karbon fiberin küresel ısınmaya ait etkisinin yüzde sankey diyagramı olan Şekil 4.4 ve Şekil 4.1 birlikte incelendiğinde %11,4 kömürden ve %82,08 karbon fiber üretimindekullanılan emisyonlardan kaynaklı olduğu görülüyor (Şekil 4.4).



Şekil 4.3.PAN tabanlı karbon fiberin küresel ısınmaya ait etkisinin sankey diyagramı



Şekil 4.4.PAN tabanlı karbon fiberin küresel ısınmaya ait etkisinin % sankey diyagramı

4.2. Tip IV Tank Prototiplerinin Çevresel Etkilerinin 12 Litrelik Modeller Üzerinden Karşılaştırılması ve Değerlendirmesi

Prototiplerin envanter verileri, bir adet tank olarak tanımlanan birim fonksiyonu ile SimaPro'da modellenmiş ve karşılaştırmalı analiz yapılmasına olanak sağlanmıştır. On bir prototipin karakterizasyon sonuçları Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Abiyotik tükenme (mineral kaynaklı) değerleri genellikle 6.43E-05 kg Sb ile 8.83E-05 kg Sb eşdeğeri arasında değişmektedir. A8 ve A9 numaralı prototipler en yüksek etkiyi göstermekte, bu da bu sistemlerin mineral kaynaklar üzerindeki etkisinin diğerlerine göre daha fazla olduğunu gösterir. Abiyotik tüketim (fosil yakıtlar) açısından A8 ve A9 sırasıyla 2160 ve 179 MJ gibi yüksek bir değerlerle diğerlerine kıyasla oldukça yüksek bir çevresel etkiye sahiptirler. Bu, ilgili prototiplerin enerji tüketiminin ve dolayısıyla fosil yakıt tüketiminin daha fazla olduğunu gösterir.

Küresel ısınma potansiyeli açısından da A8 ve A9 sistemleri, 1.22E+02 kg CO_2 eşdeğeri ile en yüksek değere sahiptir. Ozon tabakasını incelme potansiyeli A8 ve A9 yine diğer prototiplere kıyasla en yüksek değere sahiptir. 4.00E-06 kg CFC^{-11} eşdeğeri ile bu sistemlerin ozon tabakasını incelten maddeler açısından daha fazla katkıda bulunduğu görülmektedir.

İnsan toksisitesi, karasal ekotoksisite, tatlısu ekotoksisitesi, deniz ekotoksisitesi, foto kimysal oksidasyon, asidifikasyon ve ötrofikasyon gibi çevresel etkilerde de A8 ve A9 bu kategorilerde de yüksek değerlere sahiptir. Bu sistemler, insan sağlığı ve ekosistemler üzerinde daha büyük toksik etkilere sahip olabilir. Sonuç olarak A8 ve A9 prototipleri, çoğu çevresel etki kategorisinde en yüksek değerlere sahip olup, diğer sistemlere kıyasla daha fazla çevresel etkiye neden olmaktadır. En az çevresel etkiye sahip olan ürünün ise A1 olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, elyaf miktarı (390,4 gram) ve kullanılan reçine karışımı miktarı (190 gram) tarafından önemli ölçüde etkilenmiştir. Küresel ısınma potansiyeli açısından irdelediğimizde A2, A4, A5, A6, A7, A10 ve A11 prototipleri yakın değerlere sahip olup, daha sürdürülebilir seçenekler olarak öne çıkmaktadır. Fakat burada önemli olan teknik isterleride karşılayabilen optimum ürünü seçmektir. Bu nedenle patlama testi sonuçlarıyla ortak değerlendirme yapılmıştır

Çizelge 4.2. Karbon elyaf sarım çalışmalarının karakterizasyon sonuçları

Etki Kategorisi	**ADPE**	**ADPF**	**GWP100a**	**ODP**	**HT**	**FAE**	**MAE**	**TE**	**PO**	**AC**	**EUT**
Birim	**kg Sb eq**	**MJ**	**kg CO_2 eq**	**kg CFC^{-11} eq**	**kg 1,4-DB eq**	**kg 1,4-DB eq**	**kg 1,4-DB eq**	**kg 1,4-DB eq**	**kg C_2H_4 eq**	**kg SO_2 eq**	**kg PO_4^{3-} eq**
A1	6,43E-05	1205,475	7,39E+01	1,37E-06	5,32E+01	4,54E+01	1,20E+05	1,05E-01	1,90E-02	4,46E-01	2,33E-01
A2	7E-05	1454,297	8,70E+01	2,05E-06	5,93E+01	4,99E+01	1,33E+05	1,09E-01	2,08E-02	4,92E-01	2,52E-01
A3	7,43E-05	1616,432	9,56E+01	2,38E-06	6,27E+01	5,24E+01	1,40E+05	1,12E-01	2,23E-02	5,29E-01	2,65E-01
A4	7,04E-05	1464,099	8,75E+01	2,06E-06	5,94E+01	4,99E+01	1,33E+05	1,09E-01	2,09E-02	4,95E-01	2,52E-01
A5	7,01E-05	1449,926	8,67E+01	2,01E-06	5,90E+01	4,97E+01	1,32E+05	1,09E-01	2,08E-02	4,93E-01	2,52E-01
A6	7,11E-05	1474,706	8,77E+01	2,08E-06	5,93E+01	4,93E+01	1,32E+05	1,08E-01	2,09E-02	4,95E-01	2,50E-01
A7	7,1E-05	1472,458	8,76E+01	2,08E-06	5,92E+01	4,93E+01	1,32E+05	1,08E-01	2,09E-02	4,94E-01	2,50E-01
A8	8,83E-05	2160,179	1,22E+02	4,00E-06	7,48E+01	5,86E+01	1,59E+05	1,11E-01	2,52E-02	6,06E-01	2,87E-01
A9	8,83E-05	2160,228	1,22E+02	4,00E-06	7,48E+01	5,86E+01	1,59E+05	1,11E-01	2,52E-02	6,06E-01	2,87E-01
A10	7,22E-05	1530,188	9,07E+01	2,23E-06	6,07E+01	5,06E+01	1,35E+05	1,09E-01	2,13E-02	5,06E-01	2,55E-01
A11	7,23E-05	1518,86	8,97E+01	2,21E-06	6,01E+01	4,95E+01	1,32E+05	1,07E-01	2,11E-02	4,99E-01	2,50E-01

Fosil kaynaklı abiyotik tükenme değerleri, Çizelge 4.2'de gösterildiği üzere 1.000 MJ ile 2.200 MJ arasında değişmektedir. Bu aralık, ürünlerin üretim süreçlerindeki enerji tüketim farklılıklarını ve fosil yakıtlara olan bağımlılık düzeylerini açıkça yansıtmaktadır. A8 ve A9 numaralı ürünler, 2.200 MJ ile bu kategoride en yüksek fosil tükenme değerine sahiptir. Bu durum, söz konusu ürünlerin üretiminde enerji yoğun süreçlerin kullanıldığını ve fosil yakıt temelli enerji kaynaklarının daha yaygın şekilde tüketildiğini göstermektedir. Buna karşın, A1, A2, A4, A5, A6, A7, A10 ve A11 numaralı ürünlerin fosil tükenme değerleri 1.400-1.600 MJ aralığında olup, daha dengeli ve optimize bir enerji tüketimi profiline işaret etmektedir. Orta düzeyde bir değer sergileyen A3 numaralı ürün ise yaklaşık 1.800 MJ ile bu iki grup arasında yer almaktadır.

Küresel ısınma potansiyeli açısından, analiz edilen ürünlerin değerleri 72 ile 122 kg CO_2 eşdeğere arasında değişmektedir. A8 ve A9, 122 kg CO_2 eşdeğeri ile en yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip ürün olarak öne çıkarken; A4 (87,5 kg CO_2 eşdeğer), A5 (86,7 kg CO_2 eşdeğer), A6 (87,7 kg CO_2 eşdeğer), A7 (87,6 kg CO_2 eşdeğer), A10 (90,7 kg CO_2 eşdeğer) ve A11 (89,7 kg CO_2 eşdeğer) ürünleri, orta düzey emisyon değerleri sergilemektedir. Bu durum, gruptaki ürünlerin üretim süreçlerinin enerji yoğunlukları bakımından benzerlik gösterdiğini düşündürmektedir. Ancak, A8 ve A9 numaralı ürünlerin ortalama değerlere kıyasla yaklaşık %36 daha yüksek sera gazı emisyonuna sahip olması, bu sistemlerin çevresel açıdan daha olumsuz bir profil çizdiğini ortaya koymaktadır.

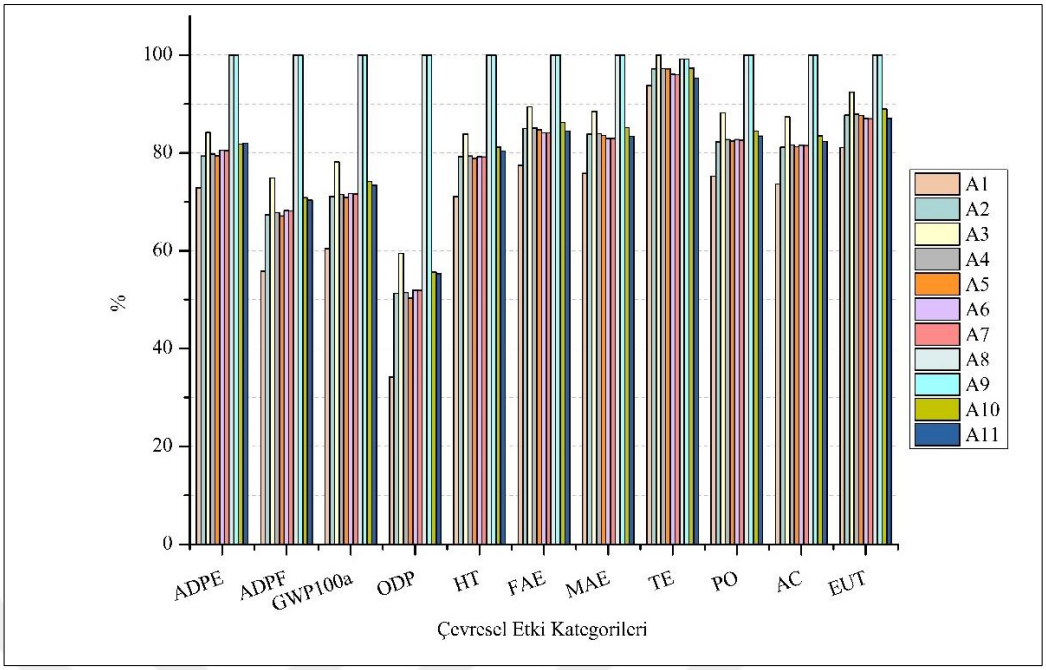
İnsan sağlığı üzerindeki toksik etkiler açısından, A1 ürünü en çevreci seçenek olarak öne çıkmaktadır ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda tercih edilmesi gereken bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Buna karşılık, A8 ve A9 ürünleri toksisite etkisi bakımından ortalamaya göre yaklaşık %25 daha yüksek bir çevresel etki göstermektedir. Bu farkın, enerji kullanım yoğunluğu, hammadde seçimi veya kullanılan kimyasallar gibi faktörlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Orta grupta yer alan A2, A4, A5, A6, A7, A10 ve A11 numaralı ürünler ise nispeten dengeli bir toksisite dağılımına sahiptir. Ancak bu gruptaki ürünlerden A10, 60,7 kg 1,4-DB-eq değeriyle, diğerlerine kıyasla daha yüksek bir toksik etkiye sahiptir.

Fotokimyasal oksidasyon potansiyeli açısından incelendiğinde, A1 ürünü 0,019 kg C_2H_4 eşdeğeri ile en düşük etkiyi göstermekte ve bu durum düşük VOC salınımına işaret etmektedir. Buna karşılık, A8 ve A9 numaralı ürünler, 0,0252 kg C_2H_4 eşdeğeri ile en yüksek değerlere sahiptir ve bu ürünlerin A1'e kıyasla yaklaşık %32 daha fazla çevresel etki oluşturduğu belirlenmiştir. Orta gruptaki A2, A4, A5, A6, A7, A10 ve A11 numaralı ürünler ise 0,0208–0,0213 kg C_2H_4 eşdeğeri aralığında sonuç vermiş ve bu ürünlerin süreç optimizasyonu ile yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yoluyla A1 seviyesine yaklaştırılabileceği öngörülmektedir.

Benzer şekilde, asidifikasyon potansiyeli kategorisinde A1, 0,446 kg SO_2 eşdeğeri ile en düşük çevresel etkiyi sergilerken, A8 ve A9 numaralı ürünler 0,606 kg SO_2 eşdeğeri ile en yüksek değerlere sahiptir. Bu, A1 ile karşılaştırıldığında yaklaşık %36 daha fazla bir çevresel etki anlamına gelmektedir. Orta gruptaki A2, A4, A5, A6, A7, A10 ve A11 numaralı ürünler ise 0,492–0,506 kg SO_2 eşdeğer aralığında değerlere sahiptir ve daha temiz enerji kaynaklarına yönelim ve düşük kükürt içeriğine sahip hammaddelerin seçimiyle bu sistemlerin A1 seviyesine yaklaştırılabileceği öngörülmektedir.

Sonuç olarak, A1 ürünü hemen hemen tüm çevresel etki kategorilerinde en düşük değerlere sahip olmasıyla sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda en uygun seçenek olarak öne çıkmaktadır. Buna karşın, A8 ve A9 numaralı ürünler yüksek enerji tüketimi, sera gazı emisyonu ve toksisite etkileriyle çevresel açıdan en olumsuz profili sergilemektedir. Orta gruptaki ürünlerin performansları ise süreç iyileştirmeleri ve daha sürdürülebilir kaynaklara yönelim yoluyla optimize edilebilir bir potansiyel taşımaktadır.

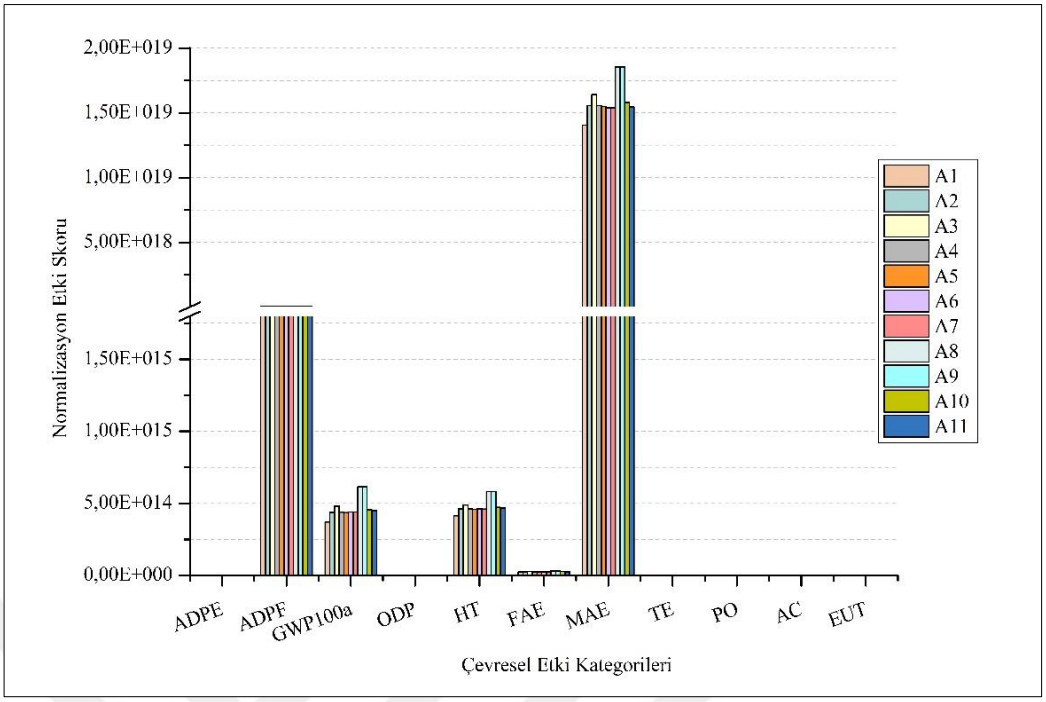
Şekil 4.5 küresel ısınma potansiyeli açısından irdelendiğnde A2 (%71,08), A4 (%71,44) ve A5 (%70,9) oldukça benzer olup, onları A6 (%71,7) ve C7 (%71,6) takip etmektedir. Sonrasında ise A11 (%73,35) ve A10 (%74,17) prototipleri gelmektedir.



Şekil 4.5. 12 litrelik karbon fiber sargı prototiplerinin yüzde karakterizasyon karşılaştırması

Usai ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, karbon elyaf Tip IV tanklarının ve katalizörün üretiminin, GWP'nin %53'üne katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. Yakıt hücresi sistemi üretim aşamasında toplam 5 ton CO_2 eşdeğeri üretilmektedir. Tank üretimi sırasında salınan 2 ton CO_2 eşdeğer, toplam GWP etkilerinin %40'ını oluşturmaktadır. En fazla çevresel etkisi olan A9 denememizdeki GWP değeri 122 kg CO_2 eşdeğeri olarak ölçülmüştür. Çalışma, Usai ve ark. (2021) çalışmasına kıyasla çok daha düşük bir etkiye sahiptir. Çalışmamızdaki tank ağırlığı 5,3 kg iken, yazarların çalışması 105 kg'lık bir tank üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Benitez ve ark. (2021) ise bir elektrikli araç için Tip IV tankın ekolojik etkilerini incelerken, aynı zamanda enerji parametresi olarak gelecekteki senaryoyu da ele almışlardır. Bu bağlamda, tank başına iklim değişikliği etkisinde %46'lık bir iyileşme öngörmüşlerdir; yani 3 ton CO_2 eşdeğeri, 5,6 ton CO_2 eşdeğerine karşılık gelmektedir. Tezdeki prototiplerle bulunan aralığı karşılaştırdığımızda, prototip çalışmaların çevresel etkilerinin oldukça düşük olduğunu gözlemliyoruz. Bunun en önemli faktörlerinden biri, CNG ve hidrojen basınç gereksinimlerinin birbirinden farklı olmasıdır. Bu, kullanılan karbon elyaf miktarı için önemli bir parametredir.



Şekil 4.6. 12 litrelik karbon elyaf sarım denemelerine ilişkin normalizasyon karşılaştırması

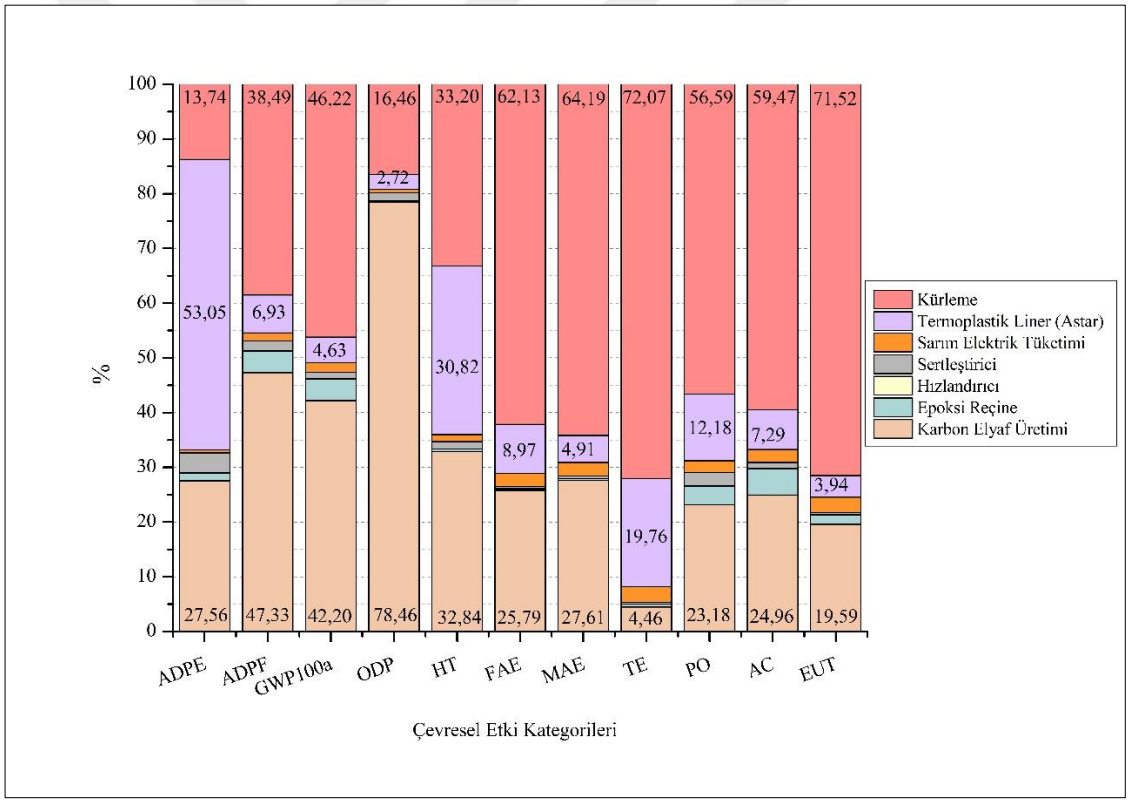
12 litre için prototiplere ilişkin normalizasyon karşılaştırması Şekil 4.6 incelendiğinde prototip çalışmalarda çevresel etkinin, büyük oranda deniz suyu ekotoksisitesi etkisine neden olduğu tespit edilmiştir. Envanter kapsamında ele alınan prosesler ve girdiler incelendiğinde ise bu etkinin büyük oranda elektrik tüketimi kaynaklı olduğu anlaşılmaktadır. Deniz suyu ekotoksisitesi özelinde değerlendirme yapıldığında 1,8 E+19 A8 ve A9'un etkisinin birinci sırada yer aldığı ardından 1,64E+19 ile A3'ün geldiği ve 1,41E+19 ile A1'in en düşük etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.

En yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip olan denemelerden A9 prototipinin karakterisasyon değerleri incelnmiştir. Şekil 4.7'de A9 yakıt tankının üretiminde kullanılan çeşitli malzemelerin ve süreçlerin farklı çevresel etki kategorilerine olan yüzde katkılarını göstermektedir.

Abiyotik tükenme konusunda, termoplastik astar (%53,05) ve karbon elyaf üretimi (%27,56) en büyük katkıyı sağlamaktadır. Astarın yüksek etkisi, üretiminde kullanılan hammaddelerin çıkarılma süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Fosil yakıtların abiyotik tükenmesi açısından ise karbon elyaf üretimi (%47,33) en büyük katkıyı sunmakta, bu da

karbon elyaf üretiminin enerji yoğunluğunu göstermektedir. Küresel ısınma kategorisinde, kürleme süreci (%46,22) ve karbon elyaf üretimi (%42,20) en yüksek etkiye sahiptir. Çünkü kürleme süreci genellikle yüksek enerji tüketimi gerektirir ve bu da sera gazı emisyonlarına yol açar.

Ozon tabakasının incelmesi açısından, karbon elyaf üretimi (%78,46) ana katkıyı sağlamaktadır. Bu durum, üretim sürecinde ozon tabakasını incelten maddelerin kullanılmasından kaynaklanıyor olabilir. İnsan sağlığı toksisitesi üzerinde, termoplastik astar (%30,82) ve karbon elyaf üretimi (%32,84) en yüksek katkıları sağlar; bu süreçlerde kullanılan tehlikeli kimyasallar insan sağlığını olumsuz etkileyebilir. Tatlısu ekotoksisitesinde, kürleme süreci (%62,13) en büyük katkıyı yapar.

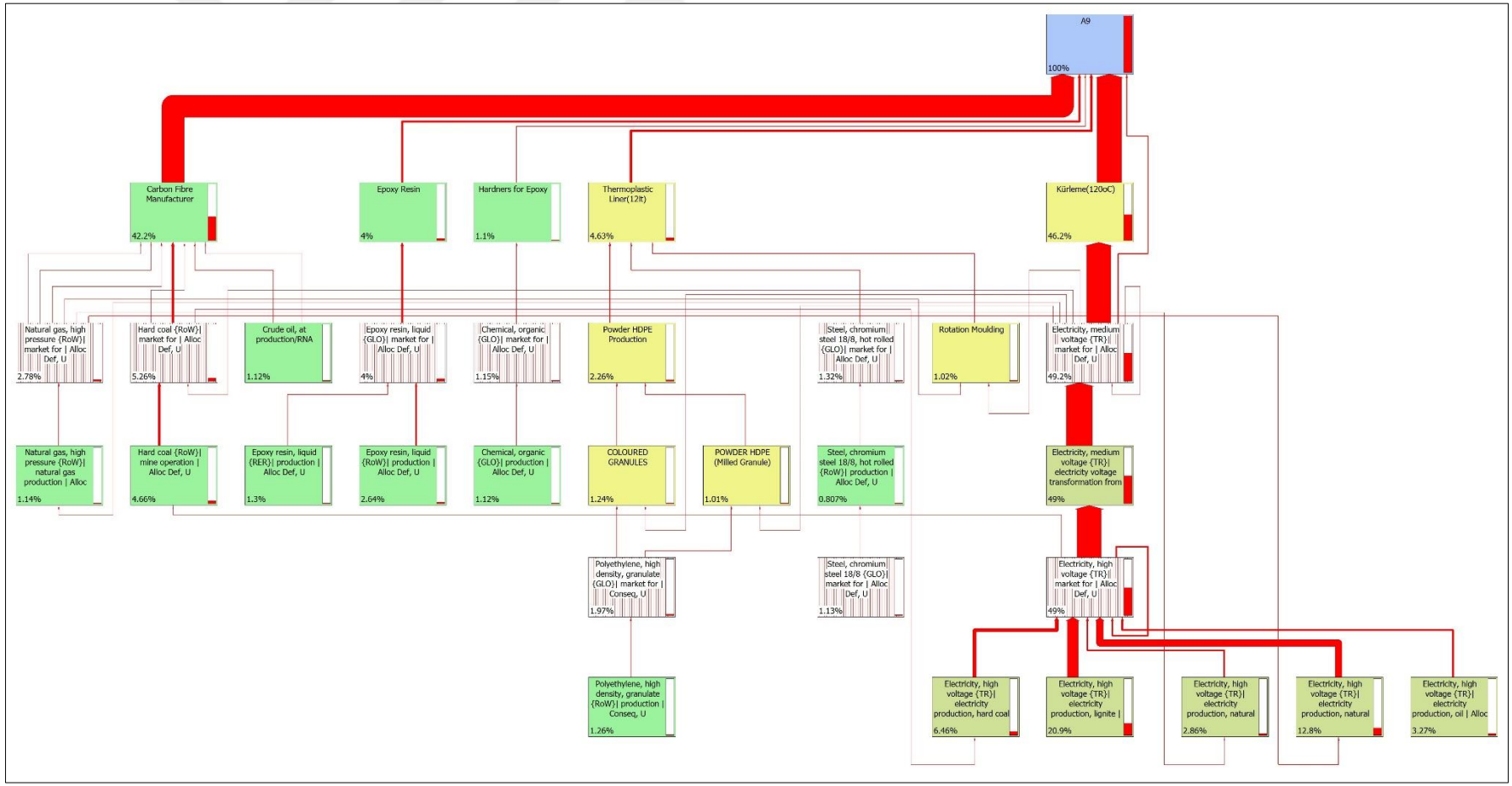


Şekil 4.7. A9 prototipinin karaterizasyona bağlı sıcak nokta analizi

Deniz suyu ekotoksisitesi kategorisinde, kürleme (%64,19) ve termoplastik liner (astar) (%27,61) en büyük katkıyı sağlar; bu, deniz ekosistemleri üzerindeki olumsuz çevresel etkileri işaret eder. Karasal ekotoksisite açısından ise kürleme (%72,07) en büyük katkıyı sağlar ve bu durum, kürleme sürecinde kullanılan elektriğin eldesinden kaynaklanan bir

durumdur. Fotokimyasal oksidasyon etkisi açısından, kürleme süreci (%56,59) ve karbon elyaf üretimi (%23,18) en yüksek etkilere sahiptir; bu durum, smog oluşumuna katkıda bulunduklarını gösterir. Asidifikasyon kategorisinde ise kürleme (%59,47) en büyük katkıyı sağlamaktadır. Son olarak, ötrofikasyon kategorisinde kürlemenin (%71,52) en yüksek katkıya sahip olduğu elde edilmiştir.

Sonuçları genel olarak değerlendirdiğimizde kürleme süreci, karbon elyaf üretimi ve termoplastik astar, çeşitli etki kategorilerinde en önemli katkıları sağlamaktadır. Bu süreçler ve malzemeler, çevresel iyileştirmelerin en fazla etki yaratabileceği alanlar gibi görünmektedir. Kürleme süreci özellikle ekotoksisite, ötrofikasyon ve asidifikasyon üzerindeki etkisiyle öne çıkmaktadır. Bu alanlarda çevresel ayak izinin azaltılması, Tip IV tanklarının daha sürdürülebilir üretimine yol açabilir.



Şekil 4.8. A9 prototipi küresel ısınma potansiyeline ilişkin sankey diyagramı

Şekil 4.8 incelendiğinde A9 prototipi için küresel ısınma potansiyelinde kürleme (%46,2) ve karbon fiber üretimi (%42,2) olarak öne çıkmaktadır. Çizelge 4.3 incelendiğinde, en fazla etkiye sahip A9 üretiminde kullanılan malzeme ve süreçlerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi sonucunda ortaya çıkan CO_2 eşdeğeri emisyonlarını göstermektedir. Toplam karbon emisyonu 122 kg CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmış ve en büyük katkıyı karbon elyaf üretimi ve kürleme süreçleri yapmıştır 122 kg CO_2 eşdeğeri derinlemesine incelendiğinde kürleme sırasında tüketilen elektrikten kaynaklı küresel ısnma değeri 56,55 kg CO_2 eşdeğeri ile birincil sıcak nokta olarak tespit edilmiştir Kürlemede en büyük katkıyı 54,02 kg CO_2 eşdeğeri ile fosil kaynaklı karbondioksit yapmaktadır (Çizelge 4.3). Yapılan çalışmada, 120°C'de 3 saat kürleme koşullarında elektrik tüketimi 85.294 kWh olarak kaydedilmiştir. Fırının başlangıç ısıtma sıcaklığı ne kadar yüksekse, elektrik tüketimi de o kadar fazla olur. Sıcaklık stabilize olduğunda ise elektrik tüketimi sabit hale gelir. Bu nedenle, kürleme koşullarının optimize edilmesi, üretim sırasında tüketilen enerji miktarını olumlu yönde etkileyebilir.

İkinci en yüksek katkı ise 51,6 kg CO_2 eşdeğeri ile karbon elyaf üretiminden kaynaklanmaktadır. Karbon elyaf üretimi, 51,63 kg CO_2 eşdeğeri ile en yüksek emisyona sahip olup, bunun büyük bir kısmı 42,38 kg CO_2 eşdeğeri ile doğrudan karbondioksit emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Üçüncü en fazla katkı ise 5,66 kg CO_2 eşdeğeri termoplastik astar üretiminden gelmektedir. Termoplastik astarın üretiminden kaynaklanan emisyonlarda ana emisyon kaynağı fosil bazlı karbondioksittir (Çizelge 4.3).

Epoksi reçine üretimi, 4,89 kg CO_2 eşdeğeri emisyon ile diğer süreçlere göre daha düşük bir seviyede katkıda bulunurken, bu emisyonun büyük kısmı fosil kaynaklı karbondioksitten gelmektedir. Sarım için kullanılan elektrik enerjisi ise 2,21 kg CO_2 eşdeğeri emisyon üretmekte ve yine bu sürecin en büyük emisyon kaynağı fosil kökenli karbondioksittir (Çizelge 4.3). Genel olarak değerlendirildiğinde, kürleme ve karbon elyaf üretimi süreçleri en yüksek karbon emisyonlarına sahiptir ve bu nedenle karbon ayak izini azaltmak için bu süreçlerin optimize edilmesi önemli bir adım olacaktır.

Çizelge 4.3. A9 küresel ısınma potansiyeline ait havaya emisyon olan ilk altı etken madde

Etken Madde Adı	Birim	Toplam	Karbon Elyaf Üretimi	Epoksi Reçine	Hızlandırıcı	Epoksi Sertleştirici	Sarım Elektriği	Termoplastik Astar	Kürleme
Tüm Bölümlerin Toplamı	kg CO_2 eq	122,35	51,63	4,89	0,05	1,35	2,21	5,66	56,55
Karbon dioksit	kg CO_2 eq	42,38	42,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Karbon dioksit, fosil	kg CO_2 eq	71,51	4,92	4,32	0,04	1,14	2,11	4,97	54,02
Dinitrojen monoksit	kg CO_2 eq	0,56	0,06	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,44
Metan	kg CO_2 eq	0,65	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Metan, biyojenik	kg CO_2 eq	0,19	0,11	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06
Metan, biyojenik	kg CO_2 eq	6,75	3,47	0,56	0,01	0,20	0,07	0,65	1,80

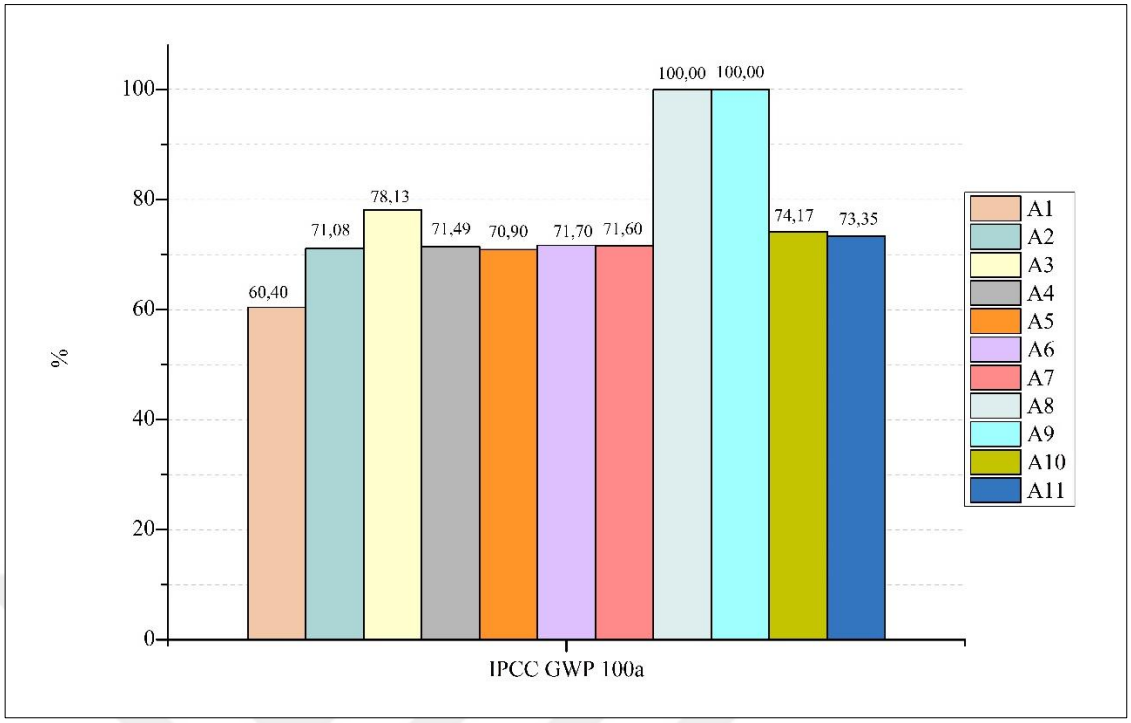
Agostini ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada, yardımcı güç üniteleri için tanklarda kullanılan malzemelerin küresel ısınma potansiyeli dağılımı incelenmiştir. 11 ve 17,5 litre hacme sahip tank modelleri için küresel ısınma potansiyeli değerleri sırasıyla 500 kg CO_2 eşdeğerinden ve 1000 kg CO_2 eşdeğerinden büyük bulunmuştur. Küresel ısınma potansiyeline katkılar şu şekilde dağıtılmıştır: karbon elyaf %75, epoksi reçine %12, HDPE %10, paslanmaz çelik %2 ve cam elyaf %1'dir. Mevcut çalışmada üretilen 11 prototip için elde edilen küresel ısınma potansiyeli değeri, Agostini ve ark. (2018) bulgularına göre oldukça düşük çıkmıştır.

Prototip çalışmalarının iklim değişikliğine etkisinin anlaşılması için YDD modelleri IPCC GWP 100a metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Bu metot ürünün yalnızca iklim değişikliğine etkisini detaylı olarak analiz etmekte olup değerlendirilmesi sonucunda aşağıdaki karakterizasyon faktörleri tespit edilmiştir (Çizelge 4.4). En az iklim değişikliği 73,904 kg CO_2 eşdeğeri ile A1 denemesine aittir. En fazla etkiler ise sırasıyla A8 (122,345 kg CO_2 eşdeğeri) ve A9 (122,348 kg CO_2 eşdeğeri) denemelerine aittir.

Çizelge 4.4. 12 litrelik karbon elyaf sarım denemelerinin IPCC GWP 100a'ya göre değerlendirmesi

Prototip Model	**IPCC GWP 100a (kg CO_2 eq)**
A1	73,90
A2	86,97
A3	95,59
A4	87,4
A5	86,75
A6	87,72
A7	87,60
A8	122,35
A9	122,35
A10	90,74
A11	89,75

Yüz üzerinden karşılaştırma yapılan Şekil 4.10 incelendiğinde büyükten küçüğe etki sıralaması A9(100), A8(99,99), A3(78,13), A10(74,17), A11(73,35), A6 (71,67), A7(71,60), A4(71,49), A2(71,08), A2(70,90), A1(60,40) şeklindedir.



Şekil 4.9. 12 litrelik prototip modellerin iklim değişikliği etkisinin yüzde karşılaştırması

4.3. 12 Litrelik Tank Prototipleri için Patlama Testi Sonuçları ve Çalışmaların Çevresel Etki Karşılaştırması

12 litrelik bir tank için çevresel etki ve patlama testi açısından optimum ürünü belirlemek amacıyla, CML Baseline yöntemine göre karakterizasyon etki kategorilerinden olan IPCC GWP 100a ve deniz ekotoksisitesi ile patlama testi sonuçları Tablo 6'da karşılaştırılmıştır. Çalışmada, CNG tankı uygulaması için 250 barlık basınç direnci temel alınmıştır.

Sonuçlar değerlendirildiğinde, A1 prototipinin IPCC'ye göre en düşük küresel ısınma etkisine (73,90 kg CO_2 eşdeğeri) ve deniz ekotoksisitesi değerine (1,20E+05 kg 1,4-DB eşdeğeri) sahip olmasına rağmen, üretim açısı ve kullanılan karbon elyaf miktarının tank bütünlüğünü sağlamaması nedeniyle patlama testini karşılıyamadığı için uygun ürün olmadığı belirlenmiştir. Öte yandan, 86,97 kg CO_2 eşdeğeri etkiye ve 1,33E+05 kg 1,4-DB eşdeğeri deniz ekotoksisite değerine sahip olan A2, çevresel etki açısından A1'e en yakın ikinci deneme olmuştur. Ancak, tank hedef basınç olan 250 bar'a ulaşmadan 200 bar'da patlamıştır. Bu nedenle, IPCC'ye göre üçüncü en düşük etkiye sahip olmasına rağmen teknik olarak seçilemez. A3; IPCC'ye göre 95,59 kg CO_2 eşdeğeri etki değerine

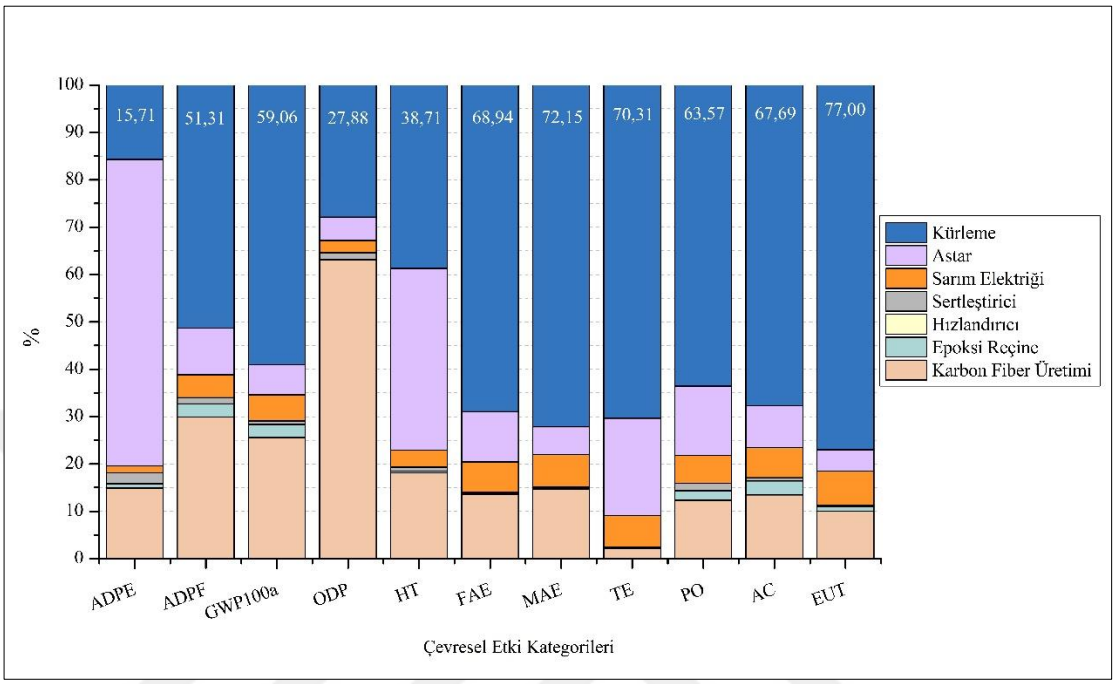
ve 1,40E+05 kg 1,4-DB eşdeğeri deniz ekotoksisite etki değerine sahiptir. A3 denemesi hedef basınç olan 250 bar'a ulaşamamıştır. A4, A5, A6 ve A7 denemelerinin IPCC değerleri sırasıyla 87,47, 86,75, 87,72 ve 87,60 kg CO_2 eşdeğeri olarak belirlenmiştir. Deniz ekotoksisite değerleri ise 1,32E+05 ile 1,33E+05 arasında değişmektedir. İlgili deneme aralığındaki ürünlerin hiçbiri patlama testinde hedef basınç olan 250 bar'a ulaşamamıştır.

Çizelge 4.5. Prototiplerde öne çıkan çevresel bileşenlerin ve patlama testi sonuçlarının karşılaştırılması

	IPCC GWP 100a (kg CO_2 eq)	**MAE (kg1,4-DB eq**	**Hedef Patlma (bar)**	**Gerçekleşen Patlama (bar)**
A1	73,90	1,20E+05	-	-
A2	86,97	1,33E+05	250	200
A3	95,59	1,40E+05	250	200
A4	87,47	1,33E+05	250	200
A5	86,75	1,32E+05	100	80
A6	87,72	1,32E+05	250	200
A7	87,60	1,32E+05	250	170
A8	122,35	1,59E+05	250	245
A9	122,35	1,59E+05	250	>280
A10	90,74	1,35E+05	250	190
A11	89,75	1,32E+05	250	>270

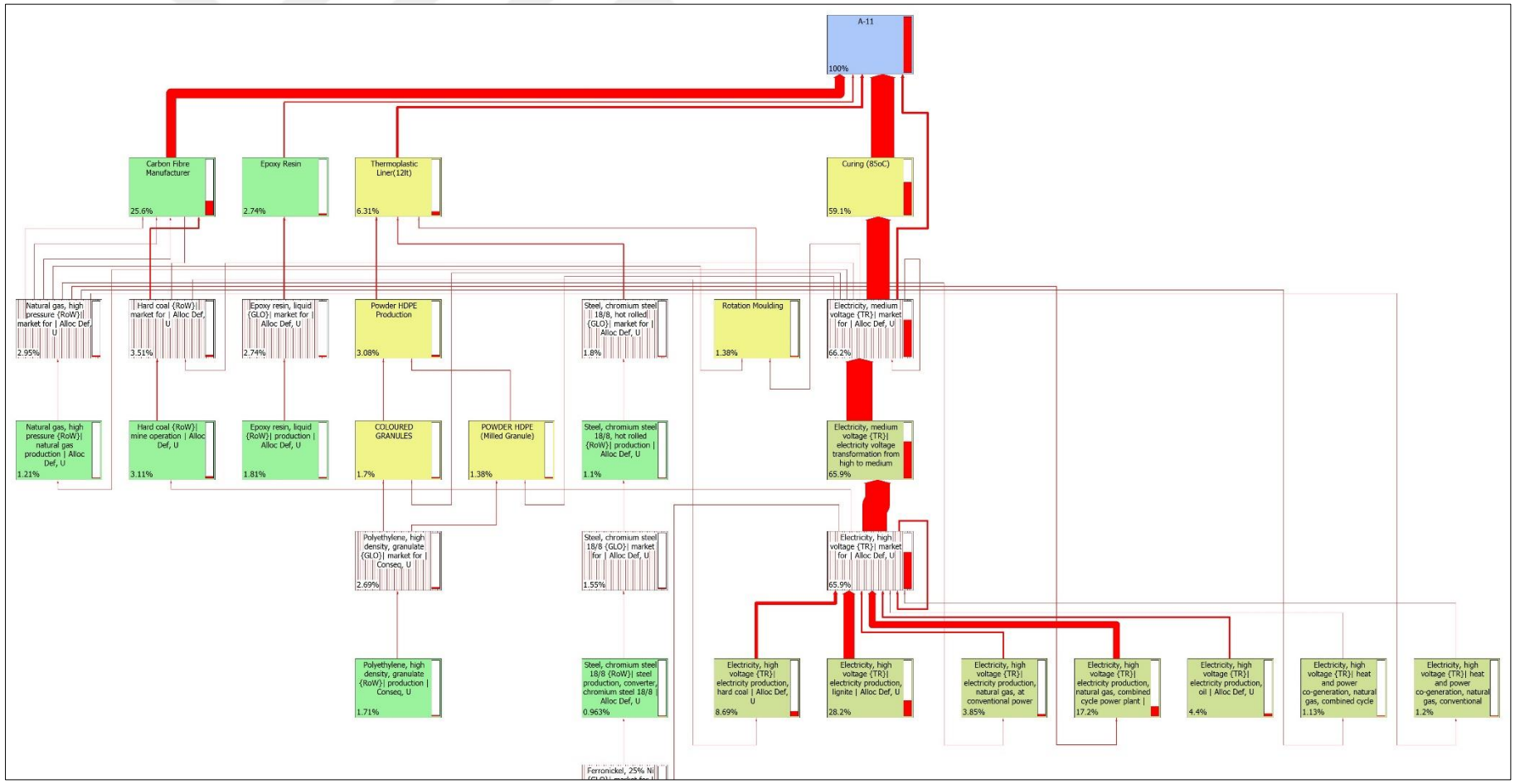
Prototipler arasında, A8 denemesi IPCC'ye göre en yüksek etkiye sahip ikinci model (122,35 kg CO_2 eşdeğeri) ve en yüksek deniz ekotoksisite değerine (1.59E+05 kg 1,4-DB eşdeğeri) sahiptir. Bu denemede hedef basınç 250 bar olup, tank 245 bar'a kadar dayanmıştır. A9 denemesi ise 122,35 kg CO_2 eşdeğeri etki değeri ve 1,59E+05 kg 1,4-DB eşdeğeri deniz ekotoksisite etki değeri ile denemeler arasında en yüksek çevresel etkiye sahip üründür. Patlama basıncına direnci incelendiğinde, 280 bar'ı aşan basınçlara dayandığı görülmüştür. Diğer yandan, A11 denemesi hedef basınç direncine ulaşan bir diğer prototiptir. 270 bar'ı aşan bir direnç göstermiş ve çevresel etkileri değerlendirildiğinde, IPCC'ye göre küresel ısınma etkisi 89,746 kg CO_2 eşdeğeri ve deniz ekotoksisite değeri 1,32E+05 kg 1,4-DB eşdeğeri olarak belirlenmiştir. A11 prototip denemesi hem çevresel hem de teknik açıdan optimum ürün olarak tanımlanabilir ve bu nedenle gelecekteki araştırmalar için önemli bir potansiyele sahiptir. Bu nedenle Şekil

4.10’da A11’e ait karakterizasyon tablosu incelenerek hangi prosesin ne kadar etki ettiğine ilişkin detaylı inceleme yapılmıştır.



Şekil 4.10. A11 prototipinin karaterizasyona bağlı sıcak nokta analizi

Kürleme sürecinin tüm çevresel etki kategorilerinde en yüksek katkıyı sağladığı açıkça görülmektedir. Özellikle fosil kaynaklı abiyotik tükenme (%51,31), küresel ısınma (%59,06), karasal ekotoksisitesi (%70,31), fotokimyasal oksidasyon (%63,57), asidifikasyon (%67,69) ve ötrofikasyon (%77,00) gibi kategorilerde öne çıkmaktadır. Karbon fiber üretimi ise daha kürlemeye göre göreceli düşük olsa da göz ardı edilemeyecek seviyelerde katkı sağlamaktadır. Epoksi reçine ve sarım elektriği ise mineral kaynaklı abiyotik tükenmede ve ozon tabakasına zarar verme potansiyeli gibi kategorilerde belirgin etkilere sahiptir. Bu sonuçlar, kürleme sürecinin ve kabon elyaf üretimine ait çevresel etkilerinin azaltılmasının öncelikli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.11. A9 prototip modelin küresel ısınma potansiyeline ilişkin sankey diyagramı

Çizelge 4.6. Optimum verilerinin çevresel etkilerinin referans çalışmalar ile karşılaştırılması

Referans	Program	Yakıt	Araç Tipi	Tank Ağırlığı/Kullanılan Fiber	Fonksiyonel Birim	Çevresel Göstergeler
Miotti ve ark., 2017	SimaPro	Hidrojen 700 bar	Hafif hizmet araçları	5,6 kg tank ağırlığı (%66'sı karbon fiber)	1 araç-kilometre	1-2 ton CO_2 eq (GWP)
Evangelisti ve ark., 2017	GaBi	Hidrojen 700 bar	Binek araçlar	71,9 kg karbon elyaf ve 117 kg toplam tank ağırlığa sahiptir.	1 araç-kilometre	5-10 ton CO_2 eq (GWP), 50,000-100,000 MJ (ADPE), 10-15 kg SO_2 eq (Asidifikasyon)
Usai ve ark., 2021	ARDA	Hidrojen 700 bar	Hafif hizmet araçları	6,0 kg karbon elyaf ve 10,5 kg toplam tank ağırlığına sahiptir.	1 araç-kilometre	2 ton CO_2 eq (GWP)
Benitez ve ark., 2021	GaBi	Hidrojen 700 bar	Araçlar	Tip IV 10,2 kg, 7,6 kg karbon fiber, 2,6 kg epoksi reçine. 5,6 kg hidrojen kapasitesine sahiptir.	1 araç-kilometre	%46 oranında yani 3 ton CO_2'ye karşılık 5,6 t CO_2 eq oranında bir iyileşme. İnsan toksisitesinde %75 oranında yani 2,7 ton 14-DCB eq'ye karşılık 0,7 ton 14-DCB eq
Agostini ve ark., 2018	GaBi	Hidrojen Tip IV: 700 bar; Tip III: 350 bar	Hafif hizmet araçları	11 litre Tip IV tank için: 12,7 kg toplam ağırlığa sahiptir. 4,6 kg karbon fiber	1 adet tank	Tip III: GWP 250-350 kg CO_2 eq, Tip IV: GWP 50-100 kg CO_2 eq
Weiszflog, 2022	OpenLCA	Hidrojen 700 bar	Kamyon	10,2 kg toplam ağırlığa sahiptir.	1 kg yakıt hücresi	0,175 kg CO_2 eq (GWP), 0,352 kg SO_2 eq (Karasal Asidifikasyon)
Bu çalışma (A11 prototipi için kıyaslama yapılırsa)	SimaPro	CNG 250 bar	Otobüs	12 litre hacminde karbon fiber ağırlığı 0,948 kg ve 3,438 kg toplam tank ağırlığıdır.	1 adet tank	89,75 kg CO_2 eq (GWP), 0,49 kg SO_2 eq (AC), 6,01 kg 14-DB eq (HT)

11 prototipin çevresel etkiler açısından değerlendirilmesi sonucunda, özellikle küresel ısınma potansiyeli bakımından olumlu sonuçlar elde edilmiştir. 89,746 kg CO_2 eşdeğer olarak hesaplanan GWP değeri, diğer hidrojen depolama tanklarına kıyasla oldukça düşük bir seviyededir. Örneğin, Miotti ve ark. (2017) ve Evangelisti ve ark. (2017) gibi çalışmalar, sırasıyla 1-2 ton ve 5-10 ton CO_2 eşdeğerinde GWP değerleri sunmaktadır. Bu, hidrojen depolama sistemlerinin kullanım sürecinde CNG tanklarına göre daha yüksek karbon salınımına neden olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, A11 prototipi, daha verimli malzeme kullanımı ve hafif yapısıyla düşük karbon ayak izine sahip önemli bir alternatif sunmaktadır.

Asidifikasyon potansiyeli (SO_2 eq) açısından A11 prototipi 0,49 kg SO_2 eq ile oldukça düşük bir çevresel etki sergilemektedir. Daha büyük ve ağır hidrojen tanklarının, üretim ve kullanım aşamalarında daha yüksek asitlenme potansiyeline sahip olduğu bilinmektedir. Evangelisti et al. (2017), daha ağır tank yapısıyla 10-15 kg SO_2 eq değerlerine ulaşırken, A11 prototipinin optimize edilmiş hafif tasarımı çevresel etkileri minimize etmektedir. Bu durum, tankın hem üretim hem de kullanım aşamalarında çevre üzerindeki yükü azaltmaktadır.

İnsan toksisitesi açısından ise A11 prototipi 6,01 kg 14-DB eq ile diğer çalışmalara kıyasla kabul edilebilir bir seviyede yer almaktadır. Bu değer, bazı hidrojen tanklarına göre daha yüksek olsa da kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. Örneğin, Benitez et al. (2021) çalışmasında hidrojen tanklarında insan sağlığı toksisitesi %75 oranında iyileştirilmiş olup, bu alan CNG tanklarının da gelecekte optimize edilebileceği bir gelişim fırsatı sunmaktadır.

Malzeme kullanımı açısından A11 prototipi oldukça verimli bir tasarıma sahiptir. 3438 gr ağırlığa ve 948 gr karbon elyaf kullanımına sahip olan bu prototip, özellikle otobüsler gibi büyük araçlar için uygun bir çözüm sunmaktadır. Miotti ve ark. (2017) ve Agostini ve ark. (2018) gibi çalışmalarda karbon elyaf miktarının daha yüksek olması, bu tankların üretim süreçlerinde daha fazla enerji ve hammadde gerektirdiğini göstermektedir. Buna karşın, A11 prototipi hafifliği ve malzeme verimliliği ile öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, A11 prototipi küresel ısınma potansiyeli, asitlenme ve malzeme verimliliği açısından hidrojen depolama tanklarına kıyasla çevresel anlamda daha avantajlı bir seçenek sunmaktadır. Özellikle karbon elyaf kullanımının optimize edilmesi ve tankın hafif yapısı, çevre üzerindeki olumsuz etkilerin minimize edilmesine katkı sağlamaktadır. Bu da CNG depolama sistemlerinin sürdürülebilir enerji geçişi için önemli bir çözüm olduğunu göstermektedir. Uygulanabilir daha yüksek hacimler için üzerinde çalışmalar yapılmalıdır.

4.4. Tip IV Tank Prototiplerinin Çevresel Etkilerinin 63 Litrelik Modeller Üzerinden Karşılaştırılması ve Değerlendirmesi

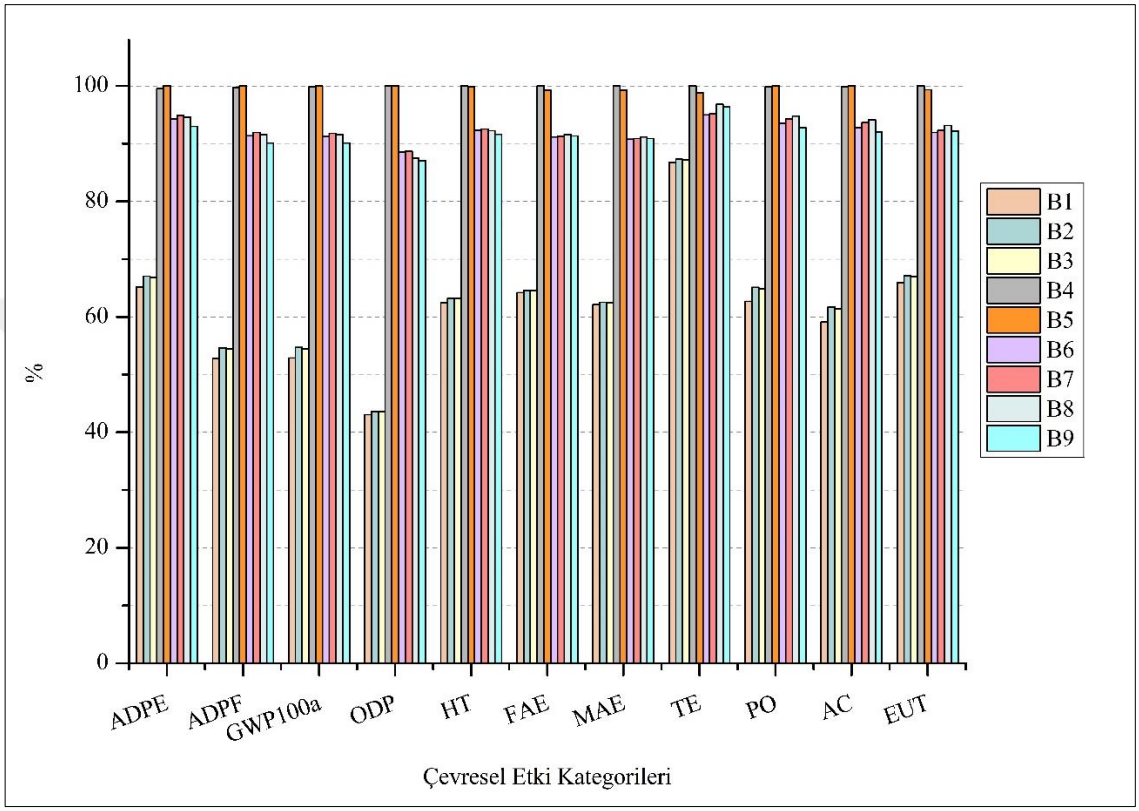
Envanter verileri SimaPro'da modellenerek denemeler birbiriyle 1 adet tank olarak karşılaştırılıp incelenmiştir. Çizelge 4.7'de 9 adet denemeye ilişkin karakterizasyon sonuçları irdelenmiştir. İncelenen 11 çevresel etki kategorisinde genel olarak en fazla etkinin B5 ve en az etkinin B1 denemesine ait olduğu gözlenmektedir. Bu durumun temel kaynağı ise tüketilen karbon elyaf ağırlığı ile doğru orantılıdır.

Deniz ekotoksisite etki kategorisini incelediğimizde en fazla etkinin 3,49E+05 kg 1,4-DB eşdeğer B4 ve ardından 3,46E+05 kg 1,4-DB eşdeğer ile B5 denemesine ait olduğu görülmektedir. Günümüzde karşılaştırılabilirlik anlamında da en önemli çevresel etki kategorilerinden biri küresel ısınma potansiyelidir. Denemelerde ilgili kategori incelendiğinde en fazla etkinin 3,65E+02 kg CO_2 eşdeğer B5 ve ardından 3,64E+02 kg CO_2 eşdeğer ile B4 denemesine ait olduğu görülmektedir. Abiyotik tükenme (fosil yakıt) baktığımızda ise sırasıyla en fazla etkiler 7,19E+03 MJ ile B5 ve 7,17E+03 MJ ile B4 olarak bulunmuştur. En az etkinin ise B1 ardından B2 ve B3 olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. 63 litre karbon elyaf sarım denemelerine ilişkin karakterizasyon sonuçları

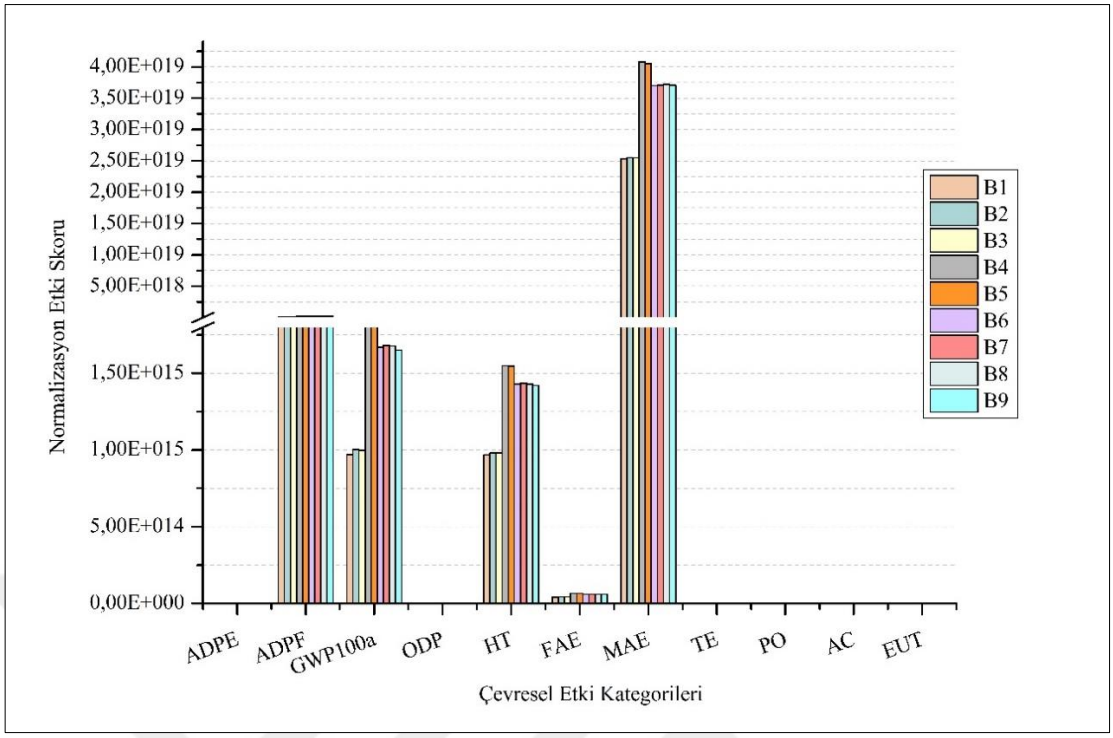
Etki Kategorisi	**ADPE**	**ADPF**	**GWP100a**	**ODP**	**HT**	**FAE**	**MAE**	**TE**	**PO**	**AC**	**EUT**
Birim	**kg Sb eq**	**MJ**	**kg CO_2 eq**	**kg CFC^{-11} eq**	**kg 1,4-DB eq**	**kg 1,4-DB eq**	**kg 1,4-DB eq**	**kg 1,4-DB eq**	**kg C_2H_4 eq**	**kg SO_2 eq**	**kg $PO4^{3-}$eq**
B1	1,64E-04	3,80E+03	1,93E+02	6,77E-06	1,25E+02	8,18E+01	2,17E+05	1,51E-01	3,90E-02	8,53E-01	3,76E-01
B2	1,68E-04	3,93E+03	2,00E+02	6,85E-06	1,26E+02	8,23E+01	2,18E+05	1,52E-01	4,05E-02	8,90E-01	3,82E-01
B3	1,68E-04	3,92E+03	1,99E+02	6,84E-06	1,26E+02	8,23E+01	2,18E+05	1,52E-01	4,03E-02	8,86E-01	3,81E-01
B4	2,50E-04	7,17E+03	3,64E+02	1,57E-05	1,99E+02	1,27E+02	3,49E+05	1,74E-01	6,21E-02	1,44E+00	5,69E-01
B5	2,51E-04	7,19E+03	3,65E+02	1,57E-05	1,99E+02	1,27E+02	3,46E+05	1,72E-01	6,22E-02	1,44E+00	5,65E-01
B6	2,36E-04	6,57E+03	3,33E+02	1,39E-05	1,84E+02	1,16E+02	3,17E+05	1,66E-01	5,81E-02	1,34E+00	5,23E-01
B7	2,38E-04	6,61E+03	3,35E+02	1,39E-05	1,84E+02	1,16E+02	3,17E+05	1,66E-01	5,86E-02	1,35E+00	5,26E-01
B8	2,37E-04	6,59E+03	3,34E+02	1,37E-05	1,84E+02	1,17E+02	3,18E+05	1,69E-01	5,89E-02	1,36E+00	5,30E-01
B9	2,33E-04	6,48E+03	3,29E+02	1,37E-05	1,83E+02	1,16E+02	3,17E+05	1,68E-01	5,77E-02	1,33E+00	5,25E-01

Şekil 4.12'de karakterizasyon sonuçlarının yüzde olarak karşılaştırması incelenmiştir. ADPE, ADPF, GWP100a, ODP, PO ve AC etki kategorilerinden fazla çevresel etkinin B5'te olduğu gözlenmektedir. HT, FAE, MAE, EUT ve ODP etkilerin ise en fazla B4'te olduğu gözlenmektedir. En az etkiye sahip olan prototip denemeleri ise B1, B2 ve B3'tür.



Şekil 4.12. Karbon elyaf sarım denemelerine ilişkin yüzde olarak karakterizasyon karşılaştırması

Karbon elyaf sarım denemelerine ilişkin normalizasyon karşılaştırması (Şekil 4.13) incelendiğinde prototip çalışmalarda çevresel etkinin, büyük oranda deniz ekotoksisite etkisine neden olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra en fazla çevresel etki kategorisinin abiyotik tükenme (fosil yakıt), küresel isınma potansiyeli, insan sağlığı ekotoksisitesi ve Tatlısu ekotoksisitesi olarak tespit edilmiştir. Envanter kapsamında ele alınan prosesler ve girdiler incelendiğinde ise bu etkinin büyük oranda hammadde olarak kullanılan karbon fiber kaynaklı olduğu anlaşılmaktadır. Deniz ekotoksisite özelinde değerlendirme yapıldığında 4,01E+19 B4'ün etkisinin birinci sırada yer aldığı ardından 3,98E+19 ile B5'in geldiği ve 2,46E+19 ile B1'in en düşük etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.



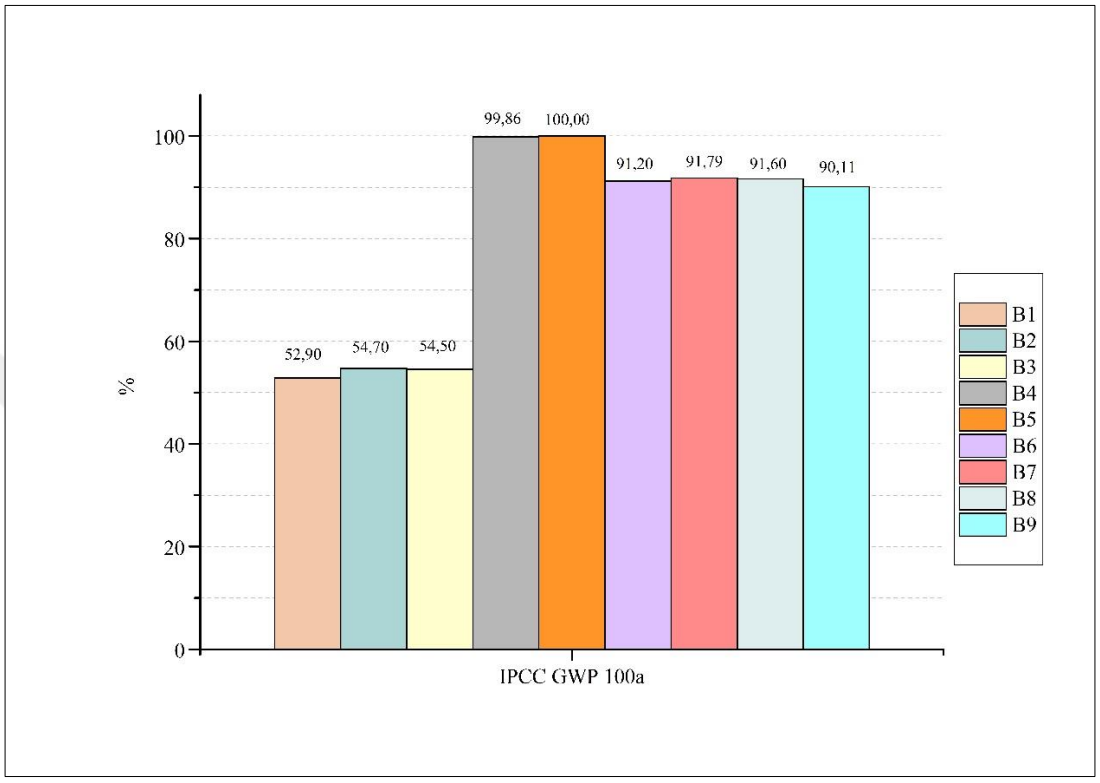
Şekil 4.13. Karbon elyaf sarım denemelerine ilişkin normalizasyon karşılaştırması

Prototip çalışmalarının iklim değişikliğine etkisinin anlaşılması için YDD modelleri IPCC GWP 100a metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Bu metot ürünün yalnızca iklim değişikliğine etkisini detaylı olarak analiz etmekte olup değerlendirilmesi sonucunda aşağıdaki karakterizasyon faktörleri tespit edilmiştir (Çizelge 4.8). En az iklim değişikliği 193,08 kg CO_2 eşdeğeri ile B1 denemesine aittir. En fazla etkiler ise sırasıyla B5 (364,95 kg CO_2 eşdeğeri) ve B4 (364,42 kg CO_2 eşdeğeri) denemelerine aittir.

Çizelge 4.8. Karbon elyaf sarım denemelerinin IPCC GWP 100a'ya göre değerlendirmesi

Prototip Model	**IPCC GWP 100a (kg CO_2 eq)**
B1	193,08
B2	199,63
B3	198,92
B4	364,42
B5	364,95
B6	332,84
B7	335,01
B8	334,28
B9	328,86

Yüz üzerinden karşılaştırma yapılan Şekil 4.13 incelendiğinde büyükten küçüğe etki sıralaması B5(100), B4(99.9), B7(91.8), B8(91.6), B6(91.2), B9 (90.1), B2(54.7), B3(54.5) ve B1(52.9) şeklindedir.

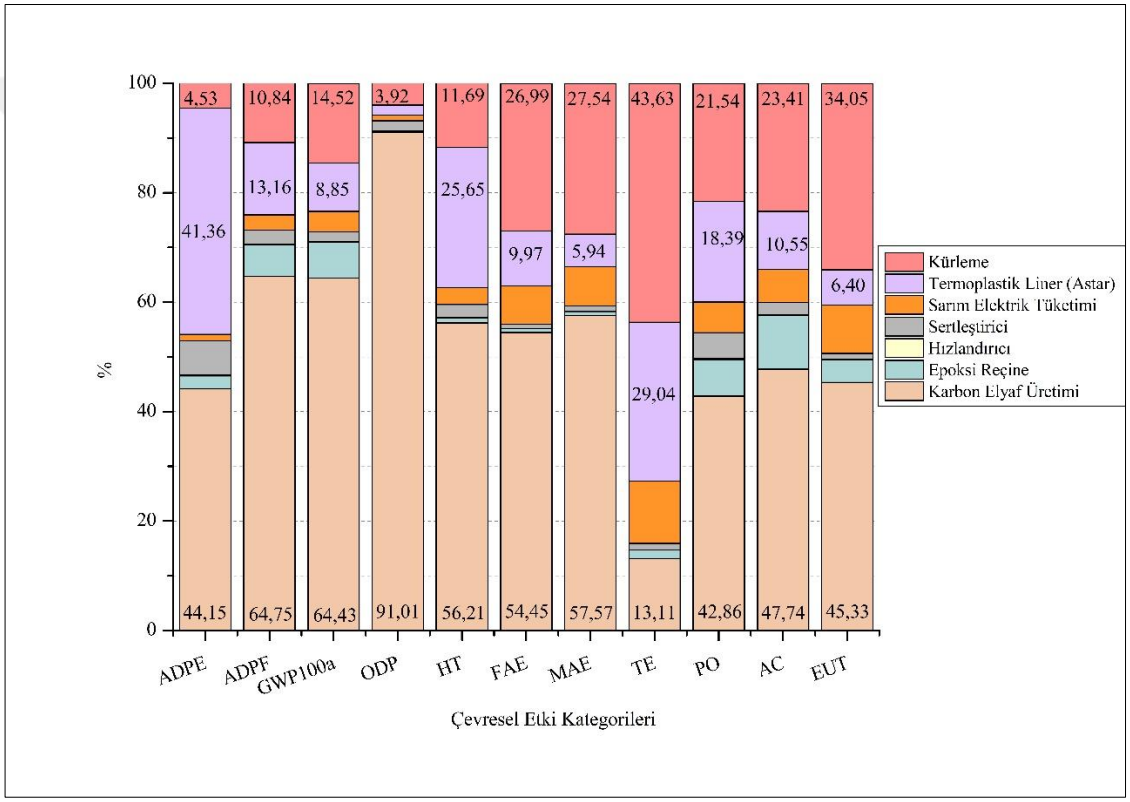


Şekil 4.14. 63 litrelik prototip modellerin iklim değişikliği etkisinin yüzde karşılaştırması

Şekil 4.15'i irdelediğimizde karbon elyaf üretiminin çevresel etki kategorileri üzerindeki baskın etkisi açıkça görülmektedir. Abiyotik tükenme (fosil yakıt kaynaklı) %64,75 ve küresel ısınma potansiyeli değeri %64,43 ile kategorilerinde en büyük katkıyı sağlamakta ve bu süreçlerin çevresel performans üzerindeki etkisini belirgin bir şekilde ortaya koymaktadır.

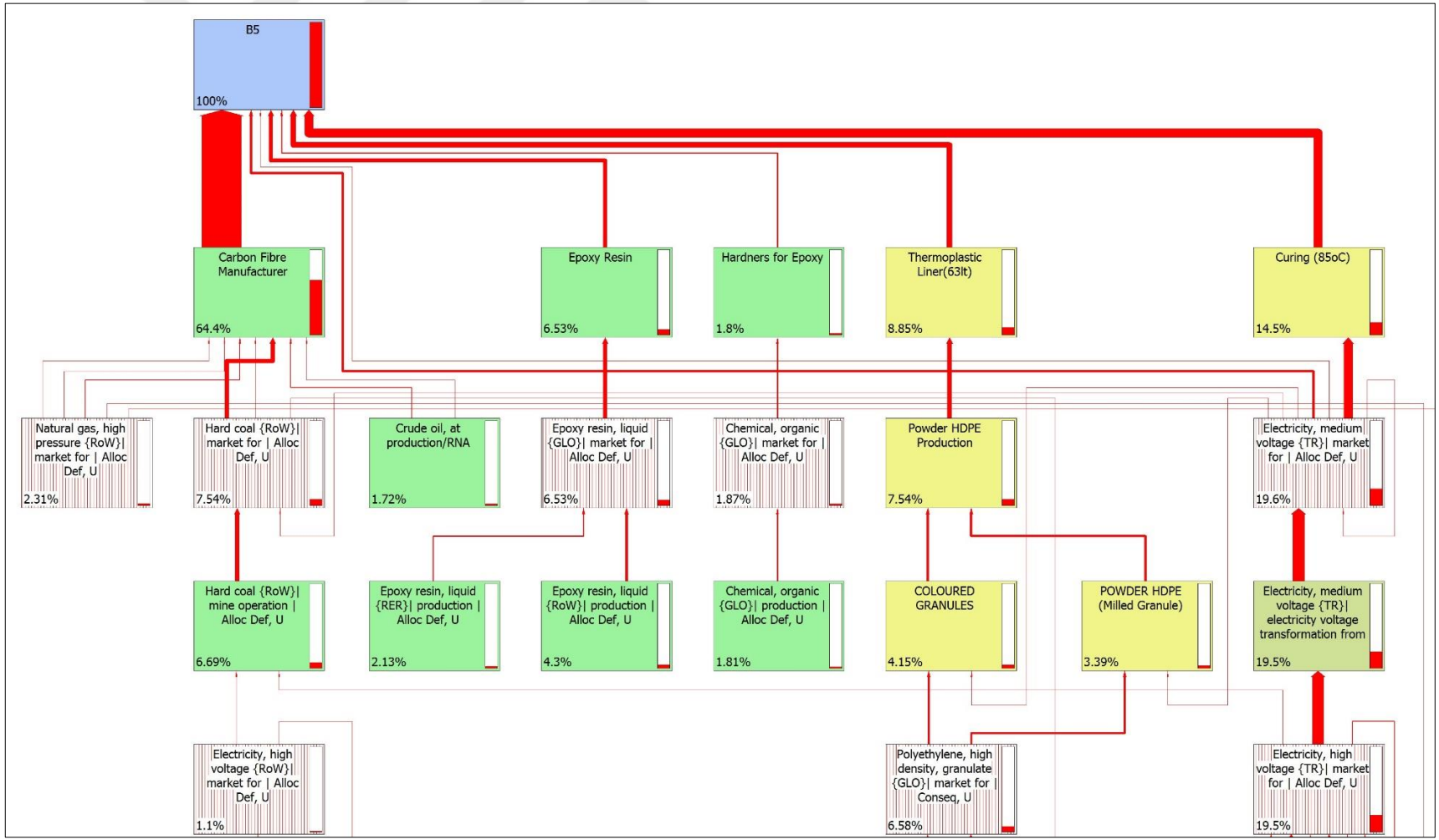
Termoplastik liner (astar) ise, ozon tabakası incelmesi (%91,01) ve karasal ekotoksisite (%42,86) gibi kategorilerde öne çıkarken, ötrofikasyon (%45,33) üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Bunun yanı sıra, kürleme süreci bazı kategorilerde daha düşük seviyelerde olsa da karasal ekotoksisite (%43,63), ötrofikasyon (%34,05) ve deniz ekotoksisitesi kategorilerinde dikkat çekmektedir.

Epoksi reçine, insan toksisitesi (%25,65) ve karasal ekotoksisitesi (%29,04) gibi kategorilerde önemli bir katkı yaparken, sarım elektrik tüketimi ve diğer aşamalar ise daha düşük seviyelerde etkiye sahip olmasına rağmen, tatlısu ekotoksisite (%9,97) ve deniz ekotoksisitesi (%5,94) gibi kategorilerde belirli farklar yaratabilmektedir. Bu bulgular, karbon elyaf üretimi ve termoplastik astar süreçlerinde yapılacak iyileştirmelerin, genel çevresel performans açısından önemli kazanımlar sağlayabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.15. B5 prototipinin karaterizasyona bağlı sıcak nokta analizi

Buna bağlı olarak B5 küresel ısınma potansiyeline ait sankey diyagramı incelendiğinde (Şekil 4.16) sıcak nokta olarak %64,4 karbon fiber üretiminden gelmektedir. Bu noktada yapılması gereken tank üretiminde kullanılan karbon fiber miktarını optimize etmek ve üretiminde temiz enerji kaynağı kullanım miktarını arttırmak olabilir.



Şekil 4.16. B5 prototip modelin küresel ısınma potansiyeline ilişkin sankey diyagramı

İkinci etki en fazla %14,5 ile kürlemeye bağlı enerji tüketiminden, üçüncü en fazla etki ise termoplastik astardan %8,85 etki gelmektedir. Astardan gelen etkinin %6,58'i ise HDPE'den gelmektedir. 8,5 kg astar için kümülatif enerji toplamı 124 MJ ve bunun 109 MJ'ü HDPE üretiminden gelmektedir. 1kg astar için HDPE'den 12,82 MJ enerji harcanır. %6,53 ise kullanılan epoksi reçine ve %1,8 sertleştiriciden gelen katkı olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.16). En önemli etkilerden biri astarda HDPE kullanımıdır.

Walker ve ark. (2020) araştırmalarında farklı polimerlerle astar çalışmıştır. Enerji kullanımı için gözlemlenen en düşük beşikten mezara değerlendirmenin Bio PET ve Bio PHB için 3- 10 MJ/kg arasında olduğu bildirilmiştir. Fosil bazlı polimer verileri 80 MJ/kg civarında bir sonuç kümesi göstermiş olup, HDPE, PET, PP and PS bu bölgede yer almaktadır. PLA ise 40 ila 90 MJ/kg arasında geniş bir yayılım göstermiştir. Polimerlerin Tip IV tanklarda kullanımının teknik performans ve yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarının derinleştirilmesinde fayda sağlayabilir. Bu çalışma ile karşılaştırma yaptığımızda veri tabanından gelen global veriye bağlı olarak, %84 oranında etkinin daha az olduğu dikkat çekmektedir.

Usai ve ark. (2021), yaptıkları çalışmada 105 kg karbon fiber sarımlı Tip IV tankın ve katalizörün üretimi, küresel ısınmanın %53'üne katkıda bulunuyor. Yakıt hücresi sisteminin üretim aşaması boyunca toplamda 5 ton CO_2 eşdeğer üretilmektedir. Depolama tanklarının üretimi, yüksek enerji yoğun karbon fiber üretimi nedeniyle küresel ısınma potansiyeli etkilerine ana katkı sağlayan faktör olarak belirlendi. Tank üretiminin ürettiği 2 ton CO_2 eşdeğer, toplam küresel ısınma potansiyeli etkilerinin %40'ını oluşturuyor. B5 denememiz en fazla çevresel etkisi olan üründür. Tez ile Usai ve ark. (2021) çalışmasını kıyasladığımızda uyumlu ve bir miktar düşüktür.

Agostini ve ark. (2018), çalışmalarında modelledikleri yardımcı güç ünitelerinde tankları oluşturan malzemeler arasında küresel ısınma potansiyeli dağılımı incelemiştir. Tip IV tank için 1kw-2h modelinde küresel ısınma potansiyeli değeri 500 kg CO_2 eşdeğer (tank hacmi 4 litre), tankın karbon fiber miktarı küresel ısınma potansiyeline %71 etki etmekte, epoksi reçine %12, HDPE %9, paslanmaz çelik %7 ve cam fiber %1 etki etmektedir. 1kw-

8h ve 5kw-8h (tank hacmleri 11 ve 17,5 litre) modellerinde ise küresel ısınma değerleri sırasıyla> 500 kg CO_2 eşdeğer ve >1000 kg CO_2 eşdeğer olup; karbon fiber miktarı küresel ısınmaya %75 etki etmekte, epoksi reçine %12, HDPE %10, paslamaz çelik %2 ve cam fiber %1 etki etmiştir. Agostini ve ark. (2018) çalışmasını bu çalışma ile karşılaştırdığımızda, tank hacmi 63 litredir. Buna rağmen, optimizasyon için yapılan tüm çalışmalarda (B1-B9), küresel ısınma potansiyeli değeri Agostini ve ark. (2018) çalışmasına kıyasla oldukça düşüktür.

Çizelge 4.9. B5 küresel ısınma potansiyeline ait havaya emisyon olan ilk yedi etken madde

Etken Madde	**Birim**	**Toplam**	**Karbon Elyaf Üretimi**	**Epoksi Reçine**	**Hızlandırıcı**	**Sertleştirici**	**Sarım Elektrik Tüketimi**	**Termoplastik Astar**	**Kürleme**	**Kalıp Modelleme Elektrik Tüketimi**
Tüm bölmelerin toplamı	kg CO_2 eq	364,95	235,15	23,83	0,22	6,58	13,82	32,30	53,00	0,06
Karbondioksit	kg CO_2 eq	193,01	193,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Karbondioksit, fosil	kg CO_2 eq	140,51	22,39	21,05	0,18	5,55	13,20	27,47	50,63	0,05
Dinitrojen monoksit	kg CO_2 eq	0,92	0,27	0,01	0,00	0,03	0,11	0,09	0,42	0,00
Metan	kg CO_2 eq	2,97	2,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Metan, biyojenik	kg CO_2 eq	0,67	0,50	0,06	0,00	0,01	0,01	0,04	0,05	0,00
Metan, diklorodifloro-, CFC-12	kg CO_2 eq	0,14	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Metan, fosil	kg CO_2 eq	26,35	15,82	2,72	0,03	0,99	0,44	4,66	1,68	0,00

Karbon fiber üretiminin detaylarına inildiğinde elektrik tüketimine bağlı emisyonların yüksek oranda etkin olduğu görülmüştür (Çizelge 4.9). B5 denemesinde toplam kg CO_2 eşdeğeri 364,95'dir. Bu değerin 235,15 kg CO_2 eq karbon fiber üretimine ait ortaya çıkmaktadır. Karbon fiber üretimine ilişkin olarak enerji tüketiminden kaynaklı olarak oluşan karbondioksit emisyonu 193,01 ve fosil kaynaklı karbondioksit emisyonu ise 140,51 kg CO_2 eşdeğerdir. Üçüncü en fazla etki 26,35 kg CO_2 eşdeğer ile methan (fosil) kaynaklıdır.

4.5. 63 Litrelik Tank Prototipleri için Patlama Testi Sonuçları ve Çalışmaların Çevresel Etki Karşılaştırması

Çevresel ve patlama testi açısından optimum ürünün belirlenmesi için Çizelge 4.10'da IPCC GWP 100a, CML Baseline metoduna göre karakterizasyon etki kategorileri arasında yer alan deniz ekotoksisitesi ve patlama test sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.10. Prototiplerde öne çıkan çevresel bileşenleri ile patlama test sonuçlarının karşılaştırılması

	IPCC GWP 100a (kg CO_2 eq)	**MAE (kg1,4-DB eq)**	**Patlama Hedef**	**Patlama Gerçekleşen**
B1	193,08	2,17E+05	200	120
B2	199,63	2,18E+05	200	190
B3	198,92	2,18E+05	200	>200
B4	364,42	3,49E+05	470	375
B5	364,95	3,46E+05	470	399
B6	332,84	3,17E+05	470	305
B7	335,01	3,17E+05	470	520
B8	334,28	3,18E+05	470	457
B9	328,86	3,17E+05	470	535

Sonuçları değerlendirecek olursak B1; IPCC'ye göre etkisi 193,08 kg CO_2 eşdeğer ve deniz ekotoksisitesi 2,17E+05 kg1,4-DB eşdeğeri en düşük deneme olmasına rağmen 200 bar hedeflenen basınç değerine ulaşmadan 120 bar'da tank patlamıştır. B2; IPCC'ye göre etkisi 199,63 kg CO_2 eq ve deniz ekotoksisitesi 2,18E+05 kg1,4-DB eşdeğeri ile çevresel etkisi B1'e en yakın ikinci denemedir. Hedeflenen 200 bar basınç değerine ulaşmadan

190 bar'da tank patlamıştır. Dolayısıyla IPCC'ye göre etkisi en düşük ikinci denemesi olmasına rağmen seçilemez. Teknik olarak yeterliliği sağlamamıştır. B3; 200 bar için hedefe ulaşılmıştır. Çevresel etkisinin düşük olması ve hedeflenen basınca kadar dayanım göstermesi, optimum ürün olarak seçilebileceğini işaret etse de metal başlığın bulunduğu kısımda hasar oluşması, sarım açılarında deneme sayısının artırılmasıyla bütünlüğün sağlanabileceğini ve bu doğrultuda AR-GE çalışmalarının yapılması gerektiğini göstermektedir. B1'den B5'e kadar olan denemelerde tex değeri 800 g/km olarak belirlenmiştir.

B4: Hedef basınç 470 bar olarak belirlenmiştir. Ürün 375 bar'a dayanmış, ancak 200- 250 bar standardı için çevresel etkisi yüksek olarak değerlendirilmiştir. Dolayısıyla, IPCC'ye göre 364,42 kg CO_2 eşdeğeri ile en yüksek ikinci küresel ısınma potansiyeline (GWP) ve 3,49E+05 kg 1,4-DB eşdeğeri ile deniz ekotoksisitesinde en yüksek değerlere sahip deneme olması nedeniyle optimum ürün olarak seçilmemiştir.

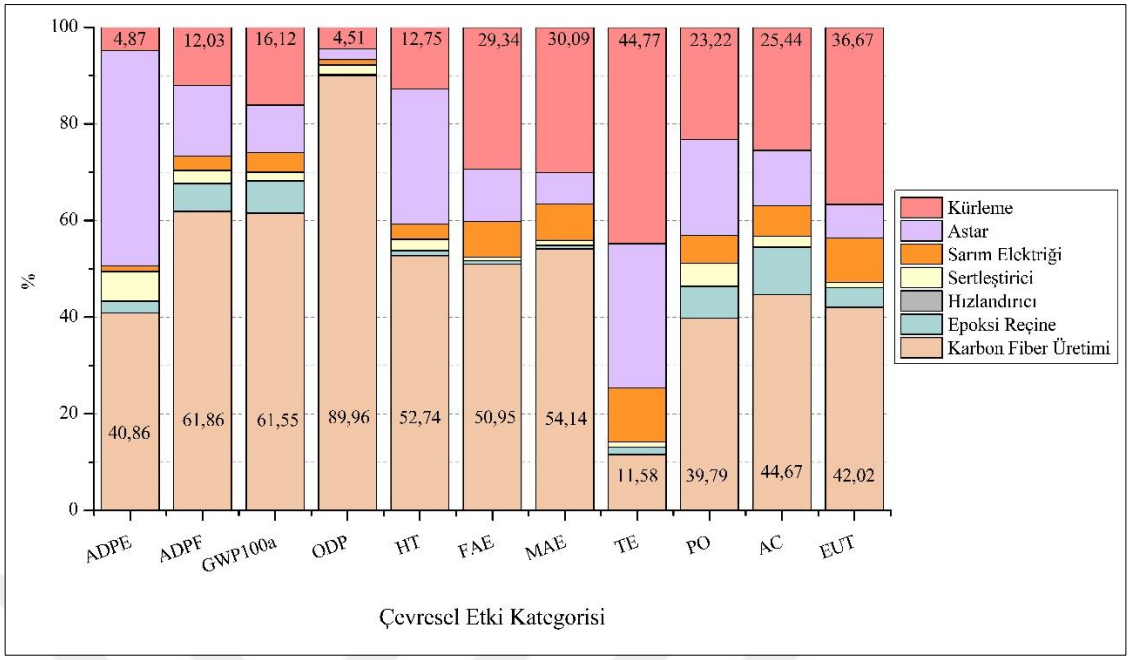
B5: Hedef basınç 470 bar olarak belirlenmiştir. Ürün 390 bar'a kadar dayanım göstermiştir. Çevresel açıdan değerlendirildiğinde, IPCC'ye göre 364,95 kg CO_2 eşdeğeri ile en yüksek GWP değerine ve 3,46E+05 kg 1,4-DB eşdeğeri ile deniz ekotoksisitesinde en yüksek ikinci değere sahip deneme olması nedeniyle optimum ürün olarak seçilmemiştir.

Birim alandaki karbon fiber miktarını arttırarak bütünlüğü ve dayanımı arttırmak mümkün olması nedeniyle B6-B9 aralığındaki denemelerde tex değeri 1650 gr/km olarak değiştirilmiştir. B6'da kullanılan elyaf miktarı B4 ve B5'e göre bir miktar düşmüştür. Büyük oranda buna bağlı olarak IPCC'ye göre analiz edilen küresel ısınma potansiyeli ve deniz ekotoksisite değerleri düşmüştür. Fakat ürün 305 bar'da patladığı için optimum ürün olarak seçilememiştir. B7; tank 520 bar'da patlamıştır. 470 bar dayanım için bu denemeye ait reçete üzerinde çalışmak umut vaat etmektedir. Çevresel açıdan baktığımızda en fazla çevresel etkiye sahip üçüncü denemedir. IPCC'ye göre etkisinin 335,01 kg CO_2 eşdeğer ve deniz ekotoksisite değerinin 3,17E+05 kg1,4-DB eq olduğunu görüyoruz. B8; çevresel etki olarak B7'ye çok yakındır. Bu denemede kullanılan elyaf miktarı 227 gr az fakat reçine miktarı 150 gr fazladır. Buna bağlı olarak IPCC'ye göre

etkisinin 334,28 kg CO_2 eşdeğer ve deniz ekotoksisite değerinin 3,18E+05 kg1,4-DB eşdeğeri şeklinde değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. B9'un IPCC'ye göre etkisi 328,86 kg CO_2 eşdeğeri ve deniz ekotoksisite değeri 3,17E+05 kg1,4-DB eşdeğeri şeklindedir. Tank hedef olarak belirlenen 470 bar basınca ulaşmış ve B9 prototipi 535 bar'a kadar dayanmıştır. Reçete üzerinde çalışmak umut vaat etmektedir.

Çalışmaları incelediğimizde Tip IV yakıt tanklarındaki karbon fiber miktarını azaltmak için kompozitte kullanılan reçine, fiber hacim oranı, reçinenin sıkıştırılması ve tank tasarımı, epoksi reçinenin düşük maliyetli bir vinil ester reçineyle değiştirilmesi, kompozitin yoğunluğunu azaltabilir ve fiber hacim fraksiyonunu artırabilir, bu da kompozit ağırlığında bir azalmaya neden olabilir (Hua ve ark., 2017). Araştırmamızda B7, B9 ve B3 prototipleri için reçine değişikliği ve tank tasarımı çalışmaları devam edilerek kullanılan kompozit miktarında azaltma çalışmaları yapılabilir.

Aynı zamanda alternatif olarak geri dönüştürülmüş karbon elyaf kullanılması çevresel etkileri önemli ölçüde azaltabilir. Kawajiri ve ark. (2022), Carbon Fiber Recycling Co. şirketindeki piroliz ve Hitachi Chemical şirketindeki solvoliz geri dönüşüm süreçlerini analiz ettiler. Sonuçlar, her iki geri dönüşüm yönteminin de işlenmemiş karbon elyaf (vCFs) üretimine kıyasla çevresel etkileri azaltma konusunda umut verici sonuçlar sunduğunu göstermiştir. Carbon Fiber Recycling Co. pirolizinden kaynaklanan sera gazı emisyonları 1,52 kg-CO_2 eq/kg iken Hitachi Chemical solvolizinden kaynaklanan emisyonlar 1,92 kg-CO_2 eq/kg'dır. Her iki yöntemden kaynaklanan sera gazı emisyonları, vCF'ler tarafından üretilen sera gazı emisyonlarının (24,00 kg-CO_2eq/kg) altında kalmıştır. Tez kapsamında da karbon elyaftan gelen 1 kg için 24,2 kg-CO_2 eşdeğer olarak bulunmuştur. Gelecekteki çalışmalarda geri dönüştürülmüş karbon elyafların teknik özellikleri derinlemesine incelenerek, Tip IV tanlarda kullanılması çevresel açıdan olumlu katkı sağlayabilir.



Şekil 4.17. B9 prototipinin karaterizasyona bağlı sıcak nokta analizi

Şekil 4.17'yi incelediğimizde optimum ürün olarak seçilen B9 prototip modelin proses bazlı etkileri incelediğimizde karbon fiber üretimi, neredeyse tüm çevresel etki kategorilerinde en yüksek etkiyi oluşturmaktadır. Özellikle ozon tabakası tükenmesi kategorisinde %89,96 ile belirgin bir şekilde baskın olup, küresel ısınma potansiyeli ve abiyotik tükenme (fosil kaynaklı) kategorilerinde de %61,86'lık bir değer elde edilmiştir. Bu durum, karbon fiber üretiminin enerji ve hammadde tüketimi açısından oldukça yoğun olduğunu göstermektedir.

Kürleme işlemi, özellikle karasal toksisite kategorisinde %44,77 oranında en yüksek katkıyı sağlamaktadır. Ayrıca, tatlısu ekotoksisitesi, deniz ekotoksisitesi ve ötrifikasyon gibi ekotoksisite kategorilerinde de %30 civarında etkisi bulunmaktadır. Bu süreçte kullanılan kimyasallar ve enerji tüketimi, çevresel etkilerin artmasına neden olmaktadır.

Astar uygulaması, özellikle GWP kategorisinde dikkat çekici bir etkiye sahip olup, karbon salımına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Diğer kategorilerdeki etkisi ise %2 ile %25 arasında değişiklik göstermektedir.

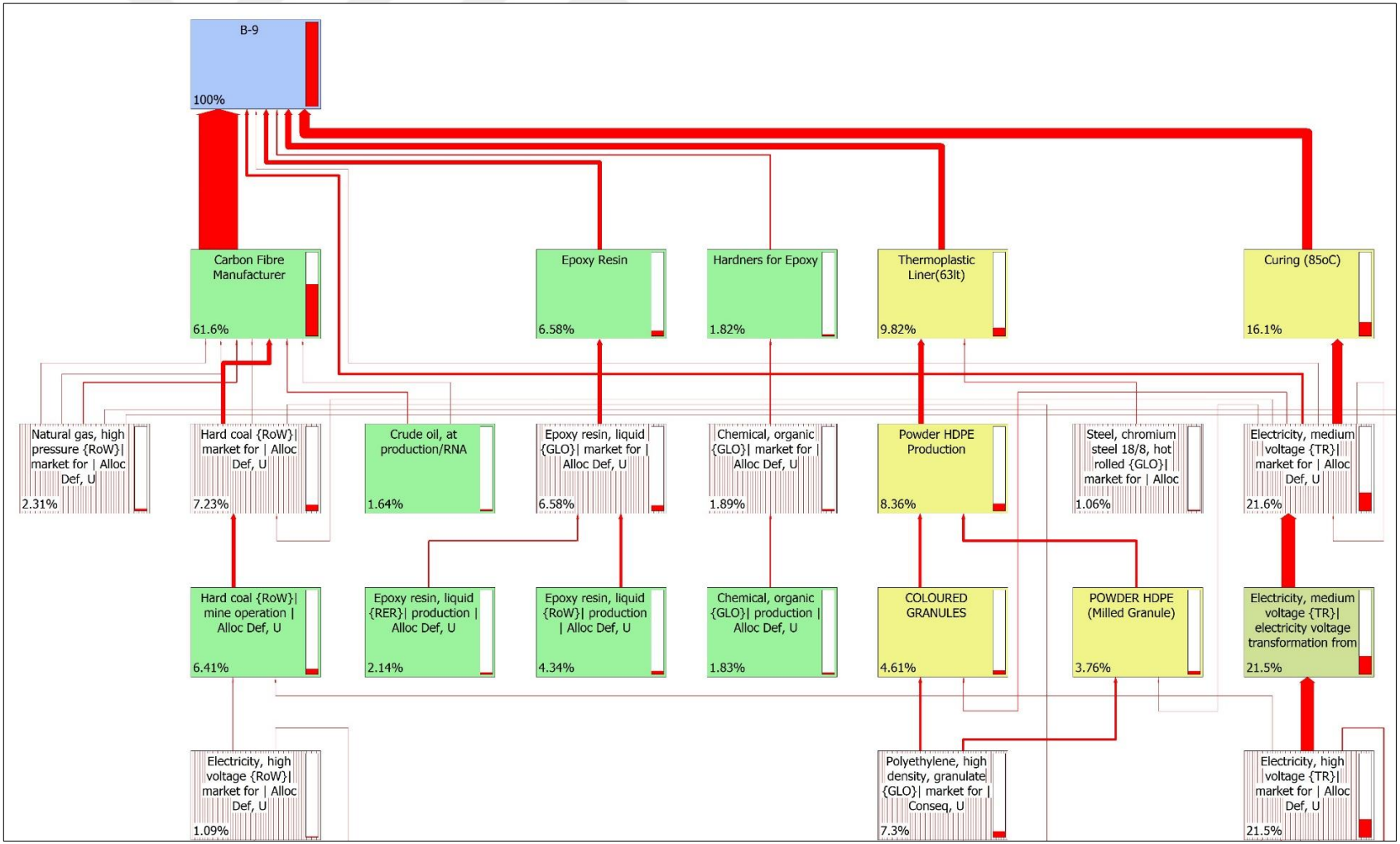
Sarım işlemi sırasında kullanılan elektrik, genellikle %10'un altında kalan etkisiyle nispeten düşük bir çevresel yüke sahiptir. Ancak, elektrik tüketiminin daha verimli hale getirilmesi, bu etkilerin daha da azaltılmasına katkı sağlayabilir.

Sertleştirici kullanımı, düşük seviyede bir çevresel etki göstermesine rağmen, özellikle asidifikasyon kategorisinde belirli bir katkıya sahiptir ve bu nedenle dikkat edilmesi gerekmektedir. Benzer şekilde, hızlandırıcı kullanımı da düşük bir etkiye sahip olmasına karşın, tatlısu ekotoksisitesinde ve ötrifikasyon kategorilerinde etkisini göstermektedir.

Epoksi reçine ise özellikle fotokimyasal oksidayon kategorisinde belirgin bir etkiye sahiptir. Kimyasal yapısı ve kullanım sürecinden kaynaklanan emisyonlar, bu kategorideki çevresel yükü artırmaktadır.

Bu bulgular, çevresel etkilerin azaltılması için karbon fiber üretimi ve kürleme işlemlerinde enerji verimliliği ile kimyasal kullanımının optimize edilmesinin kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

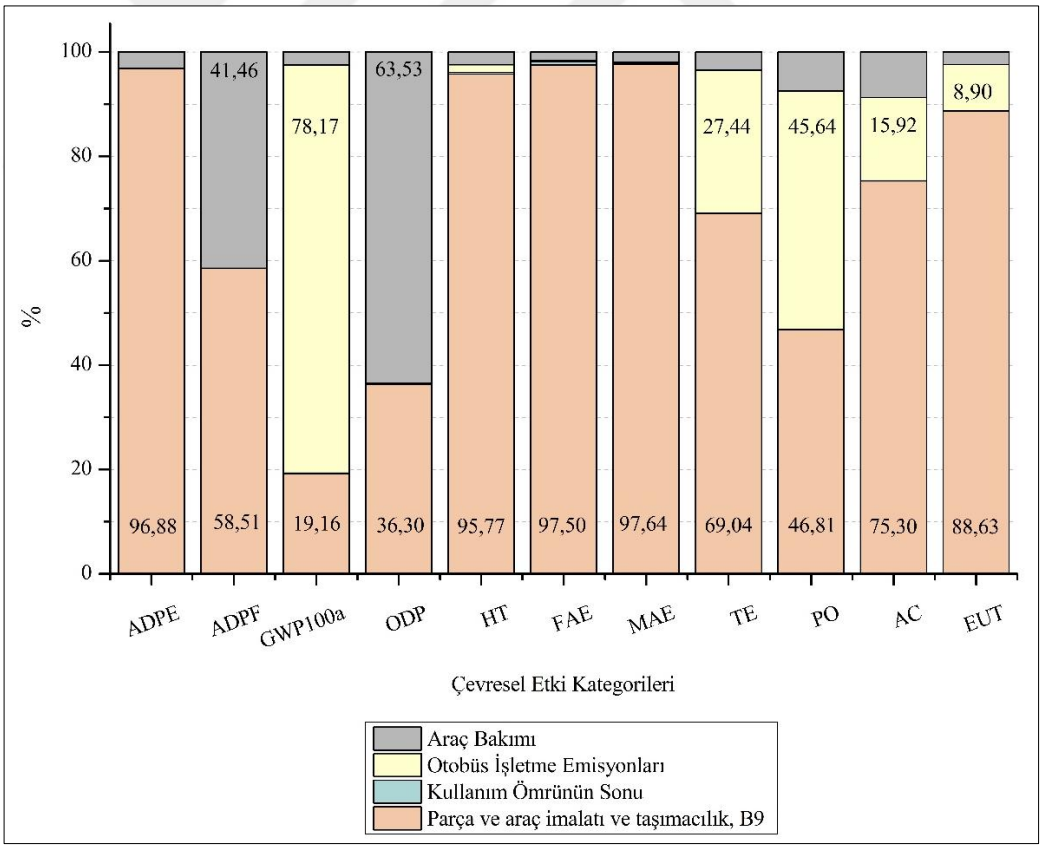
B9 prototip modelin küresel ısınma potansiyeline ilişkin sankey diyagramını incelediğimizde de bu bulgular doğrulanmaktadır. Karbon fiber üreiminden %61,6, kürlemeden %16,1 ve termoplastik astar üretiminden de %9,82 etki gelmektedir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. B9 prototip modelin küresel ısınma potansiyeline ilişkin sankey diyagramı

4.6. Şehir İçi Bir Otobüsün Yaşam Döngüsünün Değerlendirilmesi ve Tank Üretiminin Çevresel Etkilerdeki Rolü

Bu bölümde, otobüsün üretim, operasyonel aşaması (işletim emisyonları ve bakım) ve bertaraf aşaması değerlendirildi. Çalışma, işlevsel birim başına yolcu-kilometre (124.800.000 yolcu x km) başına etki değerlendirme sonuçlarını yansıtmaktadır. YDD modeli kapsamında, prototip üretim bölümünde ürün olarak 12 litre için A11 ve 63 litre için ise B9 prototip modeli optimum ürün olarak belirlenmiştir. 63 litre tankların patlatma test sonuçlarının 470 bar basınç dayanımının üzerine çıkması ve hacim olarak şehir içi otobüslerde çoklu kullanıma daha uygun olması nedeniyle otobüs senaryosu için seçilmiş ve otobüs üretimi aşamasına girdi olarak kullanılmıştır. Bu bağlamda modellenen otobüsün üretim, kullanım, bakım ve berterafı aşamaların çevresel etki karakterizasyonu Şekil 4.19'daki gibidir.



Şekil 4.19. Sıkıştırılmış Doğal Gaz (CNG) yakıtlı otobüsün çevresel etkilerinin karakterizasyonu

Küresel ısınma potansiyeli sonuçları incelendiğinde, %78,17'inin otobüs işletme emisyonlarından, %19,16'sı otobüs parçalarının üretimi, geriye kalan bölümü ise araç bakım (%2,51) ve kullanım ömrü sonundan (%0,16) süreçlerinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir.

Çevresel etkiler dikkate alındığında, ozon tabakasının incelmesine en yüksek etki %63,53 ve abiyotik tükenme (fosil kaynaklı) %41,46 ile araç bakımdan kaynaklanmaktadır. Diğer çoğu çevresel etkide ise en yüksek sonuçlar otobüs üretiminden gelmektedir. Üretim kaynaklı en yüksek beş çevresel etki sırasıyla deniz ekotoksisitesi (%97,64), tatlısu ekotoksisitesi (%97,57), abiyotik tükenme (mineral kaynaklı) (%96,88), insan sağlığı toksisitesi (%95,77) ve ötrofikasyon (%88,63) olarak belirlenmiştir (Şekil 4.19).

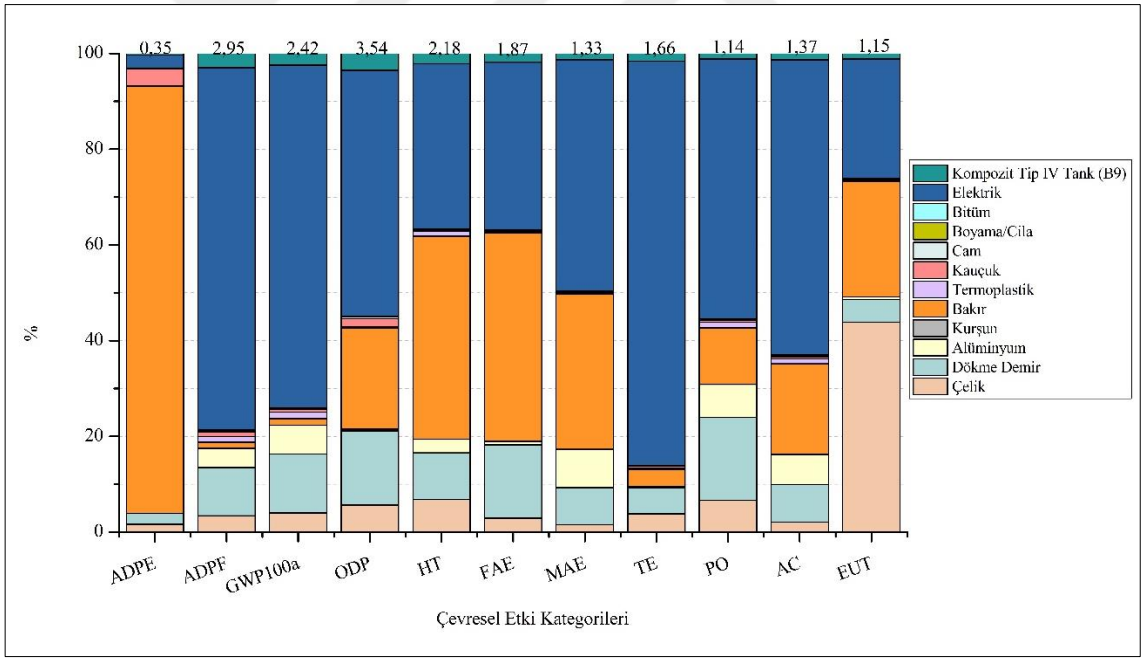
Çizelge 4.11. Şehir içi bir otobüsün ömrü boyunca 124.800.000 yolcu-kilometre başına çevresel etki

Etki Kategorisi	**Birim**	**Toplam**	**Parça ve araç imalatı ve taşımacılık, B9**	**Kullanım Ömrünün Sonu**	**Otobüs İşletme Emisyonları**	**Araç Bakımı ve Onarımı**
ADPE	kg Sb eq	1,05E-08	1,02E-08	1,78E-12	0,00E+00	3,26E-10
ADPF	MJ	4,45E-02	2,60E-02	1,16E-05	0,00E+00	1,85E-02
GWP100a	kg CO_2 eq	8,69E-03	1,67E-03	1,43E-05	6,79E-03	2,18E-04
ODP	kg CFC-11 eq	1,37E-10	4,98E-11	1,85E-13	0,00E+00	8,70E-11
HT	kg 1,4-DB eq	1,26E-03	1,21E-03	3,87E-06	1,85E-05	3,09E-05
FAE	kg 1,4-DB eq	8,45E-04	8,24E-04	5,60E-06	1,05E-06	1,44E-05
MAE	kg 1,4-DB eq	3,17E+00	3,09E+00	6,53E-03	4,03E-03	6,42E-02
TE	kg 1,4-DB eq	2,10E-06	1,45E-06	1,05E-09	5,77E-07	7,31E-08
PO	kg C_2H_4 eq	1,35E-06	6,32E-07	6,28E-10	6,16E-07	1,01E-07
AC	kg SO_2 eq	1,64E-05	1,23E-05	6,66E-09	2,61E-06	1,43E-06
EUT	kg PO_4^{-3} eq	6,59E-06	5,84E-06	4,25E-09	5,87E-07	1,58E-07

Tez çalışmasında otobüs üretimine ilişkin küresel ısınma potansiyeli sonuçları incelendiğinde, toplam değerin yolcu kilometresi başına 8,69E-03 kg CO_2 eşdeğeri olduğu görülmektedir. Bu etkinin en önemli katkısı 6,79E-03 kg CO_2 eşdeğeri otobüs işletme emisyonları iken, üretimden kaynaklanan ikinci en önemli etki 1,63E-03 kg CO_2

eşdeğeri olarak belirlenmiştir. Kullanım emisyonları, otobüsün kullanım kilometresiyle orantılı olarak artmakta olup bizim senaryomuz için 1,43E-05 kg CO_2 eşdeğer olarak bulunmuştur.

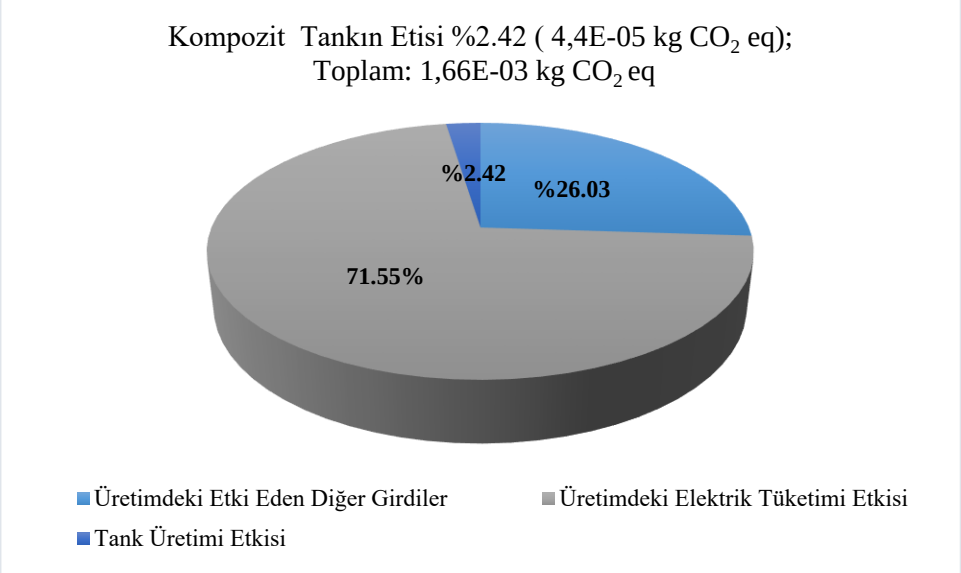
Nordelöf ve ark. (2019) yaptığı çalışmada, üretim aşamasında elektrikli otobüsün küresel ısınma değerinin 1,9 g CO_2 eşdeğeri/ (kişi x km), PHEV Dizel'in 1,5 g CO_2 eşdeğeri/ (kişi x km) ve konvansiyonel dizelin 1,2 g CO_2 eşdeğeri/(kişi x km) olduğu bulunmuştur. AB elektrik kullanımına göre, beşikten mezara yaşam döngüsü bazında küresel ısınma etkisi, elektrikli otobüs için 48 g CO_2 eşdeğeri/(kişi x km), PHEV Dizel için 63 g CO_2 eşdeğeri/(kişi x km) ve konvansiyonel dizel için 93 g CO_2 eşdeğeri/(kişi x km) olarak hesaplanmıştır. Tez kapsamında incelenen otobüs yaşam döngüsü sistem sınırları dahilinde küresel ısınma 1,67 g CO_2 eşdeğeri olarak belirlenmiş ve bu değerin elektrikli ve dizel otobüs üretimi arasında bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.20. Tank üretiminin parçaların ve araçların imalatı ile taşıma aşamasında girdilerin yüzde dağlımı

Şekil 4.20'de gösterilen malzemelerin tamamı otobüs üretiminde kullanılan bileşenler olup, birbirlerinin alternatifi olmaktan ziyade, farklı işlevlere yönelik katkıları bulunmaktadır. Tip IV tank (B9), yakıt depolama amacıyla kullanılırken, çelik, dökme

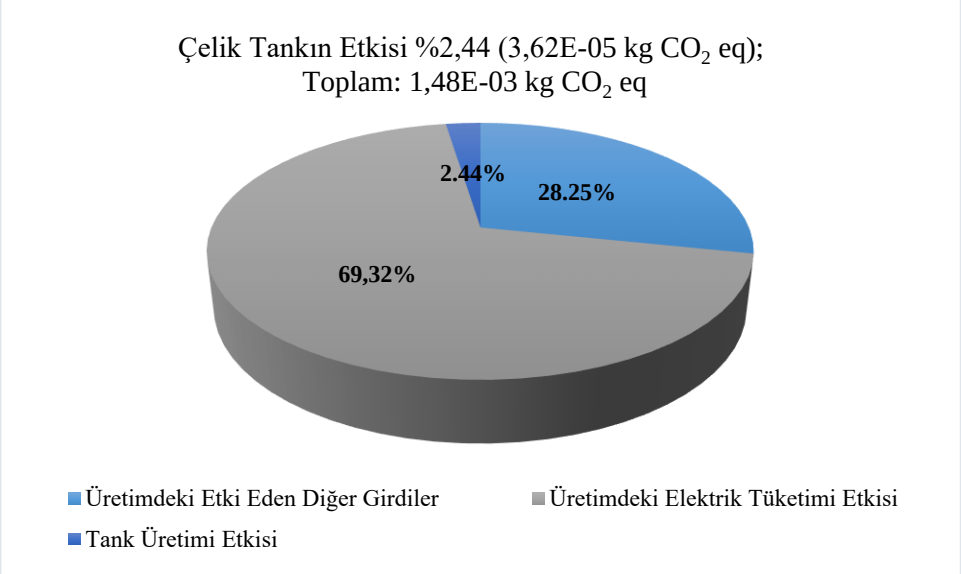
demir ve alüminyum gibi malzemeler, taşıyıcı yapı, mekanik dayanım, ya da diğer temel bileşenlerde tercih edilmektedir. Bu farklı kullanım alanları nedeniyle çevresel etkiler analizinde her malzemenin işlevsel katkıları göz önünde bulundurulmalıdır. Küresel Isınma Potansiyeli açısından en büyük katkı elektrikten, ardından dökme demir tarafından yapılırken, Tip IV tank (B9) sadece %2,42 ile diğer bileşenlere kıyasla çok düşük bir etki yaratmaktadır. Ozon tabakası tükenmesi, insan sağlığı ekotoksisitesi, tatlısu ekotoksisitesi, deniz ekotoksisitesi, karasal ekotoksisite, asidifikasyon ve ötrofikasyonda kategorilerinde de elektrik, bakır ve dökme demir baskın etkilere sahiptir. Ancak Tip IV tank bu kategorilerde yalnızca %1,14 ile %3,54 aralığında düşük katkılar sunmaktadır. Tip IV tank (B9), düşük çevresel etkileri sayesinde otobüslerde çevre dostu bir bileşen olarak değerlendirilmektedir. Ancak diğer malzemelerle karşılaştırıldığında çevresel katkıları farklı işlevsel kullanımların bir sonucu olduğundan, değerlendirme yapılırken tüm bu malzemelerin toplam çevresel etkileri ve nihai ürüne kattığı işlev göz önüne alınmalıdır. Örneğin, çelik yapı dayanıklılığında vazgeçilmezken, Tip IV tank (B9) sürdürülebilir yakıt depolama için önemli bir yenilik olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 4.21. Otobüs üretim aşamasında kompozit tank kullanımına bağlı küresel ısınma potansiyeli üzerindeki etki dağılımı

Üretim emisyon girdileri, çevresel ve teknik açıdan en uygun B9 kompozit tankının seçilip otobüs üretim modellemesine dahil edilmesiyle birlikte, otobüs üretimini içermektedir. Yakıtı tankı üretimi dışında otobüsün ve parçalarının üretimi aşaması yolcu kilometresi başına incelendiğinde, %71,55'inin üretimdeki elektrik tüketiminden

kaynaklandığı görülmektedir. %26,03'ü tüketilen diğer malzemelerden, %2,42'si ise Tip IV tanklarının üretiminden kaynaklanmaktadır (Şekil 4.21). Çevresel açıdan incelediğimizde tank üretimlerinden gelen değerler yakın olup proses bazlı değişkenlik gösterebilir . Milojević ve Pešić, 2010'in çalışmalarına dayanarak tamamı çelik tank için 1.1 kg/l kabulünden 63 litreni 69,9 kg olduğu hesaplanmıştır. Üretim basamağı özelinde eğer kompozit tanklar yerine her biri 69,9 kg ağırlığında çelik tank kullanılsaydı . Operasyonel aşamada 16 kompozit tank (B9) kullanıldığında boş ağırlık 363,68 kg'a karşılık gelirken, çelik tankların ağırlığı 1108,80 kg denk gelmektedir. Bu koşullar altında, tankların ağırlığı oranında azalmakta %66,8 ve araç ağırlığı %5,97 oranında düşmektedir. Bu durum, yakıt tüketimi ve ilgili operasyonel emisyonlar üzerinde doğrudan olumlu bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.22. Otobüs üretim aşamasında çelik tank kullanımına bağlı küresel ısınma potansiyeli üzerindeki etki dağılımı

Moca ve ark. (2020), bataryalı elektrikli otobüsler (BEB), dizel otobüsler ve yakıt hücreli elektrikli otobüsler (FCEB) olmak üzere üç farklı otobüs türünün yaşam döngüsü değerlendirmesini gerçekleştirmiştir. Değerlendirme hem FCEB'lerde hem de dizel otobüslerde, ömür boyu karbondioksit emisyonlarının %75'inden fazlasının kullanım aşamasında gerçekleştiğini ve üretim aşamasının ortalama olarak yaklaşık %15 katkı sağladığını ortaya koymuştur. Buna karşılık, BEB'lerde emisyonların %50'den fazlası üretim aşamasında, ağırlıklı olarak hidrojen yakıtı üretim kaynağından dolayı

oluşmaktadır. Tezde, yaşam döngüsü aşamalarındaki emisyonların yüzdesel dağılımı, FCEB'ler ve dizel otobüslerinkiyle benzer bir katkı sergilemektedir.

CNG otobüslerinin benimsenmesinin sosyal göstergeleri desteklediği ve en düşük yaşam döngüsü maliyetine sahip olduğu gösterilmiştir. Buna karşılık, elektrikli otobüsler çevresel göstergeler açısından avantaj sağlamakta, ancak CNG otobüslerine kıyasla biraz daha yüksek yaşam döngüsü maliyetlerine neden olmaktadır. Dizel otobüslerin ise en kötü çevresel etkilere, önemli sosyal etkilere ve CNG otobüslerine göre en yüksek yaşam döngüsü maliyetlerine sahip olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada, CNG otobüslerinin emisyonlarının 1-1,2 kg CO_2 eşdeğeri/km olduğu gözlemlenmiştir (Elagouz ve ark., 2021). Tezde bu değer daha düşük olup, bu durum daha geniş menzil ve daha yüksek yolcu kapasitesine bağlanmaktadır.

Marmiroli ve ark. (2020), CNG hafif ticari araçların üretimiyle ilişkili toplam küresel ısınma potansiyelinin (GWP), bileşen üretimi, imalat ve ara taşıma dahil olmak üzere 2,63E+04 kg CO_2 eşdeğeri olduğunu bulmuşlardır. Sadece CNG tanklarının üretimi, 2,46E+03 kg CO_2 eşdeğeriyle küresel ısınma potansiyelinin %9,5'ini oluşturmaktadır. Çalışmamızda, üretimle ilgili veriler, emisyonların %2,42'sinin Tip IV tanklarının üretiminden, geri kalan emisyonların ise tüketilen diğer malzemelerden kaynaklandığını göstermektedir. YDD sonuçları arasında karşılaştırmalar yapmak kolay değildir. Çünkü bu durum çalışmanın hedeflerine ve kapsamına bağlıdır. Değerlendirmeler benzer ömürler ve işlevsel birimlere sahip olabilirken, uygulayıcıların farklı teknik özellikleri benimsemesiyle değişkenlik ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, üretimle ilgili veritabanlarının geliştirilmesi ve karşılaştırılması, önemli bir kaynak oluşturacak şekilde daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Çizelge 4.12. Otobüs üretimi parçalarının çevresel etkisinin karşılaştırılması

Referans	Program/Veritabanı	Yakıt Türü	Araç Türü	Katkı (%)	Üretim	Kullanım Sonu	Kullanım Emisyonları	Bakım	Toplam Yaşam Döngüsü
Moca ve ark., 2020	GREET	BEB FCEB Diesel	Otobüs	BEB: Üretim ~%50, Kullanım ~%30, Kullanım Sonu+Bakım: ~%20 FCEB ve Diesel: Üretim ~%15, Kullanım ~%75, Kullanım Sonu+Bakım: ~%10	-	-	-	-	BEB: 1*10⁶ g CO_2-eşit / otobüs FCEB: 3$10^6$ g CO_2-eşit / otobüs Diesel: 1.5*10^6 g CO_2-eşit / otobüs
Nordelöf ve ark., 2019	Ecoinvent v.3.3	Elektrik PHEV Diesel HEV Diesel Konvansiyonel Diesel	Otobüs	Elektrikli AB: Üretim: %57,24, Kullanım Sonu: %7,59, Kullanım: %21,38, Bakım: %13,9 PHEV Diesel AB: Üretim: %11,63, Kullanım Sonu: %1,62, Kullanım: %84, Bakım: %2,75 HEV Diesel AB: Üretim: %11,48, Kullanım Sonu: %1,51, Kullanım: %84,59, Bakım: %2,42 Konvansiyonel Diesel: Üretim: %6,83, Kullanım Sonu: %1,07, Kullanım: %90,72, Bakım: %1,38	Elektrikli AB: 8,3 g CO_2 eq / kişi x km PHEV Diesel AB: 7,2 g CO_2-eq / kişi x km HEV Diesel: 7,6 g CO_2-eq / kişi x km Konvansiyonel Diesel: 6,4 g CO_2-eq / kişi x km	Elektrikli AB: 1,1 g CO_2-eq/ kişi x km PHEV Diesel AB: 1,0 g CO_2-eq / kişi x km HEV Diesel: 1,0 g CO_2-eq / kişi x km Konvansiyonel Diesel: 1,0 g CO_2-eq / kişi x km	Elektrikli AB: 3,1 g CO_2 eq / kişi x km PHEV Diesel AB: 52 g CO_2-eş / kişi x km HEV Diesel: 56 g CO_2-eş / kişi x km Konvansiyonel Diesel: 85 g CO_2-eş / kişi x km	Elektrikli AB: 2,0 g CO_2 eq / kişi x km PHEV Diesel AB: 1,7 g CO_2 eq/ kişi x km HEV Diesel: 1,6 g CO_2 eq / kişi x km Konvansiyonel Diesel: 1,3 g CO_2-eq / kişi x km	ADP: Elektrikli AB: 480 g Sb eq/ (kişi x km), 14,5 g CO_2 eq/(kişi x km) PHEV Diesel AB: 440 g Sb-eq/(kişi x km), 61,9 g CO_2 eq/(kişi x km) HEV Diesel: 430 g Sb eq/(kişi x km), 66,2 g CO_2-eş/(kişi x km) Konvansiyonel Diesel: 360 g Sb-eq/(kişi x km), 93,7 g CO_2-eş/(kişi x km)

Çizelge 4.12. Otobüs üretimi parçalarının çevresel etkisinin karşılaştırılması (devamı)

Lındholm ve Lorentzon, 2019	GaBi	Diesel	Otobüs	-	-	-	GWP: 2,89 kg CO_2 eq AP: 0,00417 kg SO_2 eq EP: 0,00086 kg PO_4^{-3} eq	-	-
Shinde ve ark., 2018	GaBi	CNG Diesel	Otobüs	-	-	-	GWP: 16-20 g CO_2 eq / (kişi x km) AP: 30-90 mg SO_2 eq / (kişi x km) EP: 3-18 mg PO_4-eq / (kişi x km) POCP: 5-18 mg C_2H_4 eq/ (kişi x km) ADP: 15-18 µg Sb eq / (kişi x km)	-	
Ozbilen ve ark., 2018	SimaPro 7	CNG	Otobüs	%75 operasyon, %19 üretim	-	-	-	-	GWP: 1,67 kg CO_2-eq/km
Zackrisson, 2017	SimaPro	Elektrik	Volvo Otobüsleri	Üretim ve Geri Dönüşüm: 234 g CO_2-eq / km Batarya Kullanımı: 95 g CO_2-eq / km	-	-	-	-	329 g CO_2-eq / km
Bu Çalışma	SimaPro	CNG	Otobüs	Üretim: %19,16 Kullanım: %78,17 Kullanım Sonu: %0,16 Bakım: %2,51	GWP: 1,67E-03 kg CO_2 eq / (kişi x km) AC: 1,23E-05 kg SO_2 eq / (kişi x km) EUT: 5,84E-06 kg PO_4-eş / (kişi x km) ADPE: 1,02E-08 kg Sb-eş / (kişi x km)	GWP: 1.43E-05 kg CO_2 eq / (kişi x km) AC: 6,66E-09 kg SO_2 eq/ (kişi x km) EUT: 4,25E-09 kg PO_4^{-3} eq/ (kişi x km) ADPE: 1,78E-12 kg Sb eq / (kişi x km)	GWP: 6,79E-03 kg CO_2 eq / (kişi x km) AC: 2,61E-06 kg SO_2 eq / (kişi x km) EUT: 5,87E-07 kg PO_4^{-3} eq/ (kişi x km)	GWP: 2,18E-04 kg CO_2 eq / (kişi x km) AC: 1,43E-06 kg SO_2-eş / (kişi x km) EUT: 1,58E-07 kg PO_4^{-3} eq/ (kişi x km) ADPE: 3,26E-10 kg Sb eq / (kişi x km)	GWP: 8,69E-03 kg CO_2 eq / (kişi x km) AC: 1,64E-05 kg SO_2-eq / (kişi x km) EUT: 6,59E-06 kg PO_4-eş / (kişi x km) ADPE: 1,05E-08 kg Sb eq/ (kişi x km)

Bu çalışma, CNG otobüslerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ile küresel ısınma potansiyeli odağında üretim, kullanım, bakım ve kullanım ömrü sonu gibi aşamalara göre ayrıntılı bir şekilde analiz etmiştir. Bu çalışmaya göre kullanım aşamasının küresel ısınma potansiyeli üzerindeki etkisi oldukça yüksek olup, %78,17'lik bir katkı sağlamaktadır; üretim aşamasının katkısı ise %19,16 şeklindedir. Benzer bir bulgu, Özbilen ve ark. (2018) çalışmasında da görülmektedir; burada CNG otobüslerin karbon ayak izinin %75'inin kullanım sürecinde oluştuğu belirtilmiştir. Kullanım aşamasının bu yüksek katkısı, CNG'nin yanma sürecinde saldığı karbon emisyonlarının önemli bir rol oynadığını desteklemektedir. Bu durum, Nordelöf ve ark. (2019) çalışması ile karşılaştırıldığında, geleneksel dizel otobüslerde kullanım aşamasının %90,72 gibi daha da yüksek bir orana ulaştığı görülmektedir ki bu, kullanım aşamasında CNG'nin dizel yakıta göre daha düşük bir karbon ayak izine sahip olduğuna işaret etmektedir.

Çalışmada otobüsün tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkileri incelendiğinde Shinde ve ark., (2018) çalışmalarındaki CNG otobüs sonuçlarına göre daha düşük etki ortaya koyduğu gözlenmektedir. Çalışmada küresel ısınma potansiyeli değeri 8,66E-03 kg CO_2 eq/(person x km) iken Shinde ve ark. (2018) çalışmasında 16-20 g CO_2 eq/(person x km) değerleri verilmiştir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde mevcut sonuçların genel çevresel etkisinin kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir.

Çalışmada üretimin çevresel katkısı %19,16 olup, Moca ve ark. (2020) Batarya Elektrikli Otobüsler (BEB) için %50 olarak belirlenen üretim katkısının altındadır; çünkü batarya üretimi, elektrikli otobüslerde daha büyük bir çevresel etkiye sahiptir. Benzer şekilde, Zackrisson (2017) çalışmasında elektrikli otobüslerin batarya üretiminin küresel ısınma potansiyeline %71 oranında katkı sağladığı gösterilmiştir. Bu da elektrikli otobüslerin kullanım aşamasında daha çevreci olmalarına rağmen üretim aşamasında CNG otobüslerine göre çok daha yüksek bir karbon ayak izine sahip olduğunu göstermektedir.

Küresel ısınma potansiyeli açısından değerlendirildiğinde, bu çalışmada CNG otobüslerinin yaşam döngüsü boyunca kişi başına kilometre başına toplam 8,69E-03 kg CO_2 eşdeğeri emisyon ürettiği tespit edilmiştir. Nordelöf ve ark. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise geleneksel dizel otobüslerin kişi başına kilometre başına

GWP değeri 61,9 g CO_2 eşdeğeri olarak belirtilmiştir. Bu değer, CNG otobüslerle karşılaştırıldığında daha yüksek olup, CNG yakıtının çevresel açıdan daha düşük karbon ayak izi sunduğunu göstermektedir. Bu farkın ortaya çıkmasında, araçların yaşam döngüleri boyunca kat ettikleri toplam mesafenin etkili olduğu değerlendirilebilir. Ayrıca Lindholm ve Lorentzon'un (2019) çalışmasında dizel otobüslerin yaşam döngüsü boyunca kullanım emisyonunun küresel ısınma değeri 2,89 kg CO_2 eşdeğeri olarak ifade edilmiştir. Bu değer, CNG otobüsleriyle kıyaslandığında oldukça yüksektir ve bu da CNG yakıtlı araçların çevresel etkiler açısından avantaj sağlayabileceğini destekler bir sonuç sunmaktadır.

Çalışmada CNG otobüslerinin yaşam döngüsü boyunca asidifikasyon potansiyeli, kişi başına kilometre başına 2,61E-06 kg SO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Asidifikasyon potansiyeline en büyük katkı %75,30 oranıyla üretim aşamasından kaynaklanmaktadır. Bu bulgu, Shinde ve ark. (2018) tarafından yapılan araştırmada ise asidifikasyon potansiyelinin 30-90 mg SO_2 eşdeğeri olarak belirlendiği ve bu değerin, tezde elde edilen bulgulara kıyasla daha yüksek bir çevresel etkiyi gösterdiği tespit edilmiştir.

Özbilen ve ark. (2018) tarafından elde edilen verilere göre, CNG otobüslerinin küresel ısınma potansiyeline %75 oranında kullanım aşamasında ve %19 oranında ise üretim aşamasında katkı sağladığı belirtilmiştir. Bu çalışma, söz konusu bulgularla paralellik göstermekte ve CNG otobüslerinin yaşam döngüsü boyunca farklı aşamalarda çevresel etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Küresel ısınma potansiyeli açısından çalışmada belirlenen %19,16'lık üretim katkısı, elektrikli otobüsler (BEB) için Moca ve ark. (2020) çalışmasında belirtilen %50'lik üretim katkısından daha düşük bir seviyededir.

Bu bulgular, CNG otobüslerinin yaşam döngüsü boyunca üretim ve kullanım aşamalarındaki daha düşük karbon ayak izi ile dikkat çektiğini ve özellikle kullanım aşamasında dizel ve elektrikli otobüslere kıyasla daha avantajlı bir çevresel performans sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, daha temiz yakıt kaynaklarına geçiş sürecinde CNG yakıtının sürdürülebilir toplu taşıma çözümlerinde önemli bir seçenek olabileceğini desteklemektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, kompozit malzemeden üretilmiş Tip IV CNG depolama tanklarının üretimi ve şehir içi otobüslerdeki kullanım süreçlerine yönelik kapsamlı bir yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, öncelikle 20 farklı prototip tank üretilmiş ve çevresel etkileri ayrıntılı bir şekilde analiz edilerek en uygun tank seçilmiştir. Ardından, otobüsün üretim, kullanım, bakım ve bertaraf aşamalarını kapsayan yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılarak, kompozit tankların çevresel etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, çalışma kapsamında şu ana sonuçlara ulaşılmıştır.

- Karbon fiber üretimi için 1 kg fonksiyonel ürün bazında 24,2 kg CO_2 eşdeğeri küresel ısınma potansiyeli gözlemlenmiştir. En yüksek çevresel etkilerin, sırasıyla yaklaşık %88,10 ve %82,08 oranında, "ADPE" ve "GWP (100a)" kategorilerinde ham maddeden üretime kadar olan emisyonlardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, karbon fiber üretiminde enerji kullanımına bağlı emisyonlar ile taş kömürü ve ham petrol gibi fosil kaynakların etkisinin belirleyici olduğunu ve üretim süreçlerinde daha sürdürülebilir enerji ve ham madde kullanımının çevresel performans açısından önemli bir gereklilik olduğunu ortaya koymaktadır.

- Çalışmada; 12 litrelik hacme sahip A1, A2, A3, A4, A5, A6 ve A7 prototipleri teknik olarak 250 bar hedef basıncına ulaşamamıştır. Ancak, A9 ve A11 prototipleri 250 bar basınca dayanım göstermiştir. Sonuç olarak, test edilen prototipler arasında A11, yüksek basınç dayanımı ve diğer denemelere kıyasla nispeten daha düşük çevresel etkiler sergileyerek, daha fazla geliştirme için en umut verici aday olarak öne çıkmıştır. 270 bar'ı aşan basınçlara dayanabilmesi, 89,75 kg CO_2 eşdeğeri küresel ısınma etkisi ve 1,32E+05 kg 1,4-DB eşdeğeri deniz ekotoksisite değeri ile gelecekteki çalışmalar için uygun bir seçenek olarak değerlendirilmiştir.

- A11 prototipinin karakterizasyon tablosu incelendiğinde, çeşitli üretim süreçlerinin çevresel etkileri üzerine derinlemesine bir analiz yapılmıştır. Kürleme sürecinin, tüm çevresel etki kategorilerinde en yüksek katkıyı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu süreç,

özellikle fosil kaynaklı abiyotik tükenme (%51,31), küresel ısınma (%59,06), karasal ekotoksisite (%70,31), fotokimyasal oksidasyon (%63,57), asidifikasyon (%67,69) ve ötrofikasyon (%77,00) gibi kritik kategorilerde önemli etkiler yaratmaktadır. Bununla birlikte, karbon fiber üretiminin etkileri, kürlemeye göre daha düşük olsa da göz ardı edilemeyecek seviyelere ulaşmaktadır. Epoksi reçine ve sarım elektriği ise mineral kaynaklı abiyotik tükenme ve ozon tabakasına zarar verme potansiyeli gibi spesifik kategorilerde belirgin etkiler göstermektedir. Bu bulgular, gelecek çalışmalarda kürleme sürecinin ve karbon elyaf üretiminin çevresel etkilerinin azaltılmasının öncelikli hedefler arasında yer alması gerektiğini ortaya koymaktadır.

- 63 litre hacimli kompozit yakıt tankları için B1'den B5'e kadar olan deneyler için tex değeri 800 g/km olarak belirlenmiştir. Karbon fiberin birim alan başına miktarını artırarak bütünlük ve dayanıklılığı artırma olasılığı göz önüne alındığında, B6-B9 aralığındaki deneyler için tex değeri 1650 g/km olarak ayarlanmıştır. Bu sayede daha yüksek basınçlara ulaşmada katkı sağlanmıştır. B7 ve B9, 470 bar için umut verici denemelerdir ve sırasıyla 520 bar ve 535 bar basınca dayanabilmişlerdir. IPCC'ye göre, B7'nin etkileri incelendiğinde, 335,01 kg CO_2 eşdeğeri ve 3,17E+05 kg 1.4-DB eşdeğeri deniz ekotoksisite değeri gözlemlenmiştir. B9'un etkileri ise IPCC'ye göre 328,86 kg CO_2 eşdeğeri ve 3,17E+05 kg 1.4-DB eşdeğeri deniz ekotoksisite değeri olarak belirlenmiştir. Bu iki ürünün çevresel etkisi oldukça benzerdir. B7 ve B9'un üretim yöntemleri üzerinde çalışarak hem çevresel hem de teknik açıdan olumlu sonuçlar elde edilebileceği öngörülmektedir.

- B9 prototip modelinin çevresel etkilerini ve bu prototip modelin üretim süreçlerinde hangi işlemlerin daha fazla çevresel etki yarattığı incelendiğinde karbon fiber üretiminin neredeyse tüm çevresel etki kategorilerinde en yüksek katkıyı sağladığı görülmektedir. Özellikle ozon tabakası tükenmesi kategorisinde %89,96'lık bir etki ile belirgin bir şekilde baskın olan karbon fiber üretimi, aynı zamanda küresel ısınma potansiyeli ve fosil kaynaklı abiyotik tükenme kategorilerinde de %61,86'lık önemli bir etkiye sahiptir. Bu durum, karbon fiber üretiminin enerji ve hammadde tüketimi açısından oldukça yoğun olduğunu göstermektedir. Kürleme işleminde ise, özellikle karasal toksisite kategorisinde %44,77 oranında en yüksek katkıyı sağlarken, tatlısu

ekotoksisitesi, deniz ekotoksisitesi ve ötrifikasyon gibi diğer ekotoksisite kategorilerinde de %30 civarında etkiler göstermektedir. Bu süreçte kullanılan kimyasallar ve enerji tüketimi, çevresel etkilerin artmasına neden olmaktadır. Astar uygulaması, karbon salımına önemli katkıda bulunarak GWP 100a kategorisinde dikkat çekici bir etki yaratmaktadır, diğer kategorilerde ise etkisi %2 ile %25 arasında değişmektedir. Sarım işlemi sırasında elektrik tüketimi, çevresel etkiyi %10'un altında tutarak nispeten düşük bir etkiye sahiptir. Ancak, elektrik verimliliği artırılarak bu etkilerin daha da azaltılması mümkündür. Sertleştirici ve hızlandırıcı kullanımı ise düşük seviyede etki gösterse de özellikle asidifikasyon, tatlısu ekotoksisitesi ve ötrifikasyon gibi bazı kategorilerde etkili olmaktadır. Epoksi reçine, fotokimyasal oksidasyon kategorisinde belirgin bir çevresel etkiye sahiptir, çünkü kimyasal yapısı ve kullanım sürecinden kaynaklanan emisyonlar bu kategorideki çevresel yükü artırmaktadır.

- 12 litrelik tanklar küçük araçlar veya daha kısa mesafeler için uygun olabilirken, şehir içi otobüsler için 63 litrelik veya daha büyük tanklar tercih edilmelidir. Aynı zamanda ISO 11439 spesifikasyonlarına göre, tankların çalışma basıncı 200 bar olmalıdır. Test basıncı, çalışma basıncının en az 1,5 katı olmalıdır. Tip IV tanklar için patlama basıncı, kullanılan fiber türüne bağlı olarak en az 470 bar olmalı, çünkü bu değer, tankın güvenli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için gerekli minimum dayanıklılığı sağlamakta ve yapısal bütünlüğü korumaktadır. Bu nedenle gerek çevresel etki gerek hacimsel uygunluk ve geliştirilebilirlik gerekse basınç dayanımını sağlaması nedeniyle otobüs senaryosuna ilşkin yaşam döngüsü değerlendirmesinde 63 litrelik B9 prototip modeli otobüs üretim girdisi olarak değerlendirilmiştir.

- Yapılan analizler sonucunda, otobüs senaryosunda küresel ısınma potansiyelinin %78,17 gibi büyük bir kısmının otobüs işletme emisyonlarından kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu, işletme aşamasında gerçekleştirilen yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının çevresel etkiler üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Otobüs parçalarının üretimi de ise %19,16'lık önemli bir etkiye sahiptir. Ancak diğer süreçler, özellikle araç bakım (%2,51) ve kullanım ömrü sonu (%0,16) daha düşük

etkilere sahiptir. Bu durum, üretim süreçlerinin çevresel etki açısından önemli bir kaynak oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

- Otobüs üretiminde kullanılan bileşenlerin çevresel etki karakterizasyonu incelenmiştir. Küresel Isınma Potansiyeli açısından en büyük katkı elektrikten sağlanırken, bunu dökme demir takip etmektedir. Tip IV tank (B9) ise yalnızca %2,42 ile diğer bileşenlere kıyasla çok düşük bir etki yaratmaktadır. Ozon tabakası tükenmesi, insan sağlığı ekotoksisitesi, tatlısu ekotoksisitesi, deniz ekotoksisitesi, karasal ekotoksisite, asidifikasyon ve ötrofikasyon gibi kategorilerde de elektrik, bakır ve dökme demir baskın etkilere sahiptir. Tip IV tank ise bu kategorilerde yalnızca %1,14 ile %3,54 arasında düşük katkılar sunmaktadır.

- Yakıt tankı üretimi dışında, otobüs ve parçalarının üretimi aşamasında yolcu kilometresi başına %71,55'lik katkı elektrik tüketiminden, %26,03'lük katkı ise diğer malzemelerden ve %2,42'lik katkı Tip IV tanklarının üretiminden kaynaklanmaktadır. Operasyonel aşamada, 16 adet çelik tank kullanılması durumunda, kompozit tankların toplam ağırlığı 363,68 kg iken, çelik tanklarla bu ağırlık 1108,80 kg'a çıkmaktadır. Bu, tank ağırlığında %66,8'lik, araç ağırlığında ise %5,97'lik bir azalma ve yakıt tüketimi ile operasyonel emisyonlarda olumlu bir etki sağlar. Sonuç olarak, kompozit tankların kullanımı, hem çevresel etkiler açısından önemli bir fayda sağlamaktadır hem de araç ağırlığının azaltılmasıyla yakıt tüketimini ve operasyonel emisyonları olumlu yönde etkilemektedir. Bu durum, çevre dostu ulaşım çözümleri için kompozit tankların tercih edilmesini desteklemektedir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, kompozit malzemelerden üretilen depolama tanklarının üretimi ve şehir içi otobüslerde kullanımının çevresel etkilerinin azaltılmasına yönelik çeşitli önerilere ışık tutmaktadır. Öncelikle, karbon fiber üretimi ve kürleme sürecinde kullanılan enerji ve hammaddelerin daha sürdürülebilir alternatiflerle değiştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Özellikle fosil yakıt kullanımının azaltılması için yenilenebilir enerjiye geçiş ve daha verimli hammadde tüketimi, çevresel etkilerin önemli ölçüde düşürülmesine katkı sağlayabilir.

Epoksi reçine ve sarım işlemlerinde kimyasal ve enerji tüketiminin minimize edilmesi, karbon salınımını azaltırken üretim süreçlerinin optimize edilmesi hem çevresel hem de ekonomik verimlilik sağlayacaktır. Çalışmada ele alınan 63 litrelik prototip tankların hacminin artırılması önerilmekte, çünkü aynı basınç dayanımı korunarak yapılacak bu geliştirme, daha geniş uygulama alanlarına uyarlanmasını mümkün kılabilir. Bu doğrultuda, yalnızca yaşam döngüsü değerlendirmesi ve basınç dayanımı değil, malzemenin diğer teknik gereklilikleri üzerine de kapsamlı çalışmalar yürütülmelidir. Gelecek araştırmalarda, tankların hafiflik ve dayanıklılığını artırmak için fiber malzeme optimizasyonu, farklı fiber ve üretim yöntemlerinin incelenmesi ve süreçlerin daha verimli hale getirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma, şehir içi otobüslerde kullanılan yakıt tanklarının çevresel etkilerini azaltmaya yönelik stratejiler geliştirerek sürdürülebilir ulaşım ve hidrojen gibi alternatif yakıt depolama çözümlerine katkı sağlamaktadır. Hidrojenin CNG'ye kıyasla daha yüksek basınçta güvenli depolanması gerektiğinden, bu alanda teknik gerekliliklerin detaylı incelenmesi önemlidir. Gelecekte, daha yüksek basınç dayanımına sahip tankların geliştirilmesi ve üretim süreçlerinin çevresel ve ekonomik boyutlarının yaşam döngüsü değerlendirmesiyle desteklenmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, kompozit tankların çevresel etkilerini en aza indirerek sürdürülebilir ulaşım çözümleri geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, yaşam döngüsü değerlendirmesi kapsamında tank üretimi ve kullanımıyla ilgili kapsamlı bir veri tabanı sunarak çevresel etkilerin ayrıntılı analizine olanak tanımaktadır. Bu sayede, gelecekte yapılacak çalışmalar için etkin bir referans oluşturulmakta ve sürdürülebilir malzeme ve süreç seçimlerine yönelik daha bilinçli kararlar alınmasına katkı sağlanmaktadır.

KAYNAKLAR

Addcomposites (21 Ekim 2024). What is a hydrogen tank & tank types. 14 Kasım 2024 tarihinde https://www.addcomposites.com/post/what-is-a-hydrogen-tank-tank-types adresinden edinilmiştir.

Agostini, A., Belmonte, N., Masala, A., Hu, J., Rizzi, P., Fichtner, M., & Baricco, M. (2018). Role of hydrogen tanks in the life cycle assessment of fuel cell-based auxiliary power units. Applied Energy, 215, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.095

Air, A., Shamsuddoha, M., Prusty, B. G. (2023). A review of Type V composite pressure vessels and automated fibre placement based manufacturing. Composites Part B: Engineering, 253, 110573. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110573

Albertí, J., Roca, M., Brodhag, C., Fullana-i-Palmer, P. (2019). Allocation and system boundary in life cycle assessments of cities. Habitat International, 83, 41-54. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2018.11.003

Alshgari, R. A., Hemalatha, N., Suryavanshi, A., Prasad, D. V. S. S. S. V., Subalakshmi, R., Abirami, M., Christopher, D. (2022). Investigation on physical and mechanical properties of abaca fiber composites using filament winding. Advances in Polymer Technology, 2022. https://doi.org/10.1155/2022/5000547

Alves, M. P., Gul, W., Cimini Junior, C. A., Ha, S. K. (2022). A review on industrial perspectives and challenges on material, manufacturing, design and development of compressed hydrogen storage tanks for the transportation sector. Energies, 15(14), 5152. https://doi.org/10.3390/en15145152

Avrupa Komisyonu (2019). Avrupa Yeşil Mutabakatı. 25 Ekim 2022 tarihinde https://eur-lex.europa.eu/legal-content/TR/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640 adresinden edinilmiştir.

Azeem, M., Ya, H. H., Alam, M. A., Kumar, M., Stabla, P., Smolnicki, M., Gemi.L., Khan.R., Ahmed.T., Ma.Q., Sadique. M.R., Mokhtar. A.A., Mustapha. M. (2022). Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: a review. J. Energy Storage, 49, 103468. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103468

Azeem, M., Ya, H. H., Alam, M. A., Kumar, M., Stabla, P., Smolnicki, M., Gemi.L., Khan.R., Ahmed.T., Ma.Q., Sadique. M.R., Mokhtar. A.A., Mustapha. M., 2022. Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: a review. J. Energy Storage, 49, 103468. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103468

Benitez, A., Wulf, C., Palmenaer, A., Lengersdorf, M., Röding, T., Grube, T., Robinius, M., Stolten, D., & Kuckshinrichs, W. (2021). Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank. Journal of Cleaner Production, 278, 123277. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123277

Bianchi, I., Forcellese, A., Galliani, F., Greco, L., Mignanelli, C., & Trevisan, G. (2023). Process and structural simulation for the development of a pressure vessel through filament winding technology. In Mater. Res. Proc (Vol. 28, pp. 347-556). https://doi.org/10.21741/9781644902478-38

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) (2016). 20 Nisan 2023 tarihinde Paris Anlaşması. https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement adresinden edinilmiştir.

Candelaresi, D., Valente, I., Iribarren, D., Dufour, J., Spazzafumo, G. (2021). Comparative life cycle assessment of hydrogen-fuelled passenger cars. International Journal of Hydrogen Energy, 46(72), 35961-35973. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.034

Cooney, G., Hawkins, T. R., Marriott, J. (2013). Life cycle assessment of diesel and electric public transportation buses. Journal of Industrial Ecology, 17(5), 689-699. https://doi.org/10.1111/jiec.12024

Council of the European Union. (16 Ekim 2023). Council agrees on new rules to strengthen CO_2 emission standards for heavy-duty vehicles. 10 Ocak 2024 tarihinde https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/10/16/council-agrees-on-new-rules-to-strengthen-co2-emission-standards-for-heavy-duty-vehicles/ adresinden edinilmiştir.

Cremer, A., Müller, K., Berger, M., & Finkbeiner, M. (2020). A framework for environmental decision support in cities incorporating organizational LCA. International Journal of Life Cycle Assessment, 25, 2204–2216. https://doi.org/10.1007/s11367-020-01822-9

Dér, A., Dilger, N., Kaluza, A., Creighton, C., Kara, S., Varley, R., Herrmann, C., & Thiede, S. (2021). Modelling and analysis of the energy intensity in polyacrylonitrile (PAN) precursor and carbon fibre manufacturing. Journal of Cleaner Production, 303, 127105. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127105

Diemer, A. (2023). From life cycle assessment (LCA) to life cycle sustainability assessment (LCSA), methodological issues and prospects for implementing circular business models. International Journal of Scientific Engineering and Applied Science, 9(12), 1–50.

Dlamini NG, Fujimura K, Yamasue E, Okumura H, Ishihara KN. The environmental LCA of steel vs HDPE car fuel tanks with varied pollution control. Int. J. Life Cycle Assess. 2011; 16:410-416. https://doi.org/10.1007/s11367-011-0277-7.

Ecoinvent Version 3.1 Ecoinvent association, Zurich;2014.

Elagouz, N., Onat, N., & Kucukvar, M. (2021). Environmental, economic, and social life cycle impacts of alternative fuel buses: The case for Qatar. In 2021 10th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE) (pp. 92–97). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICPSE53473.2021.9656863

Enguven, G., Ege, Z. R., Ege, H., Ahmed, S. (2023). Life cycle assessment of biobased materials. In Advanced Applications of Biobased Materials (pp. 739-748). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91677-6.00028-3

Erturan, Y. (2019). Development of a structural design methodology for filament winding composite rocket motor case. [Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi]. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Açık Erişim Sistemi. https://open.metu.edu.tr/handle/11511/44400

Eryilmaz, O., Oz, M. E., Jois, K. C., Sackmann, J., & Gries, T. (2024). FEA and experimental ultimate burst pressure analysis of type IV composite pressure vessels manufactured by robot-assisted radial braiding technique. International Journal of Hydrogen Energy, 50, 597-612. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.302

Eryilmaz, O., Oz, M. E., Jois, K. C., Sackmann, J., & Gries, T. (2024). FEA and experimental ultimate burst pressure analysis of type IV composite pressure vessels manufactured by robot-assisted radial braiding technique. International Journal of Hydrogen Energy, 50, 597-612. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.302

Espino Gómez, G. (2023). Study of carbon fiber reinforced polymers technology and market (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

EuCIA, (Eco Impact Calculator) (2023). Background Report. Version 2.0. 01 Aralık 2023 tarihinde https://ecocalculator.eucia.eu/Account/TermsAndConditionsDownload adresinden edinilmiştir.

European Commission (2010). General guide for Life Cycle Assessment . https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html

European Environment Agency. (2022). Transport and environment report 2021: Decarbonising road transport — The role of vehicles, fuels, and transport demand. https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2021

EuropeanUnionNo.79 (2009). Type-approval of hydrogen powered motor vehicles https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vvik7m1c3gyxp/vitgbgipr2zd.

Evangelisti, S., Tagliaferri, C., Brett, D. J., & Lettieri, P. (2017). Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles. Journal of Cleaner Production, 142, 4339–4355. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.159

França, W. T., Barros, M. V., Salvador, R., de Francisco, A. C., Moreira, M. T., & Piekarski, C. M. (2021). Integrating life cycle assessment and life cycle cost: A review of environmental-economic studies. International Journal of Life Cycle Assessment, 26, 244–274. https://doi.org/10.1007/s11367-020-01857-y

Gascons, M., Blanco, N., & Matthys, K. (2012). Evolution of manufacturing processes for fiber-reinforced thermoset tanks, vessels, and silos: a review. IIE Transactions, 44(6), 476-489.

Global Carbon Project. (2021). Annual global emissions dataset and trends. https://www.globalcarbonproject.org

Gómez, A., Fernández-Yáñez, P., Soriano, J. A., Sánchez-Rodríguez, L., Mata, C., García-Contreras, R., Cárdenas, M. D. (2021). Comparison of real driving emissions from Euro VI buses with diesel and compressed natural gas fuels. Fuel, 289, 119836. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119836

Gopalraj, S. K., Kärki, T. (2020). A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: Fibre recovery, properties and life-cycle analysis. SN Applied Sciences, 2(3), 433. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2195-4

Grazieschi, G., Zubaryeva, A., Sparber, W. (2023). Energy and greenhouse gases life cycle assessment of electric and hydrogen buses: A real-world case study in Bolzano, Italy. Energy Reports, 9, 6295-6310. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.234

Groetsch, T., Maghe, M., Rana, R., Hess, R., Nunna, S., Herron, J., ... & Varley, R. J. (2021). Gas emission study of the polyacrylonitrile-based continuous pilot-scale carbon fiber manufacturing process. Industrial & Engineering Chemistry Research, 60(48), 17379-17389.

Gul, W., Xia, Y. E., Gérard, P., Ha, S. K. (2023). Characterization of polymeric composites for hydrogen tank. Polymers, 15(18), 3716. https://doi.org/10.3390/polym15183716

Gülçimen, S., Aydoğan, E. K., & Uzal, N. (2021). Life cycle sustainability assessment of a light rail transit system: Integration of environmental, economic, and social impacts. Integrated Environmental Assessment and Management, 17(5), 1070–1082. https://doi.org/10.1002/ieam.4428

Harris, A., Soban, D., Smyth, B. M., & Best, R. (2018). Assessing life cycle impacts and the risk and uncertainty of alternative bus technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 97, 569–579. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.045

Harris, A., Soban, D., Smyth, B. M., Best, R. (2018). Assessing life cycle impacts and the risk and uncertainty of alternative bus technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 97, 569-579. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.045

Hermansson, F., Heimersson, S., Janssen, M., & Svanström, M. (2022). Can carbon fiber composites have a lower environmental impact than fiberglass? Resources, Conservation and Recycling, 181, 106234. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106234

Hohmann. A., Albrecht. S., Lindner. J. P., Voringer. B., Wehner. D., Drechsler. K., Leistner. P., 2018. Resource efficiency and environmental impact of fiber reinforced plastic processing technologies. Production Engineering. 12. 405-417. https://doi.org/10.1007/s11740-018-0802-7 .

Hopia, K. (2021). Modifying composites for hydrogen tanks. [Yüksek Lisans Tampare Universty]. Tampare Üniversitesi Açık Erişim Sistemi. https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202108306870

Hu, Z., Chen, M., Pan, B. (2021). Simulation and burst validation of 70 MPa type IV hydrogen storage vessel with dome reinforcement. International Journal of Hydrogen Energy, 46(46), 23779–23794. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.186

Hua, T. Q., Roh, H. S., & Ahluwalia, R. K. (2017). Performance assessment of 700-bar compressed hydrogen storage for light duty fuel cell vehicles. International Journal of Hydrogen Energy, 42(40), 25121–25129. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.123

Hua, T. Q., Roh, H. S., Ahluwalia, R. K. (2017). Performance assessment of 700-bar compressed hydrogen storage for light duty fuel cell vehicles. International Journal of Hydrogen Energy, 42(40), 25121–25129. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.123

Hua, T., Ahluwalia, R., Peng, J. K., Kromer, M., Lasher, S., McKenney, K., Law, K., & Sinha, J. (2011). Technical assessment of compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications. International Journal of Hydrogen Energy, 36(4), 3037–3049. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.090

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

International Organization for Standardization (ISO14044:2006): Environmental management: life cycle assessment; requirements and guidelines, Geneva, Switzerland: ISO;2006.

International Organization for Standardization. (2006a). Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework (ISO 14040:2006). Geneva, Switzerland.

International Organization for Standardization. (2006b). Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines (ISO 14044:2006). Geneva, Switzerland.

Islam, M. M., Hossain, M. F., Rana, M. S., & Ferdous, M. S. (2024). Burst pressure prediction of carbon/natural fiber and hybrid composite pressure vessels by

theoretical and numerical analysis. Hybrid Advances, *5*, 100172. https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100172

ISO (International Organization for Standardization). 2013. Gas Cylinders — High Pressure Cylinders for the On-Board Storage of Natural Gas as A Fuel for Automotive Vehicles. ISO 11439:2013. Geneva, CH: ISO. https://www.iso.org/standard/44755.html.

Jesrani (2015). Making It — Chapter 4: (Thin & Hollow) Filament Winding, by Himanshi Jesrani Medium. 01 Nisan 2023 tarihinde https://medium.com/@hpjesrani/filament-winding-94c796ca28f0 adresinden erişilmiştir.

Jha, M. K., Dev, M. (2024). Impacts of Climate Change. In Smart Internet of Things for Environment and Healthcare (pp. 139-159). Cham: Springer Nature Switzerland.https://doi.org/10.1007/978-3-031-70102-3

Kartav, O. (2020). Design and Production of Light-Weight Pressure Resistant Composite Tank Materials and Systems for Hydrogen Storage. [Doktora tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü]. İzmir Yüksek Teknoloji Açık Erişim Sistemi. https://openaccess.iyte.edu.tr/handle/11147/10968

Kashyzadeh, K. R., & Marusin, A. V. (2023). Service life prediction of Type-IV composite CNG cylinder under the influence of drivers' refueling habits—A numerical study. Polymers, 15(11), 2480. https://doi.org/10.3390/polym15112480

Keoleian, G. A., Spatari, S., Beal, R. T., Stephens, R. D., Williams, R. L. (1998). Application of life cycle inventory analysis to fuel tank system design. The International Journal of Life Cycle Assessment, 3, 18-28.

Kim, S. J., Kara, S., Hauschild, M. (2017). Functional unit and product functionality—addressing increase in consumption and demand for functionality in sustainability assessment with LCA. The International Journal of Life Cycle Assessment, 22, 1257-1265. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1233-3

Krauklis, A. E., Karl, C. W., Rocha, I. B., Burlakovs, J., Ozola-Davidane, R., Gagani, A. I., Starkova, O. (2022). Modelling of environmental ageing of polymers and polymer composites—modular and multiscale methods. Polymers, 14(1), 216. https://doi.org/10.3390/polym14010216

La Rosa, A. D., Greco, S., Tosto, C., Cicala, G. (2021). LCA and LCC of a chemical recycling process of waste CF-thermoset composites for the production of novel CF-thermoplastic composites. Open loop and closed loop scenarios. Journal of Cleaner Production, 304, 127158. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127158

Leichter, M., Hackenhaar, I., Passuello, A. (2021). Public bus transportation system environmental impact projections regarding different policy scenarios—A LCA study. Infrastructures, 6(12), Article 169. https://doi.org/10.3390/infrastructures6120169

Liang. J., Liu. L., Qin. Z., Zhao. X., Li. Z., Emmanuel. U., Feng. J. (2023). Experimental Study of Curing Temperature Effect on Mechanical Performance of Carbon Fiber Composites with Application to Filament Winding Pressure Vessel Design. Polymers. 15(4). 982. https://doi.org/10.3390/polym15040982

Lindholm, J., Lorentzon, L. (2019). Managing life cycle assessment of buses: An investigation on how Volvo Buses can meet environmental requirements from green public procurement, now and in the future. Chalmers University of Technology.

Mahmud, R., Moni, S. M., High, K., & Carbajales-Dale, M. (2021). Integration of techno-economic analysis and life cycle assessment for sustainable process design–A

review. Journal of Cleaner Production, 317, 128247. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128247

MAN Truck & Bus SE. (2023). In accordance with ISO 14025:2006, Environmental Product Declaration for Lion's City 12 G Efficient Hybrid, https://www.environdec.com/library/epd7585 2023

Mastinu, G., Solari, L. (2022). Electric and biomethane-fuelled urban buses: Comparison of environmental performance of different powertrains. The International Journal of Life Cycle Assessment, 27(2), 238-254. https://doi.org/10.1007/s11367-021-02013-w

McLaughlan, P. B., Forth, S. C., Grimes-Ledesma, L. (2011). Composite overwrapped pressure vessels: A primer. National Aeronautics and Space Administration, Johnson Space Center.

Meng, F., Olivetti, E. A., Zhao, Y., Chang, J. C., Pickering, S. J., McKechnie, J. (2018). Comparing life cycle energy and global warming potential of carbon fiber composite recycling technologies and waste management options. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 6(8), 9854-9865.

Menoufi. K. A. I., (2011). Life cycle analysis and life cyle impact assessment methodologies: a state of the art. [Yüksek Lisans Tezi, Universitat de Lleida http://hdl.handle.net/10459.1/45831 . Universitat de Lleida Açık Erişim Sistemi. http://hdl.handle.net/10459.1/45831

Milojević, S., Pešić, R. (2010). Desıgn and Applıcatıon of Modern CNG Systems for Buses. Gas Association of Serbia, Congres GAS 2010, Serbia, Belgrade and Vrnjačka Banja.

Mindermann, P., Gil Pérez, M., Knippers, J., Gresser, G. T. (2022). Investigation of the fabrication suitability, structural performance, and sustainability of natural fibers in coreless filament winding. Materials, 15(9), 3260. https://doi.org/10.3390/ma15093260

Miotti, M., Hofer, J., Bauer, C. (2017). Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles. International Journal of Life Cycle Assessment, 22(1), 94–110. https://doi.org/10.1007/s11367-015-0986-4

Mittal, V., Shah, R. (2023). Modeling the global annual carbon footprint for the transportation sector and a path to sustainability. Modelling, 4(2), 264–282. https://doi.org/10.3390/modelling4020015

Moca, S., Soltis, P., & Suen, E. (2020). Comparing the impacts of bus technology and fuel types in the East Bay. Patrick 10 Mayıs 2024 tarihinde https://patricksoltis.com/wp-content/uploads/2020/12/Bus-Emissions-Comparison.pdf adresinden edinilmiştir.

Motaharinejad, V., Delnaud, L., Fouque, M., Lucas, A., Shirinbayan, M., Fitoussi, J., & Tcharkhtchi, A. (2021). Enhancement of adhesion between the polymeric liner and the metallic connector of high-pressure hydrogen storage tank. International Journal of Material Forming, 14, 249–260. https://doi.org/10.1007/s12289-020-01577-6

Muñoz, P., Franceschini, E. A., Levitan, D., Rodriguez, C. R., Humana, T., & Perelmuter, G. C. (2022). Comparative analysis of cost, emissions and fuel consumption of diesel, natural gas, electric and hydrogen urban buses. Energy Conversion and Management, 257, 115412. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115412

Muñoz, P., Franceschini, E. A., Levitan, D., Rodriguez, C. R., Humana, T., & Perelmuter, G. C. (2022). Comparative analysis of cost, emissions and fuel consumption of

diesel, natural gas, electric and hydrogen urban buses. Energy Conversion and Management, 257, 115412. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115412

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2023). Global CO_2 trends and milestones. https://www.noaa.gov

Newhouse, N. L. (2016). Development of improved composite pressure vessels for hydrogen storage (No. DOE-Hexagon-19004). Hexagon Lincoln, Lincoln, NE (United States). https://doi.org/10.2172/1249338

Nieuwlaar, E. (2013). Life cycle assessment and energy systems. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.01334-8

Nordelöf, A., Romare, M., & Tivander, J. (2019). Life cycle assessment of city buses powered by electricity, hydrogenated vegetable oil, or diesel. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 75, 211–222. https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.019

Özbilen, A., Dincer, I., & Hosseini, M. (2018). Comparative life cycle environmental impact assessment of natural gas and conventional vehicles. In Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions (pp. 913–934). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813734-5.00052-4

Pelsa, I., Balina, S. (2022). Main priorities for a green deal towards a climate-neutral Europe. European Integration Studies, 16, 41-51. https://doi.org/10.5755/j01.eis.1.16.31331

Posada, F., Lowell, D. (2009). CNG Bus Emissions Roadmap: from Euro III to Euro VI, International Council on Clean Transportation. https://theicct.org/publication/cng-bus-emissions-roadmap/

Prasad, M. N. V., Smol, M., Freitas, H. (2023). Achieving sustainable development goals via green deal strategies. In Sustainable and Circular Management of Resources and Waste Towards a Green Deal (pp. 3-23). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95278-1.00002-4

Prenzel, T. M., Hohmann, A., Prescher, T., Angerer, K., Wehner, D., Ilg, R., Albrecht, S. (2023). Bringing Light into the Dark—Overview of Environmental Impacts of Carbon Fiber Production and Potential Levers for Reduction. Polymers, 16(1), 12. https://doi.org/10.3390/polym16010012

Quanjin, M., Rejab, M. R. M., Idris, M. S., Zhang, B., Kumar, N. M. (2019). Filament winding technique: SWOT analysis and applied favorable factors. SCIREA Journal of Mechanical Engineering, 3(1), 1-25. https://www.scirea.org/journal/PaperInformation?PaperID=726

Ramachandran. K., Gnanasagaran.C. L., Vekariya. A., 2023. Life cycle assessment of carbon fiber and bio-fiber composites prepared via vacuum bagging technique. Journal of Manufacturing Processes. Volume 89. Pages 124-131. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.068

Ranieri, S., Duronio, F., Villante, C., D'Ovidio, G. (2023). Enabling technologies assessment for reducing Italian LPT emissions on short and long-term time frames. Transportation Research Procedia, 69, 623–630. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.216

Rasheed, R., Anwar, I., Tahir, F., Rizwan, A., Javed, H., & Sharif, F. (2023). Techno-economic and environmental sustainability analysis of filament-winding versus pultrusion based glass-fiber composite technologies. Environmental Science and Pollution Research, 30(13), 36276-36293. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24817-5

Rauf, A. (2017). Design and fabrication of a composite filament winding machine [Yüksek Lisans Tezi, NUST Universty].

Saferna, A., Kuczyński, P., Łaciak, M., Szurlej, A., Włodek, T. (2021). Thermodynamic analysis of CNG fast filling process of composite cylinder type IV. Energies, 14(17), 5568. https://doi.org/10.3390/en14175568

Saferna, A., Saferna, P., Kuczyński, S., Łaciak, M., Szurlej, A., & Włodek, T. (2021). Thermodynamic analysis of CNG fast filling process of composite cylinder type IV. Energies, 14(17), 5568. https://doi.org/10.3390/en14175568

Sengir, H. (2009). CNG tankları için hidrostatik patlama basıncı test düzeneği tasarımı. [Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi].

Sharma, A., Strezov, V. (2017). Life cycle environmental and economic impact assessment of alternative transport fuels and power-train technologies. Energy, 141, 1132–1141. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.160

Sharma, P., Chugh, P., & Neogi, S. (2021). Study to methodize the design of a safe Type-4 CNG storage vessel using finite element analysis with experimental validation. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 192, 104425.

Shaw-Stewart, D. (1985). Filament winding—Materials & engineering. Materials & Design, 6(3), 140-144. https://doi.org/10.1016/0261-3069(85)90063-9

Shin, H. K., Ha, S. K. (2023). A review on the cost analysis of hydrogen gas storage tanks for fuel cell vehicles. Energies, 16(13), 5233. https://doi.org/10.3390/en16135233

Shinde, A. M., Dikshit, A. K., & Singh, R. K. (2019). Comparison of life cycle environmental performance of public road transport modes in metropolitan regions. Clean Technologies and Environmental Policy, 21(3), 605–624. https://doi.org/10.1007/s10098-018-01661-1

Shioya, M., Kikutani, T. (2015). Synthetic textile fibres: Non-polymer fibres. In Textiles and fashion (pp. 139–155). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-931-4.00007-6

Sjöqvist, N., & Ibrahem, A. (2021). Life cycle assessment in the automotive industry: Considerations for first-tier suppliers. [Yüksek Lisans Tezi, KTH Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management Department of Sustainable Production Development]. KTH Açık Erişim Sistemi. urn:nbn:se:kth:diva-297562

Sójka, J., Lisowski, A., Borowski, M., Bielińska, E., & Zawiślak, K. (2022). Life cycle assessment study on the public transport bus fleet electrification in the context of sustainable urban development strategy. Science of the Total Environment, 824, 153872. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153872

Stelzer, P. S., Cakmak, U., Eisner, L., Doppelbauer, L. K., Kállai, I., Schweizer, G., Major, Z. (2022). Experimental feasibility and environmental impacts of compression molded discontinuous carbon fiber composites with opportunities for circular economy. Composites Part B: Engineering, 234, 109638. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109638

Stoiber, N., Hammerl, M., Kromoser, B. (2021). Cradle-to-gate life cycle assessment of CFRP reinforcement for concrete structures: Calculation basis and exemplary application. Journal of Cleaner Production, 280, 124300. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124300

Sundvor, C.F. (2013). Life cycle assessment of road vehicles for private and public transportation. [Yüksek Lisans Tezi, Department of Energy and Process Engineering;

Norwegian University of Science and Technology] Norwegian University of Science and Technology Açık Erişim Sistemi. http://hdl.handle.net/11250/257669

The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association. (2022). Overview of LCI data for carbon fiber. https://www.carbonfiber.gr.jp/english/tech/pdf/lci2022_en.pdf

Tica, S., Živanović, P., Bajčetić, S., Milovanović, B., Nađ, A. (2019). Study of the fuel efficiency and ecological aspects of CNG buses in urban public transport in Belgrade. Journal of Applied Engineering Science, 17(1). https://doi.org/10.5937/jaes17-17035

Tschirschwitz, R., Krentel, D., Kluge, M., Askar, E., Habib, K., Kohlhoff, H., ... & Szczepaniak, M. (2019). Hazards from failure of CNG automotive cylinders in fire. Journal of hazardous materials, 367, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.12.026

UN ECE R134. (2019). Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of hydrogenfuelled vehicles(HFCV).https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R134e.pdf

Usai, L., Hung, C. R., Vásquez, F., Windsheimer, M., Burheim, O. S., & Strømman, A. H. (2021). Life cycle assessment of fuel cell systems for light duty vehicles: Current state-of-the-art and future impacts. Journal of Cleaner Production, 280, 125086. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125086

Velandia Vargas, J. E., Falco, D. G., da Silva Walter, A. C., Cavaliero, C. K. N., & Seabra, J. E. A. (2019). Life cycle assessment of electric vehicles and buses in Brazil: effects of local manufacturing, mass reduction, and energy consumption evolution. The International Journal of Life Cycle Assessment, 24, 1878-1897. https://doi.org/10.1007/s11367-019-01615-9

Villalonga. S., Thomas. C., Nony. C., Thiebaud. F., Geli. M., Lucas. A., Maugy. C., 2011. Applications of full thermoplastic composite for type IV 70 MPa high pressure vessels. In International Conference on Composite Materials.

Wang, X., Tian, M., Chen, X., Xie, P., Yang, J., Chen, J., & Yang, W. (2022). Advances on materials design and manufacture technology of plastic liner of type IV hydrogen storage vessel. International Journal of Hydrogen Energy, 47(13), 8382–8408. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.198

Wang, X., Tian, M., Chen, X., Xie, P., Yang, J., Chen, J., Yang, W. (2022). Advances on materials design and manufacture technology of plastic liner of type IV hydrogen storage vessel. International Journal of Hydrogen Energy, 47(13), 8382–8408. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.198

Weiszflog, E., Abbas, M. (2022). Life cycle assessment of hydrogen storage systems for trucks: An assessment of environmental impacts and recycling flows of carbon fiber. Chalmers University of Technology.

Whiston, M. M., Lima Azevedo, I. M., Litster, S., Samaras, C., Whitefoot, K. S., Whitacre, J. F. (2020). Hydrogen storage for fuel cell electric vehicles: Expert elicitation and a levelized cost of driving model. Environmental Science & Technology, 54(1), 553–562. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04145

Yao, D., Liu, Y., Xu, Z., Zhu, Z., Qi, J., Wang, Y., Cui, P. (2022). Comparative water footprint assessment of fuel cell electric vehicles and compressed natural gas vehicles. Science of The Total Environment, 830, 154820. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154820

Yurdakul, K. (2022). The Influence of manufacturing defects on structural performance of composite overwrapped pressure vessels. [Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi]. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Açık Erişim Sistemi. https://hdl.handle.net/11511/96273

Zackrisson, M. (2017). Life cycle assessment of long life lithium electrode for electric vehicle batteries: Cells for Leaf, Tesla, and Volvo bus. Swerea IVF AB.