



**SÜRDÜRÜLEBİLİR HAVACILIK SEKTÖRÜ
İÇİN ATIK LASTİKLERDEN
YENİLENEBİLİR VE SÜRDÜRÜLEBİLİR
HAVACILIK YAKITI ÜRETİMİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Doktora Tezi

Ali GÜNERHAN

Haziran 2025

**SÜRDÜRÜLEBİLİR HAVACILIK SEKTÖRÜ İÇİN ATIK LASTİKLERDEN
YENİLENEBİLİR VE SÜRDÜRÜLEBİLİR HAVACILIK YAKITI
ÜRETİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Ali GÜNERHAN

DOKTORA TEZİ

Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ

(İkinci Danışman: Prof. Dr. Hakan ÇALIŞKAN)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Haziran 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ali GÜNERHAN'ın SÜRDÜRÜLEBİLİR HAVACILIK SEKTÖRÜ İÇİN ATIK LASTİKLERDEN YENİLENEBİLİR VE SÜRDÜRÜLEBİLİR HAVACILIK YAKITI ÜRETİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ başlıklı çalışması 17/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, Sivil Havacılık Anabilim dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye	: Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ	
Üye	: Prof. Dr. Emin AÇIKKALP	
Üye	: Doç. Dr. Işıl YAZAR	
Üye	: Doç. Dr. Cem Tahsin YÜCER	
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU	

Prof. Dr. Harun BÖCÜK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Doktora ğrencisi Ali GÜNERHAN, SÜRDÜRÜLEBİLİR HAVACILIK SEKTÖRÜ İÇİN ATIK LASTİKLERDEN YENİLENEBİLİR VE SÜRDÜRÜLEBİLİR HAVACILIK YAKITI ÜRETİMİNİN DEğERLENDİRİLMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımda incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Prof. Dr. nder ALTUNTAş

ÖZET

SÜRDÜRÜLEBİLİR HAVACILIK SEKTÖRÜ İÇİN ATIK LASTİKLERDEN YENİLENEBİLİR VE SÜRDÜRÜLEBİLİR HAVACILIK YAKITI ÜRETİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ali GÜNERHAN

Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran 2025

Danışman: Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ

(İkinci Danışman: Prof. Dr. Hakan ÇALIŞKAN)

Bu tez çalışmasında, döngüsel ekonomi kapsamında Eskişehir ilinde (1817 ton/yıl kapasiteli) veya Türkiye genelinde (202.200 ton/yıl kapasiteli) kurulacak bir tesis ile atık lastiklerden sürdürülebilir uçak yakıtı (SHY) üretimi için bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile atık lastikler vakum piroliz yöntemi kullanılarak yağ, kömür ve gaz ürünlerine dönüştürülmektedir. Piroliz yağı daha sonra katalitik parçalama, alkilasyon ve hidro-işlemlere (hidrodenitrojenasyon, hidrodesülfürizasyon ve hidrodearomatizasyon) tabi tutulurken, piroliz kömürü elektrokimyasal oksidasyon ile hidrojen (H_2) üretmek için kullanılmaktadır. 1000 g piroliz yağını rafine etmek için 40,99 g ila 52,72 g hidrojen tüketilmektedir. Önerilen model ile 1817 ton ve 202.200 ton atık lastikten sırasıyla yaklaşık 843,41-853,13 ton/yıl ve 93853-94938 ton/yıl SHY üretilebileceği hesaplanmıştır. Farklı senaryolara göre düşük (1817 ton/yıl) ve yüksek kapasiteli (202.200 ton/yıl) tesisler ile üretilen yakıtın en düşük satış fiyatı sırasıyla 0,7990-1,2634 \$/L ve 0,5627-1,0125 \$/L aralığındadır. Piroliz yağının rafine edilmesinde kullanılan H_2 , piroliz kömürünün elektrokimyasal oksidasyonu ile üretilmiştir. Bilindiği kadarıyla, piroliz kömürünün elektrokimyasal oksidasyonu yoluyla H_2 üretimi rapor edilmemiştir. Bu tez çalışması, önerdiği yenilikçi H_2 üretim modelinin yanı sıra atık lastiklerin döngüsel ekonomi kapsamında jet yakıtı gibi katma değerli ürünlere dönüştürülebileceği ispatlamıştır. Dolayısıyla, bu tez çalışmasından elde edilen sonuçların literatüre yeni bir yön verebileceği öngörülmektedir.

Anahtar Sözcükler: Sürdürülebilir havacılık yakıtı, Atık lastik piroliz yağı, Atık lastik piroliz kömürü, Elektroliz, Hidrojen.

ABSTRACT

EVALUATION OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE AVIATION FUEL PRODUCTION FROM SCRAP TYRES FOR SUSTAINABLE AVIATION SECTOR

Ali GÜNERHAN

Department of Civil Aviation

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, June 2025

Supervisor: Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ

(Co-Supervisor: Prof. Dr. Hakan ÇALIŞKAN)

In this thesis, a model has been developed for the production of sustainable aviation fuel (SAF) from waste tyres with a plant to be established in Eskişehir province (1817 tons/year capacity) or in Türkiye (202,200 tons/year capacity) within the framework of circular economy. The developed model will convert used tyres into oil, char and gas products using the vacuum pyrolysis process. The pyrolysis oil is then subjected to catalytic cracking, alkylation and hydrotreating (hydrodenitrogenation, hydrodesulfurisation and hydrodearomatisation), while the pyrolysis char is used to produce hydrogen (H_2) by electrochemical oxidation. 40.99 g to 52.72 g of H_2 are consumed to refine 1000 g of pyrolysis oil. With the proposed model, it is calculated that approximately 843.41-853.13 tons/year and 93853-94938 tons/year of SAF can be produced from 1817 tons and 202,200 tons of waste tyres, respectively. According to different scenarios, the lowest selling price of the fuel produced by low-capacity (1817 tones/year) and high-capacity (202,200 tones/year) plants is in the range of 0.7990-1.2634 \$/L and 0.5627-1.0125 \$/L, respectively. H_2 used in pyrolysis oil refining is produced by electrochemical oxidation of pyrolysis char. To the best of our knowledge, H_2 production by electrochemical oxidation of pyrolysis char has not been reported. In addition to the innovative H_2 production model proposed, this work has demonstrated that waste tyre can be converted into value-added products such as jet fuel within the framework of the circular economy. Therefore, it is anticipated that the results of this thesis can provide a new avenue in the literature.

Keywords: Sustainable aviation fuel, Waste tyre pyrolysis oil, Waste tyre pyrolysis char, Electrolysis, Hydrogen.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince tez konumun belirlenmesinde değerli katkılar sunan ve bu tezin hazırlanmasında bilgi ve desteklerini benden esirgemeyen değerli danışmanlarım Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ ve Prof. Dr. Hakan ÇALIŞKAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme süreçlerindeki yapıcı ve kıymetli katkıları için Prof. Dr. Emin AÇIKKALP ve Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU'ya da teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim süresince yardıma ihtiyaç duyduğum zamanlarda sağladığı destek için değerli arkadaşım Arş. Gör. Hurşit DEĞİRMENCİ'ye içten teşekkürlerimi sunarım.

Her koşulda desteğini esirgemeyen, varlığıyla bana güç veren sevgili annem Nurhayat GÜNERHAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Ali GÜNERHAN

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Ali GÜNERHAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIV
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
2.1. Araştırma Konusunun Genel Kapsamı.....	6
2.2. Atık Lastik Piroliz Yağlarının Rafineri Prosesleri ve Yakıt Dönüşümü	11
2.3. Atık Lastik Piroliz Kömürünün Elektrokimyasal Oksidasyon Mekanizması.....	12
2.4. Tezin Bilimsel Önemi, Amacı ve Literatüre Katkısı.....	17
3. MATERYAL VE METOT.....	19
3.1. Atık Lastikler ve Piroliz Prosesi	19
3.1.1. Araç lastiklerinin bileşimi	19
3.1.2. Atık lastiklerin pirolizi.....	20
3.2. Atık Lastik Piroliz Kömürünün Elektrokimyasal Oksidasyonu	22
3.3. Rafineri Prosesleri.....	23
3.3.1. Hidro-işlemler sırasındaki hidrojen tüketimi.....	25

3.4. Tekno-Ekonomik Analiz.....	26
3.4.1. Eskişehir ilinde toplanan atık lastiklerden sürdürülebilir havacılık yakıtı üretilmesinin tekno-ekonomik analizi.....	27
3.4.2. Türkiye geneli toplanan atık lastiklerden sürdürülebilir havacılık yakıtı üretilmesinin tekno-ekonomik analizi.....	31
4. SONUÇLAR	35
4.1. Eskişehir İlinde Toplanan Atık Lastiklerin Yakıt Üretim Potansiyeli	35
4.1.1. Eskişehir ili atık lastik piroliz ürünlerinin miktarı.....	35
4.1.2. Hidrojen tüketim miktarı.....	36
4.1.3. Toplam sürdürülebilir havacılık yakıt miktarı	39
4.1.4. Ekonomik analiz.....	40
4.1.4.1. <i>Değişken hammadde maliyet senaryolarının yakıt fiyatı üzerindeki etkisi</i>	42
4.1.4.2. <i>Piroliz yan ürünleri gelire dahil edildiğinde yakıt fiyatındaki değişim</i>	43
4.2. Türkiye Geneline Toplanan Atık Lastiklerin Yakıt Üretim Potansiyeli.....	44
4.2.1. Türkiye geneli atık lastik piroliz ürünlerinin miktarı	45
4.2.2. Toplam hidrojen tüketimi	45
4.2.3. Toplam sürdürülebilir havacılık yakıtı üretim miktarı	46
4.2.4. Ekonomik analiz.....	46
4.2.4.1. <i>Değişken hammadde maliyet senaryolarının yakıt fiyatı üzerindeki etkisi</i>	48
4.2.4.2. <i>Piroliz yan ürünleri gelire dahil edildiğinde yakıt fiyatındaki değişim</i>	49
4.2.4.3. <i>Değişken amortisman sürelerinin ve kâr marjlarının yakıt fiyatı üzerindeki etkisi</i>	52
4.3. Zorluklar ve Gelecek Perspektifi.....	54
5. DEĞERLENDİRMELER.....	58
KAYNAKÇA.....	60
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLER DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Piroliz biyokömürünün özellikleri	15
Tablo 2.2. Atık lastik piroliz kömürünün özellikleri.....	16
Tablo 3.1. Araba Lastiğinin Başlıca Bileşenleri (Laresgoiti vd., 2004; de Marco Rodriguez vd., 2001)	20
Tablo 3.2. Vakum piroliz yöntemi ile geri dönüştürülen atık lastiklerin ürün miktarları.....	21
Tablo 3.3. Ham ALPY ve jet yakıtı özellikleri (Li vd., 2004; Lefebvre ve Ballal, 2010; Singh vd., 2018; Gunerhan, Altuntas ve Caliskan, 2023; Gunerhan, Altuntas ve Caliskan, 2024)	24
Tablo 3.4. Ticari jet yakıtları ve ham ALPY'nın element oranı (Wang vd., 2015; Straka vd., 2023).....	26
Tablo 3.5. Eskişehir ili için ekipman satın alma maliyet (COE) hesaplamaları (Liu vd., 2020b; Qiang ve Wang, 2020)	27
Tablo 3.6. Ekipman üssel katsayı faktörü (Liu vd., 2020b; Qiang ve Wang, 2020).....	28
Tablo 3.7. Sermaye harcamaları tahminleri (del Portal, 2010; Xin vd., 2018; Qiang ve Wang, 2020; Straka vd., 2023).....	29
Tablo 3.8. Operasyonel harcama tahminleri (Rogachuk ve Okolie, 2024; Liu vd., 2020b; Wang vd., 2022; Qiang ve Wang, 2020)	30
Tablo 3.9. Hidrojen üretimi maliyet tahmini	31
Tablo 3.10. Türkiye geneli için ekipman satın alma maliyet (COE) hesaplamaları (Liu vd., 2020b; Qiang ve Wang, 2020)	32
Tablo 3.11. Türkiye geneli tesis için sermaye harcamaları tahminleri (del Portal, 2010; Xin vd., 2018; Qiang ve Wang, 2020; Straka vd., 2023).....	33
Tablo 3.12. Türkiye geneli tesis için operasyonel harcama tahminleri (Rogachuk ve Okolie, 2024; Liu vd., 2020b; Wang vd., 2022; Qiang ve Wang, 2020)	34
Tablo 4.1. Eskişehir ili atık lastik piroliz ürün miktarları	36
Tablo 4.2. ASTM D7566 ve D1655 senaryolarına göre hidro-işlem aşamasındaki hidrojen tüketim miktarı.....	37

Tablo 4.3. Farklı hidro-işlem senaryolarına göre Eskişehir ili için yıllık SHY üretim miktarları	40
Tablo 4.4. Ekonomik model analizinin kabulleri	40
Tablo 4.5. Sürdürülebilir havacılık yakıtı üretiminin maliyet analizi	41
Tablo 4.6. Eskişehir ili için sürdürülebilir havacılık yakıtı üretim maliyetlerinin karşılaştırılması	42
Tablo 4.7. Farklı atık lastik hammadde maliyetlerine dayalı sürdürülebilir havacılık yakıtı birim fiyatlarının değişimi	42
Tablo 4.8. Atık lastik piroliz kömürü ve sentez gazının satışından elde edilecek tahmini gelir	44
Tablo 4.9. Farklı senaryolar altında sürdürülebilir havacılık yakıtı birim fiyatlarındaki değişim	44
Tablo 4.10. Türkiye geneli atık lastik piroliz ürün miktarları	45
Tablo 4.11. ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryolarına göre Türkiye geneli için yıllık hidrojen gereksinimi	46
Tablo 4.12. Farklı hidro-işlem senaryolarına göre Türkiye geneli için yıllık hidrojen tüketim miktarı	46
Tablo 4.13. Türkiye geneli tesisin ekonomik model kabulleri	47
Tablo 4.14. Türkiye geneli sürdürülebilir havacılık yakıtı üretiminin maliyet analizi	47
Tablo 4.15. Türkiye geneli ve Eskişehir ili için farklı atık lastik hammadde maliyetlerine göre sürdürülebilir havacılık yakıtı birim fiyatlarındaki değişimler	48
Tablo 4.16. Türkiye geneli tesis için atık lastik piroliz kömürü ve sentez gazının satışından elde edilecek tahmini gelir	49
Tablo 4.17. ASTM D7566 senaryosuna göre Türkiye geneli ve Eskişehir ili için sürdürülebilir havacılık yakıtı birim fiyatlarındaki değişim	50
Tablo 4.18. ASTM 1655 senaryosuna göre Türkiye geneli ve Eskişehir ili için sürdürülebilir havacılık yakıtı birim fiyatlarındaki değişim	50
Tablo 4.19. Yan ürün satışları gelire dahil edildiğinde, sürdürülebilir havacılık yakıtı üretim maliyetlerinin literatürle karşılaştırılması	51
Tablo 4.20. Değişken amortisman sürelerinin yakıt fiyatı ve kâr marjı üzerindeki etkisi	53

Tablo 4.21. Değişken kâr marjlarının yakıt fiyatı ve amortisman süresi üzerindeki etkisi	53
---	----



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Araç lastiğinin kesiti (Valentini ve Pegoretti, 2022).....	19
Şekil 3.2. Piroliz prosesinin şematik gösterimi	22
Şekil 3.3. Atık lastik piroliz kömürü için önerilen elektrokimyasal oksidasyonunun şematik gösterimi.	23
Şekil 3.4. Atık lastik piroliz yağına uygulanacak rafineri proseslerinin şematik gösterimi.....	25
Şekil 4.1. Atık lastikten SHY üretim aşamalarının şematik gösterimi.....	35

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

\$	: Amerikan Doları
%	: Yüzde
°C	: Celsius
AC	: Aktif Karbon
ALPK	: Atık Lastik Piroliz Kömürü
ALPY	: Atık Lastik Piroliz Yağı
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (Standardizasyon kuruluşu)
atm	: Atmosfer basıncı
C	: Karbon
CapEx	: Sermaye Harcamaları
CEPCI	: Kimya Mühendisliği Tesis Maliyet Endeksi
CO	: Karbonmonoksit
CO ₂	: Karbondioksit
COE	: Ekipman Satın Alma Maliyeti (Cost of Equipment Purchase)
DC	: Direkt Maliyet (Direct Cost)
FCI	: Sabit Sermaye Yatırımı (Fixed Capital Investment)
Fe ²⁺	: Demir (II) (Ferrous iron)
Fe ³⁺	: Demir (III) (Ferric)
FeCl ₃	: Demir (III) Klorür
FOC	: Sabit İşletme Maliyeti (Fixed Operating Cost)
g	: Gaz (Gas)
g	: Gram
GC-MS	: Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometresi
H	: Hidrojen
h	: Saat
H ₂	: Hidrojen gazı
H ₂ SO ₄	: Sülfürik asit
HDA	: Hidrodearomatizasyon (Aromatik bileşikleri doyurma işlemi)
HDN	: Hidrodenitrojenasyon (Nitrojen giderme işlemi)
HDS	: Hidrodesülfürizasyon (Kükürt giderme işlemi)

HZSM-5	: Asidik Katalizör (Hydrogen-form Zeolite Socony Mobil-5)
IATA	: Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği
IC	: Dolaylı Maliyet (Indirect Cost)
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü
kg	: Kilogram
kW	: Kilowatt
<i>l</i>	: Sıvı (Liquid)
l (L)	: Litre
LHV	: Alt Isıl Değer (Lower Heating Value)
m	: Metre
MFSP	: Minimum Yakıt Satış Fiyatı
MJ	: Megajoule
mm	: Milimetre
N	: Nitrojen
Nm ³	: Normal metre küp
NO _x	: Nitrojen Oksitler
b.t.	: Belirtilmemiş
O	: Oksijen
O ₂	: Oksijen gazı
OpEx	: Operasyonel Harcamalar
ÖYA	: Özgül Yüzey Alanı
PAH	: Poliaromatik Hidrokarbonlar
Pd	: Paladyum
PEM	: Proton Değişim Membranı (Elektroliz Hücresi Teknolojisi)
RHE	: Tersinir hidrojen elektrodu (Reversible Hydrogen Electrode)
<i>s</i>	: Katı (Solid)
s	: Saniye
S	: Sülfür/Kükürt
SHY	: Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı
SO _x	: Kükürt Oksitler
SUC	: Başlangıç Maliyeti (Start-up Cost)
V	: Volt
V.	: Hacimce (volume percent)

VOC	:	Değişken işletme maliyetleri (Variable Operating Costs)
vs.	:	Karşı (versus)
WC	:	İşletme Sermayesi (Working Capital)
ağ.	:	Kütlece (weight percent)



1. GİRİŞ

Havayolu taşımacılığı, diğer ulaşım türlerine kıyasla daha kısa sürede ve güvenilir bir ulaşım imkânı sağladığı için sürekli bir büyüme eğilimindedir. Tahminler, havacılık sektörünün yıllık %4,5 civarında büyüdüğünü ve bu büyüme eğiliminin sürdürüleceğini göstermektedir (Massaro vd., 2023). Yolcu ve kargo talebindeki artış devam ettikçe, daha fazla uçak operasyona katılmakta ve bu da tüketilen jet yakıtı miktarında artışa yol açmaktadır.

Ticari havacılıkta kullanılan jet yakıtlarının çok büyük bir bölümü ham petrolün 150 – 300 °C kaynama noktası aralığındaki rafine edilmiş kesrini oluşturmaktadır (Elmalik vd., 2014). Fosil bazlı bu jet yakıtlarının aşırı kullanımı bir dizi olumsuz etkiyi de beraberinde getirmektedir. Bu sorunların başında, fosil kaynakların sınırlı olması gelmektedir. Tahminler, mevcut ham petrol rezervlerinin içinde bulunduğumuz yüzyıl içinde tükeneceğini göstermektedir (Shafiee ve Topal, 2009; Abe vd., 2019). Fosil kaynakların sınırlı olması, yakıt fiyatlarının dalgalı ve yüksek seyretmesine neden olmaktadır. Bu durumun havayolu operasyonlarının maliyetlerinde önemli bir artışa yol açtığı görülmüştür (Lim ve Hong, 2014). Fosil yakıtların aşırı kullanımından kaynaklanan bir diğer sorun da atmosfere önemli miktarda sera gazı salınımıdır. Havacılık sektörü, fosil yakıtların kullanımından dolayı atmosfere salınan CO₂ emisyonlarının %2,5'ini tek başına gerçekleştirmektedir. Ek olarak, fosil yakıtların üst atmosferde yakılmasından dolayı salınan emisyonlar (CO₂, partikül madde, sülfat aerosoller, NO_x, su buharı gibi) jet duman izi oluşturmaktadır. Jet dumanı izinin de radyatif zorlama ve küresel ısınmada artışa neden olduğu düşünüldüğünde, havacılık sektörünün insan kaynaklı faaliyetlerden kaynaklanan küresel ısınmadaki payının yaklaşık %5 olduğu tahmin edilmektedir (Lee vd., 2009; Massaro vd., 2023). Artan küresel ısınma, iklim üzerinde geri dönülemez etkiler oluşturacağı için fosil yakıtların yerine kullanılabilecek sürdürülebilir ve yenilenebilir jet yakıtı kullanımı kaçınılmaz bir unsur haline gelmiştir.

İklim krizi nedeniyle, Birleşmiş Milletler'e üye 195 ülke tarafından 2005 yılında Paris İklim Anlaşması imzalanmıştır. Bu anlaşma, küresel sıcaklık artışının sanayi öncesi döneme kıyasla 1,5 °C ile sınırlandırılabilmesi amacıyla, fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasını hedeflemektedir. Küresel sıcaklık artışını 1,5 °C ile sınırlandırabilmek için, 2030 yılına gelindiğinde fosil kaynaklardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının %43 oranında azaltılması öngörülmektedir (Suresh vd., 2023). Havacılık sektörü, atmosfere önemli miktarda sera gazı saldıgı için, Birleşmiş

Milletler'in ortaya koyduğu hedeflere ulaşmada etkili bir role sahiptir. Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA) ve Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) gibi uluslararası havacılık otoriteleri, küresel ısınmayı önlemeye yönelik uygulamaların hayata geçirilmesi için çeşitli gelecek projeksiyonları belirlemiştir. Bu kapsamda IATA, 2050 yılına kadar CO₂ emisyonlarını 2005 yılı seviyesinin yarısına indirme hedefini benimsemiştir. ICAO, 2050 yılına gelindiğinde net sıfır CO₂ emisyonu hedefi benimsemiştir (Lau vd., 2024). IATA ve ICAO'nun belirlediği hedeflerin yakalanabilmesi için sürdürülebilir havacılık yakıtı (SHY) olarak adlandırılan bir uygulama hayata geçirilmiştir. Sentetik olarak üretilen SHY'ları, mevcut uçak sistemlerine uyumlu oldukları için kısa ve orta vadede fosil jet yakıtlarının yerine alması en muhtemel adaylardır. Ancak, güncel SHY üretim miktarı uluslararası havacılık otoritelerinin belirlediği hedeflerin çok gerisindedir. IATA'nın yayınladığı bir raporda ([http-1](#)), 2024 yılında toplam 1 milyon ton (1,3 milyar L) SHY üretimi gerçekleşirken bu değer toplam jet yakıtı üretiminin %0,3'üne karşılık gelmektedir. 2030 yılına gelindiğinde ise, yıllık 24 milyon ton (30 milyar L) SHY üretimi hedeflenmiştir ([http-2](#)). Ek olarak, 2050 yılına gelindiğinde, SHY'nın toplam jet yakıtları içerisindeki payının %65 olması hedeflenmektedir ([http-3](#)). Dolayısıyla, uluslararası havacılık otoriteleri tarafından belirlenen SHY üretim hedeflerinin yakalanabilmesi için mevcut SHY üretim teknolojilerine ek olarak yeni yöntemler geliştirilmeli ve hayata geçirilmelidir. Bu gereklilikten yola çıkarak, bu tezde, ilerleyen bölümlerde daha ayrıntılı olarak açıklandığı üzere, atıklardan SHY üretmeye yönelik bir döngüsel ekonomi modeli tasarlanmıştır.

Gelişen teknoloji, artan refah ve büyüyen nüfus nedeniyle yerel veya küresel atık miktarı sürekli artmaktadır. Geçmişte bu atıkların çoğu düzenli depolama sahalarında biriktirilirken, günümüzde çevresel etkiler ve hammadde kıtlığı göz önüne alındığında düzenli depolama artık kabul edilebilir bir atık yönetimi seçeneği olmaktan çıkmıştır. Bu sebeple, atıkların geri dönüştürülerek çeşitli sektörlerde hammadde olarak kullanılması için yeni düzenlemeler hayata geçirilmiştir. Fosil kaynakların sınırlı olması ve artan enerji talebi gibi nedenlerden ötürü atıkların enerji olarak geri dönüştürülmesi önemli bir çalışma konusu haline gelmiştir. Günümüzde biyoyakıt olarak da adlandırılan alternatif yakıtların üretimi, çok çeşitli hammaddelerin kullanılmasıyla gerçekleştirilebilmektedir. Bu hammaddeler, biyokütle (algler, peyzaj atıkları ve saman gibi), organik atıklar (kanalizasyon atıkları ve hayvansal yağlar veya gübre dahil) ve plastik ürünler (atık lastikler gibi) dahil olmak üzere geniş bir kaynak yelpazesini kapsamaktadır (Callegari

vd., 2020). Yüksek enerji içeriği (32 MJ/kg) (Sienkiewicz vd., 2012) nedeniyle atık araç lastikleri biyokütle ve diğer atıklardan ayrılarak bir adım öne çıkmaktadır. Dünya genelinde $\sim 29,1 \times 10^6$ ton/yıl atık lastik üretildiği tahmin edilirken bu atıkların miktarı sürekli bir artış trendindedir (Gunerhan, Altuntas ve Caliskan, 2023). Üretim sürecinde vulkanizasyon (kürleme), lastik üretiminde kullanılan kauçuğun esnekliğini, elastikiyetini ve dayanıklılığını artırmak için kullanılır. Vulkanizasyon aşamasında eklenen Sülfür (S), plastikleştiriciler ve dolgu malzemeleri gibi stabilizörler ve katkı maddeleri, atık lastiklerin doğal/atmosferik koşullarda çözünmesini engellemektedir (Xiao vd., 2022). Bu nedenle, önceki yıllarda ömrünü tamamlamış lastikler büyük atık yığınları halinde depolanmaktaydı. Ancak, özellikle kuru ve sıcak mevsimlerde, atık lastik depolarında çıkan yangınlar nedeniyle atmosfere önemli oranda NO_x , SO_x , is/kurum, partikül madde ve ağır metal emisyonları salınabilmektedir (Srinivasan vd., 2024). Bu emisyonlar yağmur suları ile birlikte yer altı sularını ve toprağı kirletirken solunum yolu ile canlı türlerinin sağlığı üzerinde zararlı etkiler oluşturabilmektedir. Atık lastik depolarında meydana gelen yangınların söndürülme zorlukları ise bir diğer problemdir. Çünkü, atık lastik yangınlarını söndürmek hem çok zorlu ve maliyetli hem de su ile söndürülmesi sırasında lastik içeriğindeki zararlı bileşikler su ile birlikte taşınacağı için hem toprağı hem de yer altı sularını kirletebilir (Jang vd., 1998). Bu gibi olumsuzluklar nedeniyle dünyanın pek çok ülkesinde atık lastiklerin depolanması yasal düzenlemeler ile sınırlandırılmış veya tamamen yasaklanmıştır (Sienkiewicz vd., 2012; Khan, Shyamal ve Kazmi, 2024). Dolayısıyla, sürdürülebilir atık lastik yönetimi önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Atık yönetimi stratejilerine göre, atık lastikler geri dönüşüm sürecinde ikili bir işlev görebilir; yeni lastiklerin yeniden üretiminde kullanılabilir veya inşaat veya yol yapımında dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Ayrıca atık lastikler, kömüre kıyasla nazaran daha fazla ısı değere sahip olmasından ötürü çimento fabrikalarında yakılarak enerji üretmek için kullanılabilir (Vasiliu vd., 2023; Ramarad vd., 2015). Atık lastiklerin yakılması sırasında kömüre kıyasla daha az emisyon üretildiği bildirilmiş olmasına rağmen, atmosfere önemli miktarda sera gazı emisyonu salındığı açıktır (Xiao vd., 2022). Sonuç olarak, atık lastiklerin doğrudan yakıt olarak kullanılması yerine piroliz ve gazlaştırma gibi termokimyasal süreçlerle jet yakıtı, dizel ve benzin gibi daha değerli ürünlere dönüştürülmesi çevresel etkiler açısından daha faydalı bir yaklaşımdır (Khan, Shyamal ve Kazmi, 2024). Ayrıca, atık lastiklerin termokimyasal yöntemlerle yakıt

dönüştürülmesi, fosil yakıtlardan elde edilen yenilenemeyen enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmakta ve sürdürülebilirliğin geliştirilmesinde önemli bir rol oynayabilir.

Piroliz işlemi, uygulanması kolay olduğu için atık lastiklerdeki organik bileşiklerin yakıt olarak geri dönüştürülmesinde sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Ancak, atık lastiklerden üretilen biyoyakıt (atık lastik piroliz yağı) ticari jet yakıtlarından farklı özelliklere sahip olabilir. Hammadde özellikleri ve proses koşullarından dolayı atık lastik piroliz yağının (ALPY'nın) karbon zincir uzunluğu, H/C oranı, element içeriği, yoğunluk gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri ticari jet yakıtları için belirlenen limitlerin dışındadır. Bu içerik yapısından dolayı, ALPY'nın havacılık gaz türbinli motorlarında doğrudan yakıt olarak kullanılması istenmeyen çevresel etkilere sebep olmaktadır. Çevresel etkilerin yanı sıra, ALPY'nın gaz türbinli motorlarda doğrudan yakıt olarak kullanılması yakıt deposuna, yakıt hattına ve sıcak motor parçalarına yapısal zararlar verebilir (Frigo vd., 2014). Dolayısıyla, ALPY'nın istenmeyen özellikleri iyileştirilerek ticari jet yakıtları ile kıyaslanabilir seviyeye getirilmelidir. Rafineri merkezlerinde ham petrole uygulanan katalitik parçalama, alkilasyon, hidro-işleme (hidrodenitrojenasyon, hidrodeshülfürizasyon ve hidrodearomatizasyon) gibi prosesler ile ALPY'nın yakıt olarak kullanımından kaynaklanabilecek problemlerin üstesinden gelmek mümkündür. Sonuç olarak, çeşitli rafineri prosesleri ile ticari jet yakıtlarına benzer özelliklere sahip biyoyakıt veya diğer adıyla sürdürülebilir havacılık yakıtı (SHY) üretmek mümkündür.

Yakıt rafineri proseslerinde, ALPY bir katalizör aracılığıyla hidrojen (H_2) ile reaksiyona girer ve böylelikle ALPY'nın istenmeyen özellikleri iyileştirilebilir. Bu rafineri proseslerinde beslemenin (ALPY) içeriğine bağlı olarak çeşitli oranlarda H_2 tüketilmektedir. Bu rafineri proseslerinde, kullanılan H_2 gazı geleneksel yöntemler ile üretilmektedir. Bilindiği üzere, dünya genelindeki H_2 üretiminin %96'sı fosil kaynaklardan sağlanmaktadır (Gunerhan, Altuntas ve Açıkkalp, 2025). Daha önce bahsedildiği gibi, fosil kaynaklar sınırlıdır ve önümüzdeki süreçte tükenme tehlikesi ile karşı karşıyadır. Bu sebeplerden ötürü, ALPY'nın rafine edilmesinde, doğal gaz, petrol kısmi oksidasyonu ve kömür gazlaştırma gibi geleneksel yöntemlerle üretilen H_2 yerine alternatif yöntemlerle üretilen H_2 gazının kullanılması hedeflenmiştir. Böylelikle, fosil yakıtlara olan bağımlılık azaltılabilir.

Su elektrolizi, geleneksel H_2 üretim yöntemlerine alternatif olabilecek sürdürülebilir proseslerin başında gelmektedir (Baharudin ve James Watson, 2017).

Ancak, suyun elektrokimyasal olarak ayrışması ile kabul edilebilir hızda H_2 gazı üretmek için yüksek hücre gerilimi uygulanmalıdır. Bu durum, enerji tüketimini ve dolayısıyla H_2 üretim maliyetlerini artırmaktadır. Anotta su yerine organik hammaddelerin kullanılması durumunda daha düşük hücre gerilimlerinde H_2 üretilbildiği ispatlanmıştır. Bu hammaddelerden biri de yüksek karbon içeriğine sahip kömürdür (Ewan ve Adeniyi, 2013). Atık lastiklerin piroliz edilmesi sırasında üretilen üç üründen biri olan atık lastik piroliz kömürü (ALPK) doğal kömür gibi yüksek karbon içeriğine sahiptir. Bu sebeple, elektroliz prosesinde H_2 üretimi için hammadde olarak kullanılmasının önünde hiçbir engel bulunmamaktadır. Sonuç olarak bu tezde, döngüsel ekonomi modeli kapsamında atık lastik hammaddesinden sürdürülebilir havacılık yakıtına yönelik artan talebin karşılanması için uygulanması gereken süreçler incelenmiştir.

Tezin takip eden bölümlerinde aşağıdaki konular incelenmektedir. Bölüm 2'de, atık lastik piroliz yağının rafineri süreçleri ve atık lastik piroliz kömürünün elektrokimyasal oksidasyon mekanizmasının yanı sıra literatürdeki mevcut çalışmalar da dahil olmak üzere araştırma konusunun genel kapsamı açıklanmaktadır. Bölüm 3'te, tezde önerilen modelin uygulanmasını destekleyen varsayımlara ve hesaplamalara kapsamlı bir genel bakış sunulmuştur. Bölüm 4'te, piroliz ürün miktarı, sürdürülebilir havacılık yakıtı üretimi ve hidrojen tüketimine ilişkin sonuçlar verilirken bu sonuçlar üzerinde etkili olan unsurlar açıklanmıştır. Ayrıca, önerilen modelin zorlukları ve gelecek perspektifi de açıklanmıştır. Bölüm 5'te tez çalışmasının genel sonuçları değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Araştırma Konusunun Genel Kapsamı

Bu bölümde, atık lastiklerden piroliz prosesi ile sürdürülebilir havacılık yakıtı (SHY) üretimi üzerine yapılmış çalışmaların yanı sıra karbon veya kömür hammaddesinden H₂ üretimine ilişkin yapılmış çalışmalara yer verilmiştir. Atık lastik piroliz kömürünün (ALPK) elektrokimyasal oksidasyonu ile H₂ üretimi üzerine herhangi bir çalışma bulunmadığından, benzer hammaddelerden (yüksek karbon içeriğine sahip) H₂ üretimi üzerine yapılan çalışmaların sonuçları verilmiştir.

Atık lastik piroliz yağları (ALPY'ları) havacılık gaz türbinli motorlarında ilk olarak petrol türevli yakıtlar ile karıştırılarak veya saf olarak kullanılmıştır. ALPY'nı yakıt olarak kullanan çalışmalardan ilki, Seljak, Oprešnik ve Kutrašnik (2014) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, ALPY'nın 190 – 350 °C kaynama noktası aralığındaki kesri gaz türbinli motorda test edilmiştir. ALPY'ı kullanıldığında nitrojen oksit (NO_x) ve kurum emisyonlarının arttığı rapor edilirken ALPY'nın içeriğinde yüksek oranda nitrojen (N) ve poliaromatik hidrokarbon (PAH) bileşikler olmasının bu emisyonların yüksek olmasına neden olduğu ifade edilmiştir. ALPY'nın gaz türbinli motorda yakıt olarak kullanıldığı bir diğer çalışma Suchocki vd. (2021) tarafından yürütülmüştür. Ham ALPY geniş kaynama noktası aralığına (70 – 500 °C) sahip olduğu için ticari jet yakıtlarına kıyasla daha yüksek viskozite ve yoğunluğa sahip olmasının yanı sıra içeriğinde katran/zift ve partiküller de bulunabilmektedir. Suchocki vd. (2021) bu karakteristik sorunlarının üstesinden gelmek için ALPY'nın 225 °C kaynama noktasına kadar olan kesrini ayırtmış ve motor testlerinde bu kesri kullanmıştır. Yapılan deneylerde, ALPY'nın kaynama noktası aralığı düşük olan fraksiyonu kullanıldığı için yakıt tüketiminin bir miktar arttığı bildirilmiştir. Ek olarak, ALPY'nın yüksek N içeriği ve yüksek yoğunluğunun sırasıyla NO_x ve karbon monoksit (CO) emisyonlarının artmasına neden olduğu ifade edilmiştir. ALPY'nın havacılık gaz türbinli motorlarında yakıt olarak kullanıldığı diğer çalışmalarda da (Seljak, Širok ve Kutrašnik, 2016; Seljak and Kutrašnik, 2016; Gunerhan, Altuntas ve Caliskan, 2023; Gunerhan, Altuntas ve Caliskan, 2024; Suchocki, 2024) Seljak, Oprešnik ve Kutrašnik (2014) ve Suchocki vd. (2021) tarafından yürütülen çalışmalara benzer sonuçlar rapor edilmiştir. Ham ALPY'nın geniş kaynama noktası aralığı, yüksek viskozitesi, yüksek yoğunluğu, yüksek N içeriği, katı partikül içeriği, PAH içeriği gibi özellikleri farklı çalışmalarda benzer sonuçların ana nedenleri

olarak belirtilmiştir. Bu nedenle, ALPY, söz konusu özellikleri iyileştirilmeden ticari havacılıkta doğrudan yakıt olarak kullanılamaz.

Ham petrol, 40 – 600 °C kaynama noktası aralığına sahip doymuş hidrokarbonlar (parafinler veya alkanlar), doymamış hidrokarbonlar (olefinler; alkenler veya alkinler) ve aromatik hidrokarbonlardan (benzen vb.) meydana gelmektedir. Ek olarak, nitrojen (N), sülfür (S) ve oksijen (O) gibi organik bileşiklerin yanı sıra nikel (Ni), vanadyum (V), demir (Fe) ve bakır (Cu) gibi metaller de içerir (Fahim, Al-Sahhaf ve Elkilani, 2010). Bu nedenle ham petrol, kaynama noktası aralığı, hidrokarbon bileşiklerinin doygunluğu ve organik ve organik olmayan elementlerin giderilmesi de dahil olmak üzere piyasa ihtiyaçlarına göre belirli rafineri proseslerine tabi tutulmalıdır. Ham petrol gibi, ham ALPY da hem geniş kaynama noktası aralığına hem de istenmeyen organik veya organik olmayan bileşiklere sahip olabilmektedir. ALPY'nın ticari havacılıkta doğrudan yakıt olarak kullanılabilmesi için daha önce belirtilen özelliklerinin katalitik parçalama, alkilasyon ve hidro-işleme (hidrodenitrojenasyon, hidrodesülfürizasyon ve hidrodearomatizasyon) gibi rafineri prosesleri ile jet yakıtı seviyesine iyileştirilmesi gerekmektedir. Literatürde, ALPY'larının özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine çok sayıda araştırma yürütülmüştür. Bu araştırmaların bazılarında petrol rafineri proseslerinin bir tanesi tek başına uygulanırken bazılarında birçoğu bir arada veya kademeli olarak uygulanabilmektedir. Ham ALPY'nın fiziksel ve kimyasal özellikleri ile elde edilecek yakıtın kullanım amacı, uygulanacak rafineri proseslerini belirleyen başlıca faktörlerdir. Dębek ve Walendziewsk (2015), ALPY'nın rafine edilmesinde CoMo–SiO₂–Al₂O₃ ve NiMo–Al₂O₃ katalizörlerinin etkisini incelemiştir. CoMo–SiO₂–Al₂O₃ ve NiMo–Al₂O₃ katalizörler hidrodesülfürizasyon (HDS) işleminde ALPY'nın S içeriğini kütlece %1,1'den sırasıyla %0,2'ye ve %0,1'e düşürmüştür. Ayrıca, ALPY'nın başlangıçtaki brom sayısı 67,5 g Br₂/100g'iken NiMo–Al₂O₃ katalizör ile gerçekleştirilen hidro-işleminde sonra 11,1 g Br₂/100g'e gerilemiştir. Brom sayısındaki düşüş, doymamış hidrokarbonların (olefinler) önemli bir kesrinin doymuş hidrokarbonlara dönüştürüldüğünü göstermektedir. Buna rağmen, ALPY'nın aromatik hidrokarbon içeriğinin halen çok yüksek olduğu belirtilmiştir. Hita vd. (2015a) tarafından yapılan çalışmada yine NiMo katalizörün hidrodenitrojenasyon (HDN), hidrodesülfürizasyon (HDS) ve hidrodearomatizasyon (HDA, doymamış hidrokarbonlara hidrojen eklenmesi) verimleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Beş farklı katalizör destek malzemesi (γ -Al₂O₃, SiO₂–Al₂O₃, SBA-15, MCM-41 ve dengelenmiş FCC katalizörü) üzerine sentezlenmiş

NiMo katalizörler 275 – 375 °C sıcaklıklarda ve 6,5 MPa basınçta ALPY'nın özelliklerinin iyileştirilmesi için test edilmiştir. Tüm katalizör tabanları %99'dan fazla HDN verimi sunarken $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve MCM-41 en yüksek (%99,9) HDS verimi sunmuştur. Hidro-işlemden sonra ALPY'nın izo ve normal parafin içeriğinde yaklaşık %30 artış gerçekleşmiştir. $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve MCM-41 katalizör tabanları diğerlerine kıyasla çok daha yüksek oranda parafin oluşmasına katkı sağlamıştır. Bu durum, $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve MCM-41 desteklerinin tabanlarının diğer katalizör desteklerinden daha yüksek hidro-işlem yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan katalizörler düşük asitliğe sahip olduğu için belirli bir oranda katalitik parçalama gerçekleştirebilmektedir. Ancak, ALPY'nın içeriğindeki aromatik ve naftenik bileşiklerin daha fazla giderilmesi için daha güçlü asiditeye sahip ve daha fazla hidro-işlem reaksiyonları gerçekleştirebilecek katalizörler kullanılmalıdır. Hita vd. (2015b) bu hedef doğrultusunda, PtPd/ $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ katalizör kullanarak, hidro-işlenmiş ALPY'nın katalitik parçalanma davranışını incelemiştir. ALPY'nin kaynama noktası >350 °C olan bileşik içeriği katalitik parçalama prosesi sonrasında %21,8'den %1'in altına düşmüştür. Eş zamanlı olarak, ALPY'nın parafin içeriğinin %70'in üzerine çıktığı bildirilmiştir. Öncü çalışmalar haricinde, ALPY'ndan jet yakıtı üretmek için son yıllarda giderek artan sayıda araştırma yapılmaktadır (Straka vd., 2023; Rogachuk ve Okolie, 2024; Sajdak vd., 2025). Straka vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, NiMo/ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ katalizör yardımıyla ALPY'nın yakıt özellikleri iyileştirilmiştir. HDS ve HDN işlemleri ile ALPY'nın sırasıyla S ve N içeriği çok yüksek oranda giderilmiştir. Ek olarak, hidrojenasyon işlemi ile olefinler (doymamış hidrokarbonlar) doymuş hidrokarbonlara dönüştürülürken aromatiklerin bir kısmı doymuş hidrokarbonlara dönüştürülebilmektedir. Tercih edilen katalizörün destek malzemesi düşük asidik özellik sergilediği için ALPY'nın kaynama noktası aralığında önemli bir değişim gerçekleşmemiştir. Daha düşük kaynama noktasına (karbon zincir uzunluğuna) sahip hidrokarbon bileşikler elde etmek için asidik özelliği daha güçlü olan destek malzemeleri kullanılmalıdır. Sajdak vd. (2025), ALPY'nın daha düşük kaynama noktasına sahip bileşiklerden oluşmasını sağlamak için hidro-işleme ek olarak katalitik parçalama prosesi uygulamıştır. Hidro-işlemler (hidrodeoksijenasyon, HDO) için NiMo/ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ katalizör kullanılırken katalitik parçalama için daha güçlü asitlik özelliği olan NiW/ $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ katalizör kullanılmıştır. Rafineri proseslerinden sonra yapılan Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometresi (GC-MS) analizleri, ALPY'nın karbon zincir uzunluğunun $\text{C}_6 - \text{C}_{12}$ aralığında olduğunu

doğrulamıştır. Tamizhdurai vd. (2025) tarafından yürütülen güncel bir diğer çalışmada yine, katalitik parçalama prosesi ile ALPY'nın yüksek kaynama noktasına sahip bileşikleri düşük kaynama noktasına sahip bileşiklere dönüştürülmüştür. Uzun karbon zincir uzunluğuna sahip bileşikler (yüksek kaynama noktasına sahip bileşikler) daha kısa karbon zincir uzunluğuna sahip bileşiklere dönüştürmek için ZSM-5 katalizör kullanılırken hidro-işlemler için Co/SBA-15 katalizörü tercih edilmiştir. Rafineri prosesleri sonunda elde edilen yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra bileşimi de dizel yakıt ile benzerlik göstermekteydi. Tamizhdurai vd. (2025) önerdikleri rafineri modeli ile ALPY'nın %94'ünden daha fazlasının dizel yakıt ile kıyaslanabilir özellikler sergilediğini göstermiştir. Tamizhdurai vd. (2025) tarafından yürütülen çalışma, ALPY'ndan en yüksek oranda bir yakıt türü üretilebildiğini göstermiştir. Bu tez çalışmasında ALPY'nın %100'ü sürdürülebilir havacılık yakıtına dönüştürülmesi hedeflendiği için Tamizhdurai vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen uygulamaya benzer bir yaklaşım benimsenmiştir. Ancak, Tamizhdurai vd. (2025) tarafından yürütülen çalışma uygulanan rafineri proseslerinin belirli kusurları bulunmaktadır. Dolayısıyla, ALPY'ndan sürdürülebilir havacılık yakıtı (SHY) üretmek için söz konusu modelden daha farklı bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu yaklaşım MATERYAL VE METOT (3'üncü bölüm) bölümünde detaylı bir şekilde sunulduğu için burada açıklanmamıştır.

Yukarıda belirtildiği üzere, yakıtların rafineri proseslerinde besleme sıvısı (ham petrol veya bu tezde belirtilen ALPY) katalizör yardımıyla H_2 ile reaksiyona girmektedir. Küresel H_2 üretiminin çok büyük bir bölümü fosil kaynaklardan elde edildiği için sürdürülebilir değildir. Döngüsel ekonomi bağlamında, fosil kaynaklar yerine atık lastiklerden H_2 üretmek, sürdürülebilir ve yenilenebilir bir gelecek inşa edilmesine katkıda bulunabilir. Bu bağlamda, bu tez çalışmasındaki rafineri proseslerinde kullanılacak H_2 gazı, atık lastik piroliz kömürünün (ALPK) elektrokimyasal oksidasyonu ile üretilcektir. Ancak, literatürde ALPK'nün elektrokimyasal oksidasyonunu gerçekleştiren çalışma olmadığı için ALPK'üne benzer elementel yapıya sahip biyokömür malzemesinin sonuçları verilmiştir. Biyokömürün elektrokimyasal oksidasyonu ile H_2 üretimi yapılan öncü çalışma Chen vd. (2019) tarafından yürütülmüştür. Chen vd. (2019), doğranmış Japon sedir ağacı parçalarını 550, 650, 750, 850, 950 ve 1050 °C sıcaklıklarda piroliz ederek çeşitli yüzey özelliklerine sahip biyokömürler üretmiştir. Biyokömür içermeyen çözeltide elektrokimyasal aktivitenin başlaması için ~1,4 V potansiyel uygulanması gerekirken elektrolite biyokömür

eklendikten sonra 0,5 V hücre geriliminde elektrokimyasal aktivite başlamıştır. 1,0 V sabit hücre gerilimi uygulandığında en yüksek katalitik aktiviteyi ($2,2 \text{ mA/cm}^2$) en yüksek özgül yüzey alanına sahip biyokömür (850°C 'de piroliz edilen) sağlamıştır. Artan yüzey alanı daha fazla reaktif bölge oluşturmuş ve bunun sonucunda katalitik aktivitede artış meydana gelmiştir. Ancak, deney süresi uzadıkça akım yoğunluğunda (katalitik aktivitede) azalma meydana gelmiştir. Elektrokimyasal oksidasyon ilerledikçe oksijen-içeren fonksiyonel grupların biyokömür yüzeyine daha fazla tutunarak ince bir film oluşturmuştur. Oksitlenmiş biyokömüre 850°C 'de ısıtma işlemi uygulandığında elektrokimyasal aktivitenin yeniden arttığı gözlenmiştir. Piroliz biyokömürünün elektrokimyasal oksidasyonu, su elektrolizine kıyasla daha düşük hücre voltajlarında başlamaktadır. Ancak, elektrot yüzeyindeki reaksiyonun gerçekleşme hızı çok yavaş olduğu için çok düşük akım yoğunluğu gözlenmektedir. Düşük akım yoğunluğunun bir sonucu olarak düşük H_2 üretim hızı meydana gelebilmektedir. Amikam, Fridman-Bishop ve Gendel (2020), piroliz biyokömür oksidasyonundaki düşük reaksiyon hızının üstesinden gelmek için katalizör görevi gören $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ redoks aracılarını kullanmıştır. Biyokömürün elektrokimyasal oksidasyonunda 1,0 V hücre gerilimi uygulandığında 50 mA/cm^2 akım yoğunluğuna ulaşıldığı bildirilmiştir. Bu durum, redoks mediatörlerinin katalitik aktiviteyi önemli derecede hızlandırdığını göstermektedir. Ancak, 20 saatlik oksidasyon süresi sonunda biyokömür yüzeyinde oluşan oksit tabaka nedeniyle akım yoğunluğu azalarak 5 mA/cm^2 'e kadar gerilemiştir. Oksitlenmiş biyokömür 3 saat süreyle 250 , 350 ve 450°C gibi sıcaklıklarda ısıtma işlemi uygulanmış ve takibinde biyokömürün deaktivasyon probleminin %80'inden fazlası giderilmiştir. Farklı çalışmalarda yine yavaş biyokömür oksidasyon mekanizmasının iyileştirilmesi için redoks araçları kullanılmıştır (Ying vd., 2021). Biyokömür içeren elektrolite $0,1 \text{ M Fe}^{2+}$ ve $0,5 \text{ M Fe}^{2+}$ eklenmesi durumunda akım yoğunluğu sırasıyla 100 ve 400 mA/cm^2 'ye ($0,8 \text{ V}$ hücre gerilimindeki) yükselmiştir. Ancak, daha fazla demir iyonu eklenmesinin akım yoğunluğu üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Elektrokimyasal oksidasyonda su yerine biyokömür oksidasyonunun tercih edilmesinin en önemli nedeni, daha düşük hücre voltajlarında H_2 üretimi ve dolayısıyla daha düşük enerji tüketimidir. Bu varsayımı doğrulamak için Du vd. (2023), 10 mA/cm^2 akım yoğunluğunda biyokömür ve su elektrolizinden H_2 üretmek için ne kadar enerji tüketildiğini belirlemiştir. Biyokömür ve su elektrolizi ile hidrojen üretmek için sırasıyla $3,29$ kilowatt-saat/normal metreküp hidrojen ($\text{kWh/Nm}^3 \text{ H}_2$) ve $4,5 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ H}_2$ enerji tüketildiği bildirilmiştir. Literatürdeki

çalışmalar, piroliz kömüründen kabul edilebilir hızda H₂ üretebilmek için su elektrolizinden daha düşük enerji gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle, bu tezde kullanılacak H₂ gazının atık lastik piroliz kömürünün (ALPY) elektrokimyasal oksidasyonu ile üretilmesine karar verilmiştir.

2.2. Atık Lastik Piroliz Yağlarının Rafineri Prosesleri ve Yakıt Dönüşümü

Ticari jet yakıtları, C₈ - C₁₆ aralığında karbon zincir uzunluklarına sahip doymuş hidrokarbon bileşiklerinden oluşmaktadır. Bu hidrokarbon bileşenleri normal alkanlar (hacimce %20), izo-alkanlar (hacimce %40), siklo-alkanlar (hacimce %20) ve aromatikler (hacimce %20) içermektedir (Lefebvre ve Ballal, 2010). Jet yakıtlarının bu karbon zinciri uzunluğu ve bileşik yapısı, düşük viskozite, yüksek kalorifik değer, kararlı yanma, düşük partikül emisyonları ve yüksek parlama noktası gibi spesifik özelliklerine katkıda bulunmaktadır. Bu nedenlerden ötürü, bir alternatif yakıtın (ALPY gibi) karbon zinciri aralığı ve bileşen içeriği ticari jet yakıtlarına benzer olmalıdır. Ancak hem hammadde bileşiminden hem de nihai proses sıcaklığı, ısıtma hızı, tahliye gazı akış hızı ve bekleme süresi gibi piroliz proses parametreleri dolayısıyla üretilen ham ALPY'ı geniş kaynama noktası aralığına (yaklaşık 70 °C ile 500 °C arasında) ve geniş karbon zinciri uzunluklarına (yaklaşık C₅ ile C₂₅ arasında) sahip bileşiklerden oluşabilmektedir (Laresgoiti vd., 2004; de Marco Rodriguez vd., 2001; Kyari, Cunliffe ve Williams, 2005; Palos vd., 2019). Buna ek olarak, lastiklerin aromatik yapısı nedeniyle, ham ALPY önemli miktarda doymamış hidrokarbon içerebilir (hacimce %7-8 olefin, hacimce %35 naftenik ve hacimce %55'ten fazla aromatik) ve lastik üretim işlemlerinden ötürü S ve N gibi istenmeyen heteroatomlar barındırabilir (Mohan, Dutta ve Madav, 2019; Dai vd., 2001; Martínez vd., 2013b). Rafineri prosesleri ile ham ALPY'nın içeriğindeki heteroatomlar giderilebilir, uzun ve kısa zincirli karbon bileşenlerini jet yakıt standartlarına göre düzenleyebilir ve doymamış hidrokarbonlar doymuş hidrokarbonlara yükseltebilir (Campuzano vd., 2023). Rafine edildikten sonra, kaynama aralığı, H/C atomik oranı, yoğunluk, kinematik viskozite, donma noktası, ısıtma değeri ve karbon içeriği açısından ticari jet yakıtlarıyla karşılaştırılabilir özelliklere sahip alternatif bir yakıt üretilir.

Katalitik parçalama, alkilasyon ve hidro-işleme (HDS, HDN ve HDA) gibi çeşitli rafineri prosesleri ALPY'nın özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilir. Bu rafineri terimleri, farklı görevler için kullanılmış olmasına rağmen çoğunda besleme sıvısı bir

katalizör yardımıyla H₂ ile reaksiyona girmektedir. Kısaca açıklamak gerekirse katalitik parçalama, yüksek kaynama noktasına sahip bileşiklerin daha düşük kaynama noktasına sahip bileşiklere dönüştürülmesidir. Alkilasyon, düşük karbon zincir uzunluğuna sahip bileşiklerin daha uzun karbon zincir uzunluğuna sahip bileşiklere dönüştürülmesidir. Hidro-işleme, besleme sıvısının içeriğindeki S, N, O ve metal gibi safsızlıkların ve doymamış hidrokarbonların (aromatikler, olefinler ve naftenikler gibi) doymuş parafin veya yaygın bilinen adıyla doymuş hidrokarbonlara (alkanlara) dönüştürülmesidir (Fahim, Al-Sahhaf ve Elkilani, 2010). Bu rafineri proseslerinde kullanılan katalizörün türü, proses sıcaklığı ve H₂ basıncı gibi parametreler prosesin isminin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Ortalama sıcaklıklarda (400 °C'nin altında) ve 5 MPa'nın altındaki basınçlarda hidro-işlemler baskın mekanizmayken daha yüksek sıcaklık ve basınçlarda katalitik parçalama daha baskın mekanizmadır. Katalizör türüne göre yapılan sınırlandırmada ise, katalizör destek malzemesinin asidik özelliği ve aktif metal türü yine proses türünün uygulanmasında kritik öneme sahiptir. Düşük asidik özelliği olan gözenekli alümina (Al₂O₃) matris üzerine Co (Kobalt), Mo (Molibden), Ni (Nikel) ve W (Tungsten) metallerinin ikili kombinasyonlarının sentezlenmesiyle üretilen katalizörler hidro-işleme prosesleri için kullanılırken SiO₂/Al₂O₃, Y-zeolit/Al₂O₃ ve Y-zeolit/amorf oksit gibi yüksek asitlik özelliği olan destek malzemelerinin üzerine Pt (Platin), Paladyum (Pd), Co, Ni, Mo ve W gibi aktif metallerin kombinasyonlarından oluşan katalizörler katalitik parçalama prosesleri için kullanılmaktadır (Ward, 1993).

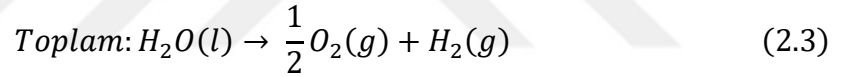
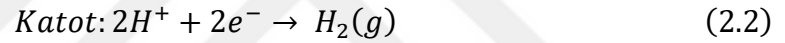
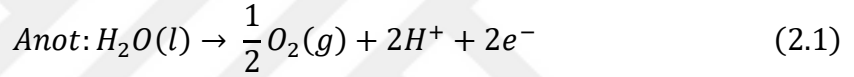
2.3. Atık Lastik Piroliz Kömürünün Elektrokimyasal Oksidasyon Mekanizması

Bu tezde önerilen hidrojen üretim modeli (atık lastik piroliz kömürünün elektrokimyasal oksidasyonu), daha önce test edilmemiş bir yaklaşıma dayanmaktadır. Bu nedenle, bu yaklaşımın arkasındaki bilimsel temelin okuyucu tarafından net bir şekilde anlaşılabilmesi için bu bölümün yazılması gerektiğine inanılmaktadır. Böylece, bu tezde önerilen model ile atık lastik piroliz kömüründen elektrokimyasal oksidasyon yolu ile hidrojen üretiminin teorik ve deneysel olarak mümkün olduğu kanıtlanabilir.

Piroliz prosesinde atık lastiklerin uçucu kısmı buharlaştıktan sonra geride atık lastik piroliz kömürü (ALPK) olarak adlandırılan bir ürün kalmaktadır. ALPK geleneksel yanma (Qiao vd., 2022), asfalt güçlendirici (Roy, Chaala ve Darmstadt, 1999), mürekkep pigmenti (Jie vd., 2006), karbon siyahı (Banar vd., 2015), aktif karbon (Mui, Ko ve McKay, 2004), yapı malzemesi (Mahmood, Khushnood, Zeeshan, 2020) ve batarya veya

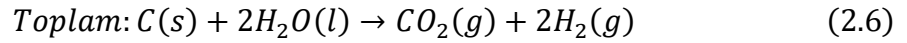
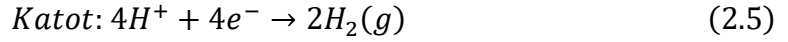
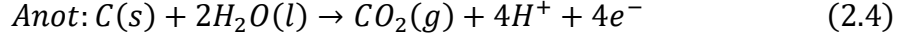
kapasitör malzemesi (Sathiskumar ve Karthikeyan, 2019) olarak çeşitli amaçlarla yeniden kullanılabilir. Ayrıca, içerdiği önemli miktarda karbon nedeniyle ALPK, yanıcı gaz üretimi için gazlaştırma işleminde de kullanılabilir (Preciado-Hernandez vd., 2021). Yüksek proses sıcaklığı (yaklaşık 1000 °C) nedeniyle, gazlaştırma prosesi enerji sarfiyatında önemli bir artışa neden olabilmektedir (Portofino vd., 2016). Bu nedenle, ALPK gazlaştırma yerine ılıman sıcaklıklarda (~150 °C) gerçekleştirilen elektroliz veya diğer adıyla elektrokimyasal oksidasyon prosesi ile hidrojen gibi katma değerli ürünlere dönüştürülebilir.

Elektroliz prosesi ile H₂ üretilmesi geleneksel H₂ üretim yöntemlerine alternatif olarak geliştirilmiştir. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, elektroliz prosesi daha düşük karbon emisyonu seviyelerine yol açtığı için daha çevre dostudur. Dolayısıyla, elektroliz prosesi giderek artan bir ilgi ile karşı karşıyadır. Geleneksel su elektrolizinde gerçekleşen reaksiyonlar Denklem (2.1) – (2.3) ile gösterilmektedir (Chi ve Yu, 2018)



Su elektroliz sürecinde, H₂ gazının üretiminden katot bölümü (Denklem 2.1) sorumlu iken, oksijen (O₂) gazının üretiminden anot bölümü (Denklem 2.2) sorumludur. Su elektrolizinde gerçekleşen toplam reaksiyon ise Denklem (2.3)'de gösterilmektedir. Oksijen gazının yavaş kinetiği nedeniyle, su elektrolizi ile hidrojen üretmek için gereken en düşük potansiyel (termodinamik denge potansiyeli) reaksiyon ısısı eşdeğerine göre 1,23 volt (V) olarak hesaplanmaktadır. Bu, gereken minimum potansiyeldir. Ancak, gerçekte, oksijen evrimi reaksiyonu ile O₂ üretmek için kullanılan katalizörler de ek potansiyele ihtiyaç duymaktadır. Bu ek potansiyellerde hesaba katıldığında, su elektrolizi ile kayda değer bir hızda H₂ üretmek için gereken potansiyel >1,8 V olarak gerçekleşmektedir (Luo vd., 2021). Artan hücre gerilimi, enerji tüketimini artırmakta ve bunun bir sonucu olarak maliyetlerde artış meydana gelebilmektedir. Bu sebeple, son zamanlarda, elektroliz prosesinde anotta yavaş oksijen evrimi reaksiyonu yerine daha düşük potansiyellerde elektron transferine olanak sunan hammaddelerin kullanılmasına odaklanılmıştır. Yavaş oksijen evrim sürecinin aksine, bu hammadde kaynakları elektron transferinin daha düşük potansiyellerde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu alternatif

hammadelerden biri de yüksek karbon içeriğine sahip malzemelerdir. Bu karbon tabanlı hammaddelerin elektrokimyasal oksidasyonunda anotta O₂ gazı yerine CO₂ ve CO gibi gazlar üretilmektedir. Elektroliz prosesinde anotta oksijen evrimi reaksiyonu yerine karbon kullanılmasının reaksiyon ürünleri üzerindeki etkisi Denklem (2.4) – (2.6)’da verilmiştir (Sabareeswaran vd., 2013).



Elektroliz prosesinde su yerine karbon tabanlı hammaddelerin reaksiyona girmesi ile H₂ üretmek için gereken enerji tüketimi azaltılabilir. Karbonun reaksiyona girmesi ile toplam reaksiyonun gerçekleşmesi için gereken minimum potansiyel 0,21 V vs. RHE olarak hesaplanmıştır. Ancak uygulamada, karbon destekli su elektroliziyle kayda değer hızlarda H₂ üretmek için gerekli potansiyel 0,8 V veya daha fazla olabilmektedir. Bu artışa rağmen karbon-destekli su elektrolizi ile H₂ üretmek için gereken enerji su elektrolizine kıyasla çok daha düşüktür.

Önemli miktarda karbon içeren hammaddelerden elektrokimyasal oksidasyon yoluyla hidrojen üretme süreci üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Kömür (Fan vd., 2023), grafen (Kou vd., 2021), aktif karbon (Dhooge, Stilwell ve Park, 1982, s.63) ve biyokömür (Chen vd., 2019) bu hammaddeler arasında yer almaktadır. Özellikle son yıllarda, piroliz biyokömüründen elektrokimyasal oksidasyonu ile H₂ üretilmesi üzerine önemli sayıda araştırma yürütülmüştür (Sun vd., 2025; Chen vd., 2025; Ying vd., 2024). Geçmişteki araştırmalarda elektrokimyasal oksidasyon ile H₂ üretmek için kullanılan piroliz biyokömürlerinin özellikleri Tablo 2.1’de gösterilmektedir. Tablo 2.2’de ise farklı piroliz sıcaklıklarında üretilen atık lastik piroliz kömürlerinin özellikleri gösterilmektedir. Tablo 2.1 ve Tablo 2.2’den de anlaşıldığı üzere piroliz biyokömürü ve ALPK kıyaslanabilir element içeriğine ve özgül yüzey alanına sahiptir. Dolayısıyla, elektroliz prosesinde oksidasyon hammaddesi olarak piroliz biyokömürü yerine ALPK kullanılabilir.

Elektroliz prosesinin H₂ üretim hızı doğrudan oksidasyon hızıyla ilişkilidir. Piroliz biyokömür oksidasyonunda reaksiyon hızını belirleyen ana faktörlerden biri özgül yüzey alanıdır. Çalışmalar, özgül yüzey alanı ne kadar yüksekse, o kadar fazla reaktif bölgenin reaksiyona girdiğini ve sonuç olarak akım yoğunluğunun o kadar yüksek olduğunu

göstermektedir. Artan akım yoğunluğu (daha fazla yük transferi) daha fazla H₂ üretilmesi anlamına geldiğinden, özgül yüzey alanı incelenmesi gereken faktörlerden biridir. Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'den görüldüğü üzere, bazı çalışmalarda H₂ üretiminde kullanılan piroliz biyokömürünün özgül yüzey alanı, atık lastik piroliz kömürünün özgül yüzey alanından daha büyük olabilmektedir. Piroliz biyokömürünün özgül yüzey alanının daha büyük olmasının ana nedenlerinin başında nihai piroliz sıcaklığı gelmektedir. 550 °C'de piroliz sıcaklığında elde edilen biyokömürün özgül yüzey alanı 9 m²/g'iken piroliz sıcaklığının 850 °C'ye çıkarılması ile piroliz biyokömürünün özgül yüzey alanı da 450 m²/g'ye yükselmiştir (Chen vd., 2019). Dolayısıyla, ALPK'nün başlangıçtaki özgül yüzey alanı küçük olsa bile piroliz sıcaklığının artırılması ile özgül yüzey alanı önemli oranda iyileştirilebilir

Tablo 2.1. *Piroliz biyokömürünün özellikleri*

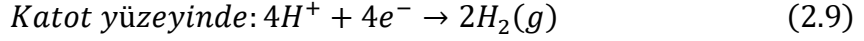
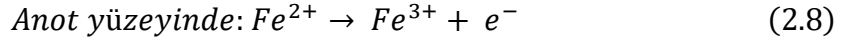
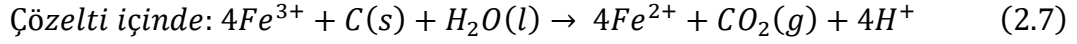
Piroliz sıcaklığı (°C)	C (% ağı.)	H (% ağı.)	N (% ağı.)	O ^a (% ağı.)	H/C atomik oran	O/C atomik oran	ÖYA ^b (m ² /g)	Kaynakça
800	85,88	b.t.	0,94	13	b.t.	0,153	1,2435	Ying vd. (2024)
800	85,96	b.t.	0,64	13,39	b.t.	0,156	1,2435	Gu vd. (2024)
550	b.t.	b.t.	b.t.	b.t.	0,35	0,096	9	Chen vd. (2019)
850	90,2	0,67	b.t.	8,7	0,09	0,073	450	Chen vd. (2019)
400	66,78	5,72	1,13	26,37	1,03	0,30	3,90	Liu vd. (2020a)
600	75,01	3,12	0,70	21,17	0,50	0,21	5,02	Liu vd. (2020a)
800	81,98	1,53	0,48	16,01	0,22	0,15	143,24	Liu vd. (2020a)
b.t., Belirtilmemiş								
^a , Farklılığa göre (100 – (C + H + N))								
^b , Özgül yüzey alanı								
ağı, Kütlece								

Çalışmalar, CO₂ veya buhar aktivasyon yöntemleri ile atık lastik piroliz kömürünün özgül yüzey alanını sırasıyla 414 m²/g (Lahijani, Mohammadi ve Mohamed, 2019) ve 1260 m²/g (Ogasawara, Kuroda ve Wakao, 1987) civarına kadar yükseltilebileceğini göstermektedir. Artan özgül yüzey alanı, daha düşük potansiyellerde daha yüksek akım yoğunluğuna izin verir, böylece daha az enerji tüketimi ile daha fazla H₂ üretilir. Bu nedenle elektrokimyasal oksidasyonda mümkün olduğunca yüksek özgül yüzey alanına sahip atık lastik piroliz kömürü kullanılmalıdır.

Tablo 2.2. Atık lastik piroliz kömürünün özellikleri

Piroliz sıcaklığı (°C)	C (% ağı.)	H (% ağı.)	N (% ağı.)	O ^a (% ağı.)	H/C atomik oran	O/C atomik oran	ÖYA ^b (m ² /g)	Kaynakça
800	82,5	0,8	0	12,7	0,01	0,154	b.t.	Zhou vd. (2019)
500	82,7	0,4	<0,1	14,6	0,005	0,177	69,5	Kyari, Cunliffe ve Williams (2005)
500	79,45	0,60	0,35	16,21	0,008	0,204	50,03	Wang vd. (2021a)
b.t.	b.t.	b.t.	b.t.	b.t.	b.t.	b.t.	40	López vd. (2009)
b.t.	b.t.	b.t.	b.t.	b.t.	b.t.	b.t.	120	López vd. (2009)
b.t.	b.t.	b.t.	b.t.	b.t.	b.t.	b.t.	95	Roy, Chaala ve Darmstadt (1999)
500	74,60	1,06	0,49	21,39	0,014	0,288	70,06	Seng-eiad vd. (2016)
500	88,81	0,57	0,48	b.t.	0,006	b.t.	44,72	Wang vd. (2019)
b.t., Belirtilmemiş								
^a , Farklılığa göre (100 – (C + H + N))								
^b , Özgül yüzey alanı								
ağı, Kütlege								

Piroliz biyokömür destekli su elektrolizi geleneksel su elektrolizine göre daha düşük potansiyellerde gerçekleşmesine rağmen, oksidasyon mekanizması oldukça yavaştır. Bununla birlikte, biyokömürün elektrokimyasal oksidasyonunu hızlandırmak için yenilikçi yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu tür bir yaklaşım, reaksiyon hızlandırıcı olarak işlev gören ve optimum koşullar altında hızlı reaksiyonlar sergileyen Fe²⁺/Fe³⁺ redoks araçlarının kullanılmasını içermektedir. Elektrolite, Fe²⁺/Fe³⁺ iyonlarının eklenmesi durumunda gerçekleşen oksidasyon mekanizması Denklem (2.7) – (2.9)’da gösterilmektedir.



Denklem (2.7)'de çözelti içerisinde gerçekleşen reaksiyonu temsil etmektedir. Görüldüğü üzere çözelti içerisinde serbest halde bulunan Fe^{3+} iyonu karbon ile reaksiyona girerek Fe^{2+} 'ya indirgenmektedir. Elektrota 0,77 V vs. RHE potansiyel uygulandığında ise Fe^{2+} , anot elektrot yüzeyinde Fe^{3+} 'ya oksidize olur (Denklem 2.8). $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ iyonları karbon ile reaksiyona girerek reaksiyon hızını artırmaktadır. Bu, 0,8 V kadar düşük potansiyellerde yüksek akım yoğunluğu (100 mA/cm² ve üzeri) elde edilmesini sağlamaktadır.

Biyokömür elektrokimyasal oksidasyon mekanizmasının göze çarpan bir kusuru, oksidasyon süresi uzadıkça reaksiyon hızındaki düşüştür. Ortam sıcaklığında $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ katkılı piroliz kömürünün elektrokimyasal oksidasyonunun başlangıcındaki akım yoğunluğu yüksek olsa da oksidasyon süresi arttıkça akım yoğunluğunda önemli bir düşüş meydana gelebilmektedir. Elektrokimyasal oksidasyon süresi uzadıkça kömür yüzeyinde oksit film oluştuğu ve oluşan oksit filmin reaktif bölgeleri sınırlayarak veya kaplayarak akım yoğunluğunda azalmaya neden olduğu ifade edilmektedir (Olukayode vd., 2022). Bu problemin üstesinden gelmek için kömür yüzeyinde oluşan oksit filmin giderilmesi veya oksit film oluşmasının engellenmesi gerektiği açıktır. Bazı araştırmacılar (Olukayode vd., 2022; Zhou vd., 2022; Huang vd., 2022), oksidize olmuş kömüre belirli sıcaklıklarda (80 – 160 °C) uygulanan hidrotermal işlemin, kömürün yüzeyindeki oksit tabakayı giderdiği ve akım yoğunluğunu yeniden yüksek seviyelere çıkardığını bildirmiştir. Bu durumda, uygulanacak hidrotermal işlemin atık lastik piroliz kömüründen yüksek verimde ve hızda H_2 üretimine olanak sağlayabileceği öngörülmektedir. Literatürdeki çalışmalar kapsamlı bir şekilde incelendiğinde, geliştirilecek bir model ile ALPK'nden hatırı sayılır oranda H_2 üretmenin mümkün olduğu anlaşılmaktadır (Amikam, Fridman-Bishop ve Gendel, 2020).

2.4. Tezin Bilimsel Önemi, Amacı ve Literatüre Katkısı

Fosil kaynakların sınırlı olması ve atmosfere salınan sera gazları nedeniyle küresel ısınmanın artması bu tezin temel motivasyonlarını oluşturmaktadır. Bu motivasyondan yola çıkarak döngüsel ekonomi içerisinde fosil kaynaklara olan bağımlılığı azaltacak bir

model geliştirme fikri üzerinde durulmuştur. Bu tezde, döngüsel ekonomi kapsamında, Eskişehir ilinde veya Türkiye genelinde kurulacak bir tesis ile atık araç lastiklerinden sürdürülebilir havacılık yakıtı (SHY) üretilmesi modellenmiştir. Bu modelde, atık lastikler önce pirolize tabi tutularak katı (ALPK), sıvı (ALPY) ve piroliz gazı (sentez gazı) ürünlerine ayrıştırılmaktadır. Atık lastik piroliz kömürü HDN, HDS ve HDA proseslerinde kullanılmak üzere hidrojen üretmek için (elektroliz yoluyla) kullanılırken, sıvı kısım (ALPY), SHY üretmek için filtreleme (istenmeyen katı partiküllerin veya kalıntıları giderilmesi işlemi), katalitik parçalama, alkilasyon ve hidro-işleme (HDN, HDS ve HDA) proseslerine tabi tutulmuştur. Bu rafineri prosesleri uygulandıktan sonra, ticari havacılıkta kullanılabilecek özelliklere sahip SHY üretilmektedir. Bu tezin yenilikçi yönü, hidroprosesleme sırasında kullanılan hidrojen gazının üretilme şeklidir. Hidro-işlem proseslerinde, atık lastik piroliz kömürünün elektrokimyasal oksidasyonu ile üretilen H_2 gazı kullanılmıştır. Bilindiği kadarıyla, literatürde elektroliz prosesi ile atık lastik piroliz kömüründen H_2 üretimi rapor edilmemiştir. Bu tez, önerdiği H_2 üretim modeli ile mevcut literatürdeki boşluğu doldurmayı ve literatüre yeni bir yön vermeyi amaçlamaktadır. Bu tezin öne çıkan bir diğer yönü ise Eskişehir ilinde veya Türkiye genelinde kurulacak merkezi tesislerle atık lastiklerden katma değeri yüksek sürdürülebilir havacılık yakıtı üretilbileceğini kanıtlamasıdır. Dolayısıyla bu tezin fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasına katkı sağlaması beklenmektedir. Sonuç olarak bu tez, önerdiği döngüsel ekonomi modeli ve yenilikçi hidrojen üretim modeli ile bu çalışma alanına ilgi duyan araştırmacılara ve kuruluşlara yol gösterme potansiyeline sahiptir.

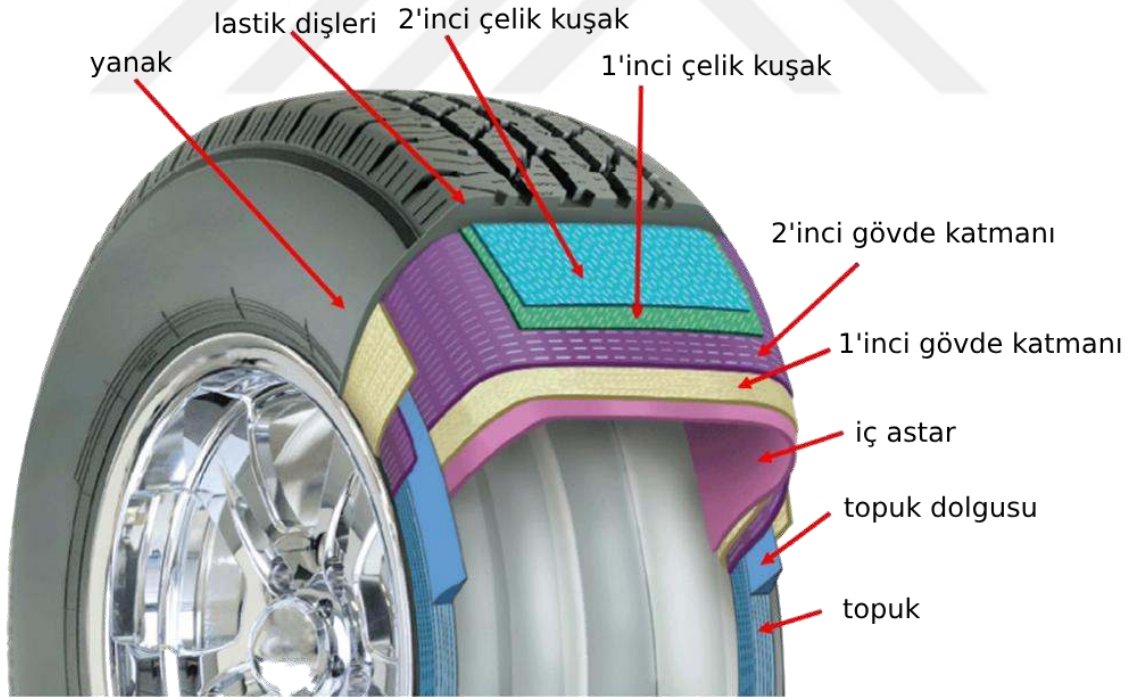
3. MATERYAL VE METOT

Bu bölüm dört alt bölümden oluşmaktadır. Bölüm 3.1'de atık lastiklerin piroliz sürecine ilişkin temel ön kabuller açıklanmaktadır. Bölüm 3.2'de, atık lastik piroliz kömürünün (ALPK) elektrokimyasal oksidasyonunu destekleyen temel kabuller ve bunlara ilişkin hesaplamalar verilmiştir. Bölüm 3.3'te atık lastik piroliz yağının (ALPY) sürdürülebilir havacılık yakıtına (SHY) dönüştürülmesine yönelik rafineri prosesleri ve bunlara ilişkin hesaplamalar sunulmuştur. Son olarak, Bölüm 3.4'te yakıt üretim maliyetlerini belirlemek için benimsenen tahminler verilmiştir.

3.1. Atık Lastikler ve Piroliz Prosesi

3.1.1. Araç lastiklerinin bileşimi

Araç lastikleri, doğal kauçuk, sentetik kauçuk, karbon siyahı, çelik tel ve katkı maddeleri dahil olmak üzere organik ve organik olmayan bileşiklerin bir karışımından oluşmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Araç lastiğinin kesiti (Valentini ve Pegoretti, 2022)

Organik bileşikler araç lastiklerinin kütlece %86,6'ini oluştururken, kalan %13,4'lik kısım organik olmayan çelik ve diğer katkı maddelerinden oluşmaktadır. Atık lastiklerin kütlece %86,6'ini oluşturan organik bileşiklerin katı, sıvı (yağ) ve gaz ürünlerine

ayrıştırıldığı kabul edilmiştir. Bu kabul aşağıda yer alan Denklem (3.1) ile gösterilmektedir. Bundan sonraki bölümlerde atık lastiklerin organik kültésinin belirlenmesinde Denklem (3.1)'den faydalanılacaktır.

Tablo 3.1. *Araba Lastiğinin Başlıca Bileşenleri (Laresgoiti vd., 2004; de Marco Rodriguez vd., 2001)*

Organik Bileşikler		İnorganik Bileşikler	
Kauçuk kesir (% ağı.)	Karbon siyahı kesir (% ağı.)	Çelik/tel (% ağı.)	Diğerleri (% ağı.)
58,8	27,8	9,6	3,8
Organik bileşiklerim toplamı %86,6		İnorganik bileşiklerin toplamı %13,4	
ağı, Kütlece			

$$Toplam organik bileşik = Atık lastiğın toplam kütlesi \times \frac{86,6}{100} \quad (3.1)$$

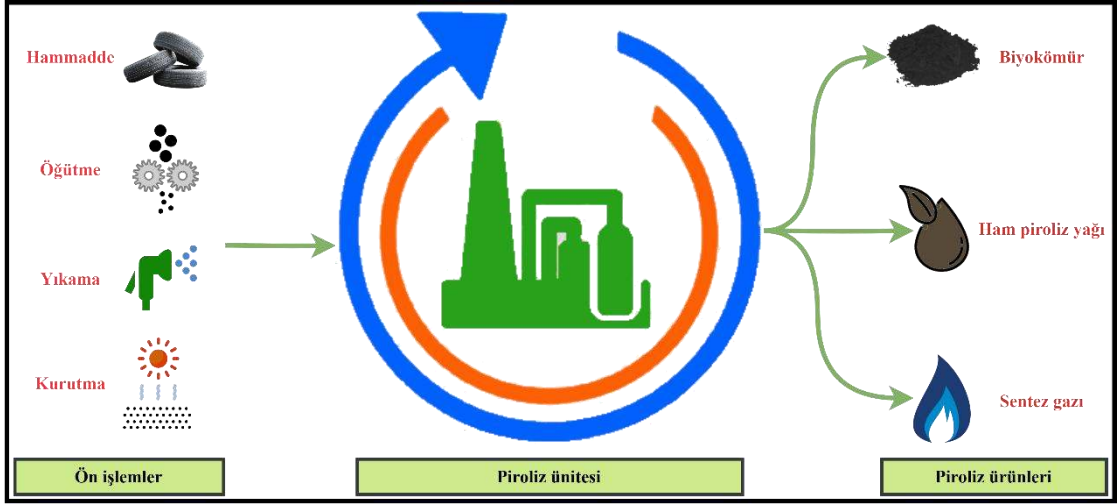
3.1.2. Atık lastiklerin pirolizi

Bu tez çalışmasının temel amaçlarından biri, atık lastiklerden mümkün olan en yüksek oranda ALPY üretmektir. Böylece, daha yüksek oranda SHY üretilebilir. Deneysel ve teorik çalışmalar, vakum pirolizi (yani, 50 kPa'nın altındaki proses basınçları) ve hızlı piroliz (yani, 400 ila 600 °C arasında değişen bir nihai proses sıcaklığı, 50 ila 100 °C/dk arasında bir ısıtma hızı ve 1 mm'den küçük partikül boyutu) koşulları altında daha yüksek ALPY ürün miktarı üretildiğini göstermektedir (İlkılıç ve Aydın, 2011; Martínez vd., 2013a; Li vd., 2016; Mikulski vd., 2021; Gunerhan, Altuntas ve Caliskan, 2024). Bu nedenle, bu bölümdeki hesaplamalar, belirtilen işlem koşullarını karşılayan atık lastiklerin vakum pirolizine ilişkin deneysel çalışmaların sonuçlarına dayanmaktadır.

Şekil 3.2'de piroliz prosesinin şematik gösterimi yer almaktadır. Çeşitli ön işlemlere tabi tutulan atık lastik hammaddesi sonrasında piroliz işlemi uygulanarak katı (biyokömür), piroliz yağı ve sentez gazı ürünlerine dönüştürülmektedir. Tablo 3.2'de atık lastiklerin katı, sıvı ve gaz ürünlerine dönüştürülmesinde vakum piroliz prosesinden faydalanan deneysel çalışmalara ait özet bilgiler yer almaktadır. Tablo 3.2'nin en alt satırında, bu deneysel çalışmalardan elde edilen ortalama değerler verilmiştir. Atık lastiklerin katı, sıvı ve gaz ürün miktarının belirlenmesinde Tablo 3.2'nin en alt satırında belirtilen ortalama değerler dikkate alınmıştır.

Tablo 3.2. Vakum piroliz yöntemi ile geri dönüştürülen atık lastiklerin ürün miktarları.

Sıcaklık (°C)	Basınç (kPa)	Katı miktarı (% ağı.)	Yağ miktarı (% ağı.)	Gaz/sentez gaz miktarı (% ağı.)	Lastik türü	Kaynakça
480	12	39,3	53,7	7,0	Kamyon	Pakdel, Pantea ve Roy (2001)
500	13	33,4	56,5	10,1	Kamyon	Pakdel, Pantea ve Roy (2001)
534	10	38,4	40,9	11,7	Kamyon	Pakdel, Pantea ve Roy (2001)
500	12	30,6	57,5	11,9	Otomobil	Pakdel, Pantea ve Roy (2001)
400	3,5-4,0	51,7	39,9	15,4	Otomobil	Zhang vd. (2008)
450	3,5-4,0	36,1	42,1	21,8	Otomobil	Zhang vd. (2008)
500	3,5-4,0	36,9	47,1	16,0	Otomobil	Zhang vd. (2008)
550	3,5-4,0	34,8	48,8	16,3	Otomobil	Zhang vd. (2008)
500	<10,3	26	61	13	b.t.	Mirmiran, Pakdel ve Roy (1992)
425	25	34,0	61,2	4,7	b.t.	Lewandowski vd. (2019)
500	25	34,2	60,5	5,9	b.t.	Lewandowski vd. (2019)
425	50	34,0	62,4	3,9	b.t.	Lewandowski vd. (2019)
500	50	34,5	62,2	4,1	b.t.	Lewandowski vd. (2019)
Vakum piroliz edilen atık lastiklerin ortalama ürün miktarları						
425 – 600	3,5 – 50	32,99±6,25	48,83±10,2	9,37±5,52		
b.t., Belirtilmemiş ağı, Kütlege						



Şekil 3.2. Piroliz prosesinin şematik gösterimi

Atık lastiklerin sıvı (ALPY), kömür (ALPK) ve gaz (sentez gazı) ürün miktarları sırasıyla ortalama $48,83 \pm 10,2$, $32,99 \pm 6,25$ ve $9,37 \pm 5,52$ olarak belirlenmiştir. Ancak, geniş standart sapma aralığı nedeniyle ALPY, ALPK ve sentez gazı ürünlerinin kütlece toplamı $91,19 \pm 13,17$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplama sürecini kolaylaştırmak için bu değer %100'e yuvarlanmıştır. Atık lastik vakum piroliz ürünlerinin toplamının %100'e eşit olması için Denklem (3.2) – (3.4)'de belirtilen optimizasyonlar yapılmıştır.

$$\text{Kalibre edilmiş yağ verimi} = \frac{48,83}{91,19} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\text{Kalibre edilmiş kömür verimi} = \frac{32,99}{91,19} \times 100 \quad (3.3)$$

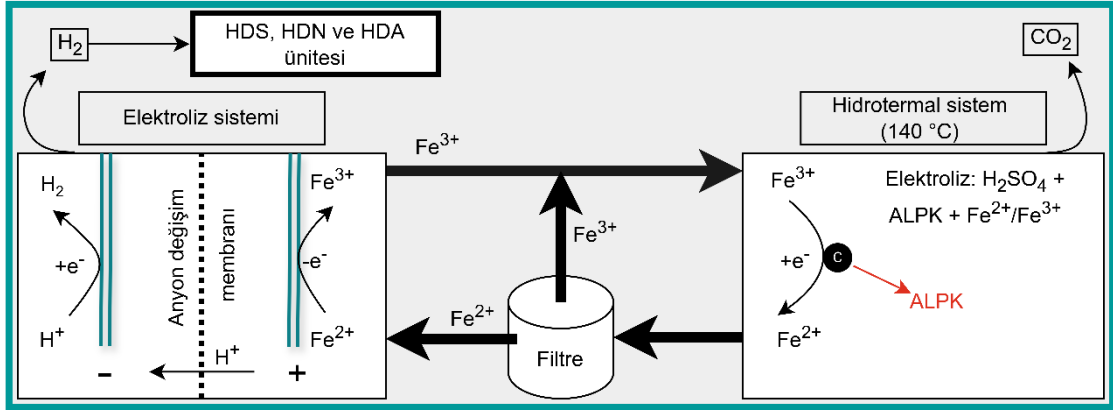
$$\text{Kalibre edilmiş gaz verimi} = \frac{9,37}{91,19} \times 100 \quad (3.4)$$

Denklem (3.2) – (3.4)'deki optimizasyonlardan sonra ALPY, ALPK ve gaz ürünlerinin miktarları sırasıyla kütlece $53,55 \pm 11,18$, $36,18 \pm 6,85$ ve $10,27 \pm 6,05$ olduğu kabul edilmiştir. Atık lastiklerin piroliz ürün miktarları hesaplanırken bu değerler dikkate alınmıştır.

3.2. Atık Lastik Piroliz Kömürünün Elektrokimyasal Oksidasyonu

Atık lastik piroliz yağına uygulanacak HDS, HDN ve HDA gibi işlemler için H_2 gazı tüketilmektedir. Bu H_2 gazı ALPK'nün elektrokimyasal oksidasyonu ile

üretilcektir. Bu bağlamda, ALPK'nün elektrokimyasal oksidasyonu için geliştirilen modelin şematik gösterimi Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3. Atık lastik piroliz kömürü için önerilen elektrokimyasal oksidasyonunun şematik gösterimi.

Bu tezde önerilen model ile daha önce H₂ üretimi yapılmadığı göz önünde bulundurularak belirli kabullerde bulunulmuştur. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, ALPK'nün elektrokimyasal oksidasyonu iki ayrı birimden oluşmaktadır: elektroliz sistemi ve hidrotermal sistem. Denklem (2.7)'de belirtilen reaksiyon hidrotermal sistem içinde gerçekleşirken, Denklem (2.8) ve (2.9)'da belirtilen reaksiyonlar sırasıyla elektroliz sisteminin anot ve katot bölümlerinde gerçekleşmektedir. Önerilen H₂ üretim modelinde, 1,2 V sabit potansiyel uygulandığında en az 80 mA/cm² yoğunluğa ulaşıldığı ve sistemin bu akım yoğunluğunda kararlı bir şekilde çalışmaya devam ettiği varsayılmaktadır (Huang vd., 2022). Ek olarak, 80 mA/cm² akım yoğunluğundaki H₂ üretim hızı ~76 mL/saat olarak kabul edilmiştir.

3.3. Rafineri Prosesleri

Ham ALPY, Tablo 3.3'de sunulan karbon zincir uzunluğu, kaynama noktası aralığı, yoğunluk, kinematik viskozite, ısıl değer ve bileşik içeriği gibi çeşitli özellikler bakımından ticari jet yakıtlarından farklılık göstermektedir. Bu bölümde, ham ALPY ve ticari jet yakıtlarının farklı olan özelliklerinin giderilmesi için uygulanacak rafineri prosesleri ile ilgili kabuller ve bu rafineri proseslerinin uygulanma sırası açıklanmıştır.

Ham ALPY kütlegece %1,2 – %2,2 oranında kalıntı/tortu içermektedir (Tablo 3.3). Bu kalıntıların jet yakıtı içerisinde olması istenmediğinden, ham ALPY rafine edilmeden önce filtre edilmiştir. Piroliz prosesinden sonra elde edilen ham ALPY'nın kütlegece ~%1,7'sinin ayrıştırıldığı ve kalan kesrin (%98,3) sürdürülebilir havacılık yakıtı üretmek

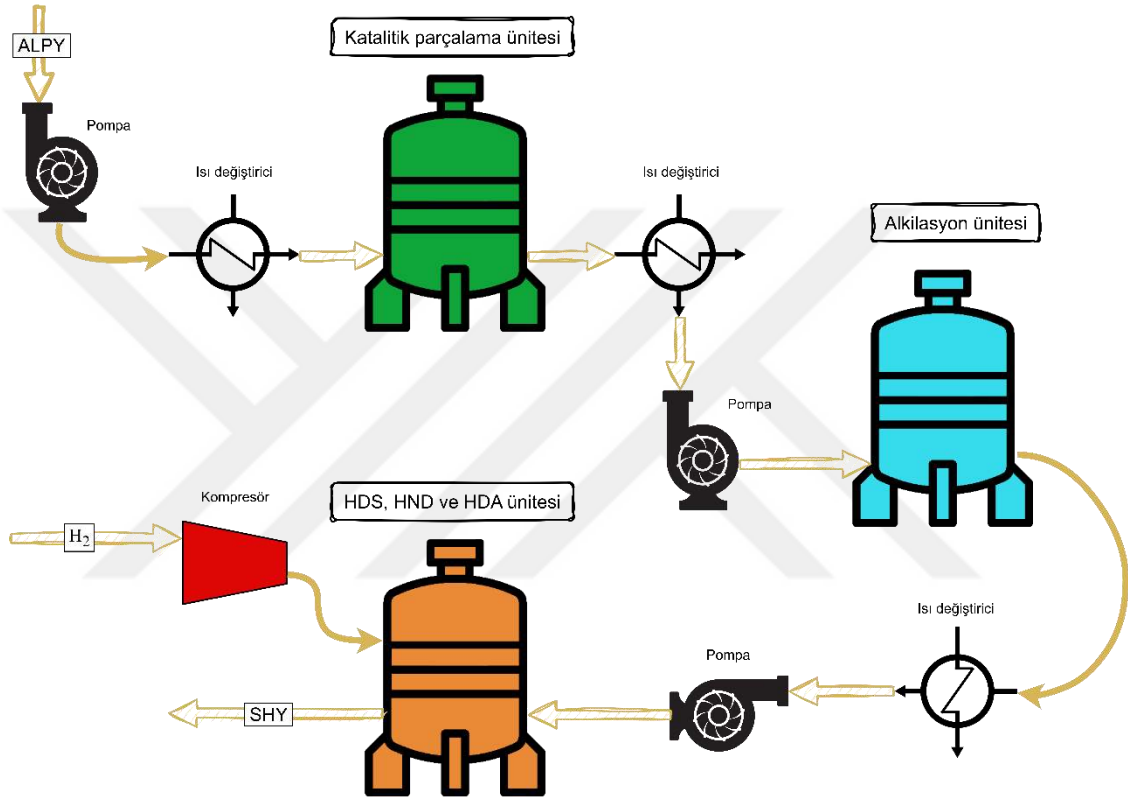
için rafine edildiği kabul edilmiştir. Filtre edilmiş ALPY'nın sürdürülebilir havacılık yakıtına rafine edilmesi için uygulanacak rafineri prosesleri Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Filtre edilmiş ALPY üç aşamadan oluşan rafineri prosesleri uygulanacaktır. Birinci aşamada katalitik parçalama işlemi, ikinci aşamada alkilasyon işlemi ve son olarak hidrodenitrojenasyon (HDN), hidrodesülfürizasyon (HDS) ve hidrodearomatizasyon (HDA gibi hidro-işleme prosesleri uygulanacaktır.

Tablo 3.3. Ham ALPY ve jet yakıtı özellikleri (Li vd., 2004; Lefebvre ve Ballal, 2010; Singh vd., 2018; Gunerhan, Altuntas ve Caliskan, 2023; Gunerhan, Altuntas ve Caliskan, 2024)

Özellik	Ham ALPY	Jet A-1
C zincir aralığı	C ₅ – C ₂₅	C ₈ – C ₁₆
Kaynama noktası aralığı (°C)	70 – 550	150 – 300
Yoğunluk @ 15 °C (kg/m ³)	856 – 923	775 – 840
Kinematik viskozite (mm ² /s)	0,93 – 3,94 (@20 °C)	<8 (@-20 °C)
Alt ısı değeri (LHV) (MJ/kg)	39,9 – 41,0	>42,8
Parlama noktası (°C)	~30	>38
Tortu miktarı (% ağı.)	1,2 – 2,2	b.t.
Aromatikler (% V.)	>50	25 (en fazla)
Alkanlar (% V.)	<10	~80
Diğer doymamış hidrokarbonlar (olefinler veya naftenikler) (% V.)	>30	Eser miktarda
b.t., Belirtilmemiş ağı., Kütlece V., hacim		

Katalitik parçalama ünitesinde, yüksek karbon zincir uzunluğuna sahip bileşiklerin, düşük karbon zincir uzunluğuna ve hafif C₂ - C₄ olefinlere dönüştüğü kabul edilmiştir (Wu vd., 2017). İkinci aşama olan alkilasyon ünitesinde, C₂ - C₄ olefinlerin (alkiller) düşük karbon zincirli bileşiklerle (benzen) reaksiyona (birleşerek) girdiği ve bu reaksiyon sonucunda C₈ - C₁₆ karbon zincir uzunluğuna sahip hidrokarbonlar oluştuğu kabul edilmiştir (Wu vd., 2025). Bu aşamadaki hidrokarbonlar, hidrojen bakımından doymamış oldukları için polisiklik aromatik hidrokarbonlar olarak sınıflandırılır (Alvarez vd., 2017) ve bu aromatik bileşiklerin ticari jet yakıtının içeriğinde en fazla %25 oranında bulunmasına izin verilmektedir (Lefebvre ve Ballal, 2010). Bu nedenle, alkilasyondan sonraki üçüncü ve son aşamada hidro-işlem prosesleri (HDS, HDN ve HDA) uygulanmıştır. HDS ve HDN işlemleri ile S ve N elementleri hidrojen ile reaksiyona

girerek sırasıyla hidrojen sülfür (H_2S) ve amonyak (NH_3) olarak giderildiği kabul edilirken, HDA işlemi ile doymamış hidrokarbonların $C_8 - C_{16}$ karbon zinciri aralığına sahip doymuş hidrokarbonlara (siklik alkanlar veya parafinler) dönüştüğü kabul edilmiştir (Li vd., 2018); Chen, Lin, Wang, 2020). Hidro-işlem proseslerinden sonra, ticari jet yakıtlarıyla karşılaştırılabilir özelliklere sahip SHY üretildiği kabul edilmiştir (Wang vd., 2015; Wu vd., 2017).



Şekil 3.4. Atık lastik piroliz yağına uygulanacak rafineri proseslerinin şematik gösterimi

3.3.1. Hidro-işlemler sırasındaki hidrojen tüketimi

Alternatif yakıtların rafine edilmesi sırasında önemli miktarda H_2 tüketilmektedir. Tüketilen H_2 miktarı, rafine edilecek ürünlerdeki istenmeyen elementlerin (S, N, O ve metaller gibi) ve doymamış hidrokarbonların (mono ve polisiklik aromatik) içeriğine göre belirlenmektedir (Howe vd., 2015; Rogachuk ve Okolie, 2024). Tablo 3.4’de ALPY’nın ve ticari jet yakıtlarının element oranları gösterilmektedir. ALPY, S ve N dahil olmak üzere çeşitli heteroatomlar içermektedir. Buna ek olarak, ALPY’nin H/C atomik oranı, doymamış hidrokarbon içeriğinden dolayı ticari jet yakıtlarından daha düşüktür. Hidro-işlem sırasında, H_2 ile reaksiyona giren heteroatomlar H_2S (HDS) ve NH_3 (HDN) olarak

uzaklaştırılırken, aromatik bileşikler hidrojen ilavesiyle (HDA) doymuş hidrokarbonlara dönüştürülmektedir (Djandja vd., 2021). HDS, HDN ve HDA işlemleri için gerekli H₂ miktarı Denklem (3.5) – (3.7) kullanılarak belirlenmiştir (Castañeda, Muñoz, ve Ancheyta, 2011).

$$\text{Hidrodenitrojenasyon} = \frac{5,2125 \text{ g (H}_2\text{)}}{1000 \text{ g (ALPY)}} \text{ kütlece \%1 N için} \quad (3.5)$$

$$\text{Hidrosülfürizasyon} = \frac{1,7375 \text{ g (H}_2\text{)}}{1000 \text{ g (ALPY)}} \text{ kütlece \%1 S için} \quad (3.6)$$

$$\text{Hidrodearomatizasyon} = \frac{0,469125 \text{ g (H}_2\text{)}}{1000 \text{ g (ALPY)}} \text{ kütlece \%1 aromatik için} \quad (3.7)$$

Denklem (3.5) – (3.7)'de gösterildiği gibi, 1000 g ALPY'ndan kütlece %1 S, %1 N ve %1 aromatiklerin giderilmesi için sırasıyla 5,2125 g, 1,7375 g ve 0,469125 g H₂ gereklidir. Bu değerler ilerleyen bölümde HDS, HDN, HDA proseslerinde tüketilecek H₂ miktarının belirlenmesinde kullanılacaktır.

Tablo 3.4. Ticari jet yakıtları ve ham ALPY'nın element oranı (Wang vd., 2015; Straka vd., 2023)

Yakıt türü	C (ağ. %)	H (ağ. %)	N (ağ. %)	S (ağ. %)	O (ağ. %)	H/C atomik oran
Jet A	86,4	13,5	b.t.	0,3	0,0044	1,91
Jet A-1	86,3	13,4	b.t.	0,04	b.t.	1,98
Ham ALPY	87,7	10,6	0,820	0,882	b.t.	1,44 ^b
b, Hesaplandı.						
b.t., Belirtilmemiş						

3.4. Tekno-Ekonomik Analiz

Bu tez, sürdürülebilir havacılık yakıtı üretimi için önerilen bir modelin teknik ve ekonomik uygulanabilirliğine ilişkin kapsamlı bir araştırma içermektedir. Modelin fizibilitesini değerlendirmek ve üretilen sürdürülebilir havacılık yakıtı için minimum yakıt satış fiyatını (MFSP) belirlemek amacıyla detaylı bir tekno-ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir. Tekno-ekonomik analiz, Eskişehir ili ve Türkiye'deki yıllık atık lastik toplama miktarlarındaki farklılıklar dikkate alınarak iki ayrı senaryo üzerinde gerçekleştirilmiştir.

3.4.1. Eskişehir ilinde toplanan atık lastiklerden sürdürülebilir havacılık yakıtı üretilmesinin tekno-ekonomik analizi

Tekno-ekonomik analiz için sermaye harcamalarını (CapEx), operasyonel harcamaları (OpEx), hidrojen üretim maliyetini oluşturan unsurlar belirlenmiştir. Ayrıca, maliyet hesaplamasında %30'luk bir gelir vergisi oranı varsayılmıştır (del Portal, 2010). Tüm finansal tahminler ABD doları (\$) cinsinden yapılmıştır.

Sermaye harcamaları ekipman maliyetlerini, kurulum maliyetlerini, direkt maliyetleri ve dolaylı maliyetleri içermektedir. Ekipman satın alma maliyetleri (COE) Tablo 3.5'te gösterilmektedir.

Tablo 3.5. Eskişehir ili için ekipman satın alma maliyet (COE) hesaplamaları (Liu vd., 2020b; Qiang ve Wang, 2020)

Ekipman	Adet	2017 maliyeti (\$)	2024 maliyeti (\$ (25000 kg/saat)	2024 maliyeti (\$ (225 kg/saat, toplam birim sayısı)
Kompresör (N ₂)	1	20000	28141	1091
Kompresör (H ₂)	1	39944	56203	2179
Piroliz reaktörü	2	50000	70352	10062
Buhar-sıvı ayırıştırıcı	3	1360	1914	571
Hidro-işlem reaktörü	2	85120	119768	17130
Hidrotermal işlem için sıvı pompası	1	1414	1990	420
Soğutucu	8	1200	1688	1700
Siklon	1	10000	14070	1771
Konveyör	1	28000	39397	4958
Karıştırıcı	1	19524	27471	2732
Pompa	3	1414	1990	1261
Isıtıcı	2	1120	1576	397
Yağ depolama ünitesi	2	6720	9455	1290
Gaz depolama ünitesi	1	1328	1869	127
Katı depolama ünitesi	1	893	1256	86
Toplam ekipman maliyeti				45775

Ekipman maliyetleri değerlendirilirken, kapasite değişikliklerinden kaynaklanan fiyat değişimlerinin üstesinden gelmek için Denklem (3.8)'deki onda altı faktör kuralı kullanılmıştır (Liu vd., 2020b).

$$Yeni\ maliyeti = Orijinal\ maliyet \left(\frac{Yeni\ ekipman\ kapasitesi}{Orijinal\ ekipman\ kapasitesi} \right)^x \quad (3.8)$$

Yeni ekipmanın kapasitesi 225 kg/saat olarak belirlenirken, yeni ekipmanın maliyetini hesaplamak için orijinal ekipmanın kapasitesi ve fiyatı baz alınmıştır. Burada x ölçeklendirme üssünü temsil etmektedir, bu değer her ekipman için farklılık gösterebilmekle birlikte, bu çalışmadaki x değerleri Liu vd. (2020b) tarafından yürütülen çalışmadan alınmıştır. Ekipman maliyetinin hesaplanmasında faydalanılan x değerleri Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6. Ekipman üssel katsayı faktörü (Liu vd., 2020b; Qiang ve Wang, 2020)

Ekipman	Üssel değer
Kompresör	0.69
Reaktör	0.50
Siklon	0.44
Konveyör	0.44
Ayırıcı	0.49
Pompa	0.33
Karıştırıcı	0.49
Isı değiştirici	0.44
Valf	0.30
Depo	0.57

Denklem (3.8)’in uygulanmasıyla elde edilen son ekipman maliyetleri, 2017 yılına karşılık gelmektedir (Tablo 3.5’te gösterildiği gibi). Söz konusu ekipmanların güncel (2024) maliyetlerini tespit etmek için Denklem (3.9)’daki hesaplamanın uygulanması gerekmektedir (Wang vd., 2022).

$$\text{Şimdiki zaman maliyeti} = \text{Baz zaman maliyeti} \left(\frac{\text{Şimdiki zaman endeksi}}{\text{Baz zaman endeksi}} \right) \quad (3.9)$$

Denklem (3.9)’daki şimdi zaman endeksi Kimya Mühendisliği Tesis Maliyet Endeksi (CEPCI) değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir (Rogachuk ve Okolie, 2024). Baz zaman yılı olarak 2017 alınırken şimdiki zaman olarak 2024 kabul edilmiştir. 2017 ve 2024 yıllarındaki kimya mühendisliği endeksi sırasıyla 567,5 ve 798,8 olarak belirlenmiştir (Wang vd., 2022). Ekipmanın şimdiki zaman maliyetinin belirlenmesinde bu değerlerden faydalanılmıştır.

Sermaye harcamalarını (CapEx) içeren diğer masraflar Tablo 3.7'de detaylandırılmıştır. Sermaye harcamaları sabit sermaye yatırımı (FCI) (doğrudan maliyet (DC) + dolaylı maliyet (IC)), başlangıç maliyeti (SUC), işletme maliyeti (WC) ve arazi maliyetinden (LC) gibi alt başlıkların toplamından meydana gelmektedir.

Tablo 3.7. Sermaye harcamaları tahminleri (del Portal, 2010; Xin vd., 2018; Qiang ve Wang, 2020; Straka vd., 2023)

Parametreler	Kabul	Maliyet (\$)
Tüm ekipmanların Satın Alma Maliyeti (COE) (1)	100% of COE	45775
Ekipman kurulumu (2)	40% of COE	18310
Kontrol ve enstrümantasyon maliyeti (3)	26% of COE	11901
Boru tesisatı ve elektrik sistemleri (4)	41% of COE	18768
Yapı ve hizmetler (5)	1% of COE	458
Direkt maliyet (DC) (6)	DC = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)	95211
Dolaylı maliyet (IC) (7)	IDC = 22% of DC	20946
Sabit sermaye yatırımı (FCI) (8)	(8) = DC + IC	116157
Başlangıç maliyeti (SUC) (9)	5% of FCI	5808
İşletme sermayesi (WC) (10)	50% of FCI	58079
Arazi Maliyeti (LC) (11)	10% of FCI	11616
CapEx	FCI (8) + SUC (9) + WC (10) + LC (11)	191660

Operasyonel harcamalara ilişkin tahminler Tablo 3.8'de sunulmaktadır. İşçilik maliyetleri, işletme maliyetleri, katalizör maliyetleri ve elektrik maliyetleri operasyonel harcamalar olarak değerlendirilmektedir. Hammadde maliyeti başlangıçta operasyonel maliyetlere dahil edilmemekle birlikte, hammadde maliyetindeki değişkenliğin etkisi sonraki bölümlerde ayrıca analiz edilmiştir (Bölüm 4.1.4.1). Diğer bir unsur da ALPK ve sentez gazı gibi piroliz yan ürünlerinden elde edilen gelirdir. Bu piroliz yan ürünlerinin satışından elde edilecek gelir başlangıçta hesaplamaaya dahil edilmemiştir, ancak ilerleyen bölümlerde ayrıca analiz edilmiştir (Bölüm 4.1.4.2). Operasyonel harcamalar hesaplanırken, tesisin yılda 8088 saat çalıştığı varsayılmıştır. Tesisin operasyonel faaliyetlerini yürütmek üzere 5 (beş) teknisyenin istihdam edildiği tahmin edilmektedir. Teknisyenlerin maaşları, Türkiye Cumhuriyeti'ndeki ortalama teknisyen maaşına göre hesaplanmıştır. Diğer hammadde tüketim miktarları, katalizörler, su ve elektrik gibi,

kapasiteye göz önüne alınarak (225 kg/saat) belirlenmiştir. H₂ üretim maliyeti ayrıca hesaplandığı için Tablo 3.8'deki hesaplama dahil edilmemiştir.

Tablo 3.8. Operasyonel harcama tahminleri (Rogachuk ve Okolie, 2024; Liu vd., 2020b; Wang vd., 2022; Qiang ve Wang, 2020)

Parametreler	Kabul	Maliyet (\$)
İşgücü maliyeti/işçilik (1)	1511 (\$/ay) (toplam 5 işçi)	90660
Süpervizyon (2)	İşçilik maliyetinin %25'i	22665
Direkt genel gider (3)	İşçilik + süpervizyon maliyetinin %50'si	56663
Genel giderler (4)	İşçilik + süpervizyon + direkt genel gider maliyetinin %50'si	84994
Sigorta ve vergiler (5)	FCI'nın %1'i	1162
Bakım işçiliği ve malzemeleri (6)	FCI'nın %3'ü	3485
Ek giderler (örn. pazarlama, lojistik, operasyon hizmetleri, vb.) (7)	FCI'nın %1'i	1162
Laboratuvar maliyeti (8)	İşçilik maliyetinin %1'i	907
İşletme sermayesinin finansmanı (9)	WC'nin %1'i	581
İşgücü Yüğü (10)	Toplam maaşların %16'sı	14506
Sabit işletme maliyeti (FOC) (11)	(11) = (1) + (2) + (3) ... + (10)	276782
Soğutma suyu (12)	1,544 \$/m ³	40686
Elektrik (13)	0,11794069 \$/kWh	46592
Toplam kullanım maliyeti (14)	(14) = (12) + (13)	87278
Katalitik parçalama katalizörü (HZSM-5) (15)	336 \$/kg (36,5 kg/yıl)	12264
Alkilasyon katalizörü ([bmim]Cl-2AlCl ₄) (16)	495 \$/kg (36,5 kg/yıl)	18068
Hidro-işlem katalizörü (Pd/AC) (17)	4144 \$/kg (61,636 kg/yıl)	255420
Toplam hammadde maliyeti (18)	(18) = (15) + (16) + (17)	285751
Değişken işletme maliyetleri (VOC) (19)	(19) = (14) + (18)	373029
OpEx (20)	(20) = (11) + (19)	649811

Hidrojen üretim maliyetlerine ilişkin tahminler Tablo 3.9'da sunulmaktadır. Hidrojen üretim maliyeti belirlenirken, bir proton değişim membranı (PEM) elektrolizör maliyetinin yanı sıra deiyonize su, Demir (III) klorür (FeCl₃), sülfürik asit (H₂SO₄) ve elektrokimyasal oksidasyon sırasında tüketilen elektrik maliyetleri göz önünde bulundurulmuştur. Birim maliyetleri elde etmek için literatür (Jang vd., 2022) ve ulusal

veya uluslararası tedarikçilerden alınan fiyatlar dikkate alınmıştır. Tedarikçi verilerine göre, bir PEM elektroliz hücresi dakikada ortalama 37 mL H₂ üretebilmektedir. Bir PEM elektroliz hücresinin ortalama ömrünün 40.000 saat olduğu ve bu süre zarfında yaklaşık 8 kg (7990,7 g) H₂ ürettiği varsayılmaktadır (Nguyen vd., 2019). Sonuç olarak, 8 kg H₂ üretimi sırasında tüketilen deiyonize su, FeCl₃, sülfürik asit ve elektrik de hesaba katılarak toplam maliyet belirlenmiştir.

Tablo 3.9. Hidrojen üretimi maliyet tahmini

Ürün	Fiyat	Tüketim/üretim	Toplam maliyet (\$)
Deiyonize su	0,01 \$/L	63 L	0,63
FeCl ₃ (Fe ³⁺)	0,53 \$/L	2,057 L	1,09
ALPK	-	29,41 kg	-
Sülfürik asit (H ₂ SO ₄)	0,09353 \$/L	7,062 L	0,66
Elektrik	0,11794069 \$/kWh	255 kWh (2,87 kWh/Nm ³)	30,075
PEM elektroliz ünitesi	26 \$/ünite	88,85 Nm ³ H ₂ (üretim)	26
Toplam maliyet (88,85 Nm ³ H ₂ veya 8 kg H ₂ için)			58,455 (7,307/kg)

3.4.2. Türkiye geneli toplanan atık lastiklerden sürdürülebilir havacılık yakıtı üretilmesinin tekno-ekonomik analizi

Türkiye genelinde kurulacak merkezi bir tesisin üreteceği yakıtın maliyetini analiz etmek ve fizibilitesini değerlendirmek için bir tekno-ekonomik analiz yapılmıştır. Yakıtın minimum satış fiyatı (MFSP) belirlenirken, sermaye harcamaları (CapEx), operasyonel harcamalar (OpEx), hidrojen üretim maliyeti ve %30 gelir vergisi (del Portal, 2010) dikkate alınmıştır. Tüm maliyet hesaplamaları ABD doları (\$) cinsinden yapılmıştır.

Hammadde işleme kapasitesi 25000 kg/saat olan bir tesisin ekipman satın alma maliyetleri (COE) Tablo 3.10'da verilmiştir. Tesis için gerekli ekipmanların satın alma maliyeti 597.915 \$ olarak hesaplanmıştır. Ekipman maliyetleri literatür derlenerek belirlenmiştir (Qiang ve Wang, 2020; Liu vd., 2020b). Orijinal ekipman maliyetleri 2017 yılına ait olmakla birlikte, güncel ekipman maliyetlerini hesaplamak için Denklem (3.9)'da belirtilen şimdi zaman endeksinden faydalanılmıştır (Rogachuk ve Okolie, 2024; Wang vd., 2022).

Ekipman satın alma maliyetinden yola çıkarak hesaplanan sermaye harcamaları (CapEx) Tablo 3.11’de verilmiştir. Sermaye harcamaları doğrudan maliyet (DC), dolaylı maliyet (IC), başlangıç maliyeti (SUC), işletme maliyeti (WC) ve arazi maliyetinden (LC) oluşmaktadır. Türkiye genelindeki atık lastiklerin dönüşümü için kurulacak merkezi bir tesisin sermaye harcamaları (CapEx) için 2.476.133 \$ gerektiği tahmin edilmiştir.

Tablo 3.10. Türkiye geneli için ekipman satın alma maliyet (COE) hesaplamaları (Liu vd., 2020b; Qiang ve Wang, 2020)

Ekipman	Adet	2017 Maliyeti (\$)	2024 Maliyeti (\$) (25000 kg/saat)	2024 Maliyeti x Birim sayısı (\$)
Kompresör (N ₂)	1	20000	28141	28141
Kompresör (H ₂)	1	39944	56203	56203
Piroliz reaktörü	2	50000	70352	140704
Buhar-sıvı ayırıştırıcı	3	1360	1914	5742
Hidro-işlem reaktörü	2	85120	119768	239536
Hidrotermal işlem için sıvı pompası	1	1414	1990	1990
Soğutucu	8	1200	1688	13504
Siklon	1	10000	14070	14070
Konveyör	1	28000	39397	39397
Karıştırıcı	1	19524	27471	27471
Pompa	3	1414	1990	5970
Isıtıcı	2	1120	1576	3152
Yağ depolama ünitesi	2	6720	9455	18910
Gaz depolama ünitesi	1	1328	1869	1869
Katı depolama ünitesi	1	893	1256	1256
Toplam ekipman maliyeti				597915

Türkiye genelindeki atık lastiklerin geri dönüştürülmesi için kurulacak SHY üretim tesisinin operasyonel harcama (OpEx) tahminleri Tablo 3.12’de sunulmuştur. Atık lastik hammadde fiyatı 0 \$/kg olarak varsayılmıştır. Ancak, değişken hammadde maliyetinin etkisi sonraki bölümlerde detaylı bir şekilde analiz edilmiştir (Bölüm 4.2.4.1). ALPK ve sentez gazı gibi piroliz yan ürünlerinin satışından elde edilen gelirler operasyonel harcamalara dahil edilmemiştir. Piroliz yan ürünlerinin satışından elde edilen gelirlerin etkisi sonraki bölümlerde ayrıca analiz edilmiştir (Bölüm 4.2.4.2). H₂ üretim maliyeti ayrıca hesaplandığı için Tablo 3.12’deki operasyonel harcamalara dahil edilmemiştir.

Tesisi işletmek için gerekli personel sayısı Rogachuk ve Okolie (2024) tarafından yürütülen çalışmaya dayanmaktadır. Rogachuk ve Okolie (2024) tarafından yürütülen çalışmada şu hesaplama yapılmıştır: saatte 25 ton kapasiteli ve yılda 8.000 saat çalışan bir tesis, optimum çalışma koşullarını sürdürmek için yaklaşık 45 personel gerektirmektedir. Bu tezde kurulacak tesisin saatte 25 ton hammadde işleme kapasitesine ve yıllık 8088 saat çalışma süresine sahip olduğu göz önüne alındığında, tesisin toplam 45 kişilik bir işgücüne ihtiyaç duyacağı tahmin edilmektedir. Teknisyenlerin maaşları, Türkiye Cumhuriyeti'ndeki ortalama teknisyen maaşına göre hesaplanmıştır. Diğer hammadde tüketim miktarları, katalizörler, su ve elektrik gibi, kapasiteye göz önüne alınarak (25000 kg/saat) belirlenmiştir. Hidrojen maliyeti hariç operasyonel harcama toplamı 44.012.608 \$ olarak tahmin edilmektedir.

Tablo 3.11. Türkiye geneli tesis için sermaye harcamaları tahminleri (del Portal, 2010; Xin vd., 2018; Qiang ve Wang, 2020; Straka vd., 2023)

Parametreler	Kabul	Maliyet (\$)
Tüm ekipmanların Satın Alma Maliyeti (COE) (1)	100% of COE	597.915
Ekipman kurulumu (2)	40% of COE	239.166
Kontrol ve enstrümantasyon maliyeti (3)	26% of COE	155.458
Boru tesisatı ve elektrik sistemleri (4)	41% of COE	245.145
Yapı ve hizmetler (5)	1% of COE	5.979
Direkt maliyet (DC) (6)	DC = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)	1.243.663
Dolaylı maliyet (IC) (7)	IDC = 22% of DC	273.606
Sabit sermaye yatırımı (FCI) (8)	(8) = DC + IC	1.517.269
Başlangıç maliyeti (SUC) (9)	5% of FCI	75.863
İşletme sermayesi (WC) (10)	50% of FCI	758.635
Arazi maliyeti (LC) (11)	10% of FCI	124.366
CapEx	FCI (8) + SUC (9) + WC (10) + LC (11)	2.476.133

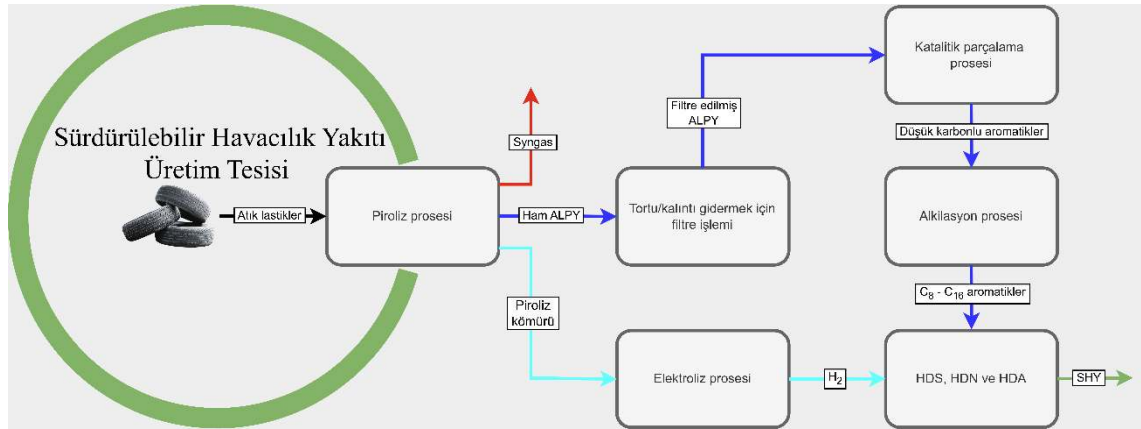
Birim yakıt başına hidrojen maliyeti hem Türkiye'de kurulacak tesis hem de Eskişehir ilinde kurulacak tesis için eşdeğerdir. Bu varsayımdan hareketle Türkiye genelinde kurulacak tesis için yeni bir H₂ üretim maliyet hesaplaması yapılmamıştır. Türkiye genelindeki tesis için H₂ üretim maliyetlerinin hesaplanmasında Tablo 3.9'da sunulan tahminler esas alınmıştır.

Tablo 3.12. Türkiye geneli tesis için operasyonel harcama tahminleri (Rogachuk ve Okolie, 2024; Liu vd., 2020b; Wang vd., 2022; Qiang ve Wang, 2020)

Parametreler	Kabul	Maliyet (\$)
İşgücü/işçilik maliyeti (1)	1511 (\$/ay) (toplam 45 işçi)	815.940
Süpervizyon (2)	İşçilik maliyetinin %25'i	203.985
Direkt genel gider (3)	İşçilik + süpervizyon maliyetinin %50'si	509.963
Genel giderler (4)	İşçilik + süpervizyon + direkt genel gider maliyetinin %50'si	764.944
Sigorta ve vergiler (5)	FCI'nın %1'i	24.761
Bakım işçiliği ve malzemeleri (6)	FCI'nın %3'ü	74.284
Ek giderler (örn. pazarlama, lojistik, operasyon hizmetleri, vb.) (7)	FCI'nın %1'i	24.761
Laboratuvar maliyeti (8)	İşçilik maliyetinin %1'i	8.159
İşletme sermayesinin finansmanı (9)	WC'nin %1'i	7.586
İşgücü Yüğü (10)	Toplam maaşların %16'sı	130.550
Sabit işletme maliyeti (FOC) (11)	(11) = (1) + (2) + (3) ...+ (10)	2.564.933
Soğutma suyu (12)	1,544 \$/m ³	4.520.667
Elektrik (13)	0,11794069 \$/kWh	5.176.889
Toplam kullanım maliyeti (14)	(14) = (12) + (13)	9.697.556
Katalitik parçalama katalizörü (HZSM-5) (15)	336 \$/kg (4055,556 kg/yıl)	1.362.667
Alkilasyon katalizörü ([bmim]Cl-2AlCl ₄) (16)	495 \$/kg (4055,556 kg/yıl)	2.007.500
Hidro-işlem katalizörü (Pd/AC) (17)	4144 \$/kg (6848,444 kg/yıl)	28.379.952
Toplam hammadde maliyeti (18)	(18) = (15) + (16) + (17)	31.750.119
Değişken işletme maliyetleri (VOC) (19)	(19) = (14) + (18)	41.447.675
OpEx (20)	(20) = (11) + (19)	44.012.608

4. SONUÇLAR

Bu bölümde, MATERİYAL ve METOT bölümünde (Bölüm 3) verilen denklemler ve kabuller üzerinden yapılan hesaplamalara ait sonuçlar sunulmuştur. Bu sonuçlar, Eskişehir ilinde ve Türkiye genelinde kurulacak tesislerinin yıllık SHY üretim kapasitesinin belirlenmesine katkı sağlamıştır. Bu tezde önerilen modelin okuyucu tarafından daha anlaşılır olması için gerçekleştirilecek tüm süreçler Şekil 4.1'de özetlenmiştir. Sonraki bölümlerde bu süreçlere ait sonuçlar paylaşılmıştır.



Şekil 4.1. Atık lastikten SHY üretim aşamalarının şematik gösterimi

4.1. Eskişehir İlinde Toplanan Atık Lastiklerin Yakıt Üretim Potansiyeli

4.1.1. Eskişehir ili atık lastik piroliz ürünlerinin miktarı

Atık lastik piroliz ürün miktarları (ALPY, ALPK ve sentez gazı) hem kütleyle oranla yüzde (8) hem de gram cinsinden Tablo 4.1'de gösterilmektedir. Ham ALPY, ALPK ve piroliz gaz miktarları Denklem (3.1) – (3.4)'de verilen hesaplamalardan faydalanılarak belirlenmiştir. Piroliz işleminin ardından, lastiğin kütlelerinin %86,6'sını oluşturan organik bileşikler ALPY, piroliz gazı ve ALPK ürünlerine dönüştürülmüştür. ALPY, piroliz gazı ve ALPK ürünleri toplam lastik kütlelerinin %46,38, %8,89 ve %31,33'üne karşılık gelmektedir. Bu durumda, 1000 g lastikten 463,8 g ham ALPY elde edilmiştir. Ham ALPY'nin yaklaşık %1,7'sini oluşturan kalıntılar ve tortular filtre edildiği için, rafine edilecek ALPY atık lastik kütlelerinin %45,59'una (455,9) karşılık gelmektedir. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü tarafından yayınlanan rapora göre 2020 yılında Eskişehir'de toplanan atık lastik miktarı 1817 tondur (Eskişehir İli 2022 Yılı Çevre Durum Raporu, 2023). Bu durumda yaklaşık 828,37 ton/yıl filtre edilmiş ALPY rafine

edilmek için kullanılacaktır. Yıllık ALPY üretim miktarı ilerleyen bölümlerde toplam SHY üretiminin hesaplanmasında kullanılacaktır.

Tablo 4.1. Eskişehir ili atık lastik piroliz ürün miktarları

Parametre	Atık lastik toplam kütesine oranı (%) ağ.)	1000 g atık lastiğe karşılık gelen miktar (g)	Eskişehir için ürün miktarı (ton/yıl)
Atık lastik toplam kütesi	100	1000	1817
Toplam lastik kütesindeki organik bileşikler	86,6	866	1573,5
Ham ALPY miktarı	46,38	463,8	842,7
Filtre edilmiş ALPY miktarı	45,59	455,9	828,4
Piroliz kömür (ALPK) miktarı	31,33	313,3	569,3
Piroliz gaz (syngas) miktarı	8,89	88,9	161,5
g, Gram			

4.1.2. Hidrojen tüketim miktarı

Rafineri aşamasında, ALPY ve H₂ gazı katalizör yardımıyla reaksiyona girerek yeni reaksiyon ürünleri oluşturmaktadır. Bu reaksiyon ürünlerinin miktarı, hidro-işlem prosesinde tüketilecek H₂ miktarını hesaplamak için kullanılmıştır. Hidro-işlem prosesinde tüketilecek H₂ miktarı Denklem (3.5) – (3.7)'de verilen formüllerden yola çıkarak hesaplanmıştır. Denklem (3.5) ve (3.6), HDS (sülfür giderimi) ve HDN (nitrojen giderimi) işlemleri için tüketilecek H₂ miktarını verirken, Denklem (3.7) aromatik hidrokarbonları (doymamış C₈ – C₁₆ bileşikler) doymuş C₈ – C₁₆ hidrokarbonlara dönüştürmek için ne kadar H₂ gerektiğini açıklamaktadır.

Hidro-işlem aşamasında tüketilecek H₂ miktarını hesaplamak için iki senaryo belirlenmiştir. İlk senaryo, Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM) D7566'da belirtilen sentetik jet yakıtlarının sertifikasyonuna dayanırken, ikinci senaryo ASTM D1655'te belirtilen fosil kökenli ticari jet yakıtlarının sertifikasyonuna dayanmaktadır.

İlk senaryoda (ASTM D7566), hesaplamalar ALPY'nın içerisindeki tüm N, S ve aromatiklerin hidro-işlemle giderildiği duruma dayanmaktadır. İkinci senaryoda (ASTM D1655), hesaplamalar ALPY'nın içerisindeki tüm N ve S'nin giderildiği, ancak aromatiklerin %75'inin giderildiği duruma dayanmaktadır. ASTM D1655 ticari jet yakıtlarının kütlece %25'e kadar aromatik hidrokarbon içermesine izin vermektedir. Bu nedenle, hidro-işlemler sırasında tüketilen H₂ miktarı ASTM spesifikasyonlarında

belirtilen limitlere göre hesaplanmıştır. ASTM D1655 ve ASTM D7566 senaryolarına göre yapılan hesaplamalar sonucunda, 1000 g rafine edilmiş ALPY'nı rafine etmek için sırasıyla ~52,72 g ve ~40,99 g H₂ gerektiği hesaplanmıştır (Tablo 4.2). Ayrıca, 828,37 ton filtre edilmiş ALPY'nı ASTM D1655 ve ASTM D7566 senaryolarına göre rafine etmek için 33,955 ton ila 43,672 ton aralığında H₂ tüketileceği belirlenmiştir.

Tablo 4.2. ASTM D7566 ve D1655 senaryolarına göre hidro-işlem aşamasındaki hidrojen tüketim miktarı

	ASTM D7566 senaryosu (%100 aromatik doygunluk)	ASTM D1655 senaryosu (%75 aromatik doygunluk)
N gidermek için H ₂ tüketimi (g)	4,27524	4,27524
S gidermek için H ₂ tüketimi (g)	1,532475	1,532475
Aromatik doygunluk için H ₂ tüketimi (g)	46,9125	35,184375
1000 g ALPY'nın hidro-işlemi için toplam H ₂ tüketimi (g)	~52,72	~40,99
828,37 ton filtre edilmiş ALPY'nın hidro-işlemi için toplam H ₂ tüketimi (ton)	43,672	33,955

Bu tezde yapılan hesaplamaların doğruluğunu teyit etmek için literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmaları gerekmektedir. Bu amaçla, hidro-işlem sırasında tüketilen H₂ miktarı deneysel çalışmalarla karşılaştırıldı ve tezde elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Yakın zamanda yürütülen deneysel bir çalışmada (Straka vd., 2023), ALPY'nın rafine edilmesi için tüketilen H₂ miktarı rapor edilmiştir. 1000 g ALPY'nın hidrodenitrojenasyonu ve hidrosülfürizasyonu için toplamda 2,4 g H₂ tüketildiği bildirilirken, doymamış aromatiklerin hidrodearomatizasyonu için 21,2 g H₂ tüketildiği bildirilmiştir. Aromatiklerin hidrodearomatizasyonu için tüketilen H₂ miktarının bu tezde hesaplanan miktardan (40,99 – 52,72 g) daha az olduğu bildirilmiştir. Ancak, aynı çalışmada, rafine edilmiş ALPY'nın içeriğinde kütlece yaklaşık %35 oranında aromatik hidrokarbon bileşikler bulunmaktadır. Ek olarak, hidrodearomatizasyon öncesinde ham ALPY'nın %12'den fazla doymuş hidrokarbon içerdiği bildirilmiştir. Özetle, ham ALPY'nın doymamış hidrokarbonların %53'ü doymuş hidrokarbonlara dönüşürken, geri kalan %47'si reaksiyona girmeden kalmıştır. Toplam kütleye göre hidrodearomatizasyon için tüketilen H₂ miktarı dikkate alındığında, doymamış hidrokarbonların hidrodearomatizasyonu için 40 g'dan fazla H₂ tüketilebileceği belirlenmiştir. Benzer

sonuçlar farklı araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir. Doymamış hidrokarbonların hidrojenasyonu ile ilgili olarak, hidro-işlem sırasında her 1000 g yaę için yaklaşık 40 g H₂ tüketiildiği bildirilmiştir (Wildschut vd., 2009; Zheng, Chang ve Fu, 2015). Bu tezde, alkilasyon sonrası ALPY'nın %100'ünün aromatik bileşiklerden oluştuğunu kabul edildiği için H₂ tüketiminin deneysel çalışmadan daha yüksek olması kuvvetle muhtemeldir. Mevcut literatür de bu durumu desteklemektedir. Çeřitli çalışmalardan elde edilen deneysel veriler, alkilasyon işleminin ardından biyoyağın aromatik içeriğinin %99'a kadar ulaşabileceğini göstermiştir (Wang vd., 2015; Wu vd., 2017). Buna göre, ALPY rafineri süreçlerinin oldukça verimli olması muhtemeldir. Araştırmalar, hidro-işlem sırasında tüketilen H₂ miktarının teorik ve deneysel hesaplamalar arasında %15 oranında değişebileceğini göstermektedir (Castańeda, Muńoz ve Ancheyta, 2011). Dolayısıyla, bu çalışmada hesaplanan H₂ tüketim miktarlarının makul bir aralıktada olduğu sonucuna varılabilir.

Deneysel alışmalar haricinde mol hesaplamaları da HDA sırasında gereken H₂ miktarını belirlemek için kullanılabilir. Mol hesabında dikkat edilmesi gereken unsur yağın H ve C elementlerin atomik oranıdır. Ticari jet yakıtlarının H/C atomik oranı 1,90 – 2,00 aralığında değişkenlik gösterirken ALPY'nın 1,44 olarak hesaplanmıştır (Tablo 3.4). HDA ile ALPY'nın (1000 g için) H/C atomik oranı 1,90 – 2,00 aralığında yükseltmek için yaklaşık 34,1 – 41,7 g H₂ gerektiği hesaplanmıştır. Bu tezde önerilen model ile, doymamış aromatiklerin hidrodearomatizasyonu için 35,18 – 46,91 g H₂ gerektiği göz önüne alındığında, molar hesaplamasının bu çalışmada sunulan sonuçlarla tutarlı olduğu anlaşılmaktadır. Özet olarak, ALPY'dan SHY üretmek için gerekli H₂ miktarı hem deneysel verilerle hem de molar hesaplamalarla tutarlıdır. Dolayısıyla, bu tezde hesaplanan H₂ tüketim miktarı kabul edilebilir bir seviyededir.

SHY üretiminde bir diğer önemli faktör, ALPY'nın hidro-işlenmesinde kullanılan H₂'nin üretim hızıdır. Daha önce belirtildiği gibi, 1000 g ALPY'nın rafine edilmesi sürecindeki H₂ tüketimi 40,99 g ile 52,72 g arasında değişmektedir. ALPK'nün elektrokimyasal oksidasyonu sırasında 76 mL/saat H₂ üretildiği göz önüne alındığında, 0 °C sıcaklık ve 1 atm basınç koşullarında bir elektroliz hcreti ile saatlik H₂ üretim hızı yaklaşık 0,00683 g/saat olarak hesaplanmıştır. Günlük ve yıllık H₂ üretim hızı sırasıyla 0,16392 g H₂/gün ve 59,831 g H₂/yıl olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, bir elektroliz hcreti tarafından yıllık üretilen H₂ ile rafine edilebilecek ALPY yaklaşık 1135 g ile 1460 g arasındadır. ALPK elektrokimyasal oksidasyonunun, su elektrolizine (teorik olarak 1,23

V vs. RHE ve üzeri) kıyasla daha düşük hücre voltajlarında (1,2 V vs. RHE) gerçekleşmektedir. Bu modelin amacı, düşük enerji tüketimi ile H₂ üretmektedir. H₂ üretimi için gereken elektrik tüketimi, önerilen modelde yaklaşık 2,87 kWh/Nm³ H₂ iken (Huang vd., 2022), geleneksel su elektrolizinde ortalama tüketim 4,5 – 5 kWh/Nm³ H₂'dir (El-Shafie, 2023). Bu durum, önerilen modelin daha az elektrikle daha fazla H₂ üretme yeteneği açısından belirgin bir avantaj sunduğunu göstermektedir. Ancak, belirli koşullar altında hücre voltajının, oksijen evrim reaksiyonunun baskın süreç haline geldiği bir seviyeye çıkarılabileceği unutulmamalıdır. Sonuç olarak, H₂ üretim hızı iyileştirilebilir, ancak bu durum enerji tüketiminde önemli artışa neden olacaktır. ALPK'nün elektrokimyasal oksidasyonunda bir elektroliz hücresinin H₂ üretim hızının sınırlı olduğu kabul edilmektedir; ancak, bu teknoloji hala gelişme aşamasında olduğunu için ilerleyen süreçte H₂ üretim hızında artış olabileceği öngörülmektedir. Özellikle, daha reaktif elektrokatalizörlerin geliştirilmesi ile karbon-destekli su elektrolizinin H₂ üretim hızı artırılabilir.

4.1.3. Toplam sürdürülebilir havacılık yakıt miktarı

Bu tezde, önerilen model ile atık lastiklerden üretilen SHY miktarı Tablo 4.3'de verilmiştir. Daha önce belirtildiği gibi 1817 ton/yıl atık lastikten yılda yaklaşık olarak 828,37 ton/yıl filtre edilmiş ALPY (rafine edilecek kütle) üretilmektedir. Filtre edilmiş ALPY'na hidrodearomatizasyon, hidrogenitrojenasyon ve hidrosülfürizasyon işlemleri uygulanmış ve bu işlemler sırasında meydana gelen reaksiyonlar sonucunda, ALPY'na H₂ eklenirken, N ve S elementleri uzaklaştırılmıştır. Rafine edilecek ALPY miktarının hidro-işlem sürecine bağlı olduğu ve bunun da rafine edilen ALPY miktarı ile üretilen SHY miktarı arasında bir tutarsızlığa yol açtığı gösterilmiştir.

Tablo 3.4'de gösterildiği gibi, ALPY'nın N ve S içerikleri sırasıyla kütlece %0,820 ve %0,882'dir. HDS ve HDN işlemleri ile S ve N elementlerini uzaklaştırdığından, S ve N miktarı elde edilen toplam yakıt kütesinden çıkarılmalıdır. Ayrıca aromatiklerin hidro-işlenmesi sırasında ALPY'na H₂ eklendiğinden, eklenen H₂ de toplam kütleyle dahil edilmelidir. Hidrogenitrojenasyon ve hidrosülfürizasyon işlemlerinden sonra 1000 g ALPY'ndan uzaklaştırılan N ve S kütesinin toplamda 17,02 g olduğu hesaplanmıştır. ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryolarına göre, aromatiklerin hidrodearomatizasyonu için ALPY'na sırasıyla ~46,91 g H₂ ve ~35,18 g H₂ eklenmiştir. Bu ayarlamaların uygulanmasının ardından, ASTM D7566 ve ASTM D1655

senaryolarına göre 1000 g ALPY'dan sırasıyla 1029,89 g (1000 – 17,02 (S ve N kütlesi) + 46,91 (HDA)) ve 1018,16 g (1000 – 17,02 (S ve N kütlesi) + 35,18(HDA)) sürdürülebilir havacılık yakıtı üretildiği hesaplanmıştır. Bu durumda, ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryolarına göre, SHY'nın toplam kütlesi hidro-işlem süreçlerinden sonra sırasıyla %2,989 ve %1,8116 artmaktadır. Bu oranlar toplam yıllık ALPY üretimine (~828,37 ton/yıl) uygulandığında, ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryolarına göre sırasıyla yaklaşık ~853,130 ton/yıl veya 1066,412 m³/yıl ve ~843,41 ton/yıl veya 1054,262 m³/yıl SHY üretileceği hesaplanmıştır. Birim dönüştürme sırasında sürdürülebilir havacılık yakıtının yoğunluğunun 800 kg/m³ olduğu varsayılmıştır.

Tablo 4.3. Farklı hidro-işlem senaryolarına göre Eskişehir ili için yıllık SHY üretim miktarları

Hidrodaromatizasyon Senaryosu	Toplam SHY üretimi (ton/yıl)	Toplam SHY üretimi (m ³ /yıl)
ASTM D7566 (%100 aromatik doygunluk)	853,13	1066,412
ASTM D1655 (%75 aromatik doygunluk)	843,41	1054,262

4.1.4. Ekonomik analiz

Eskişehir ilinde kurulacak tesisin ekonomik analizi için yapılan varsayımlar Tablo 4.4'te sunulmuştur. Tesisin kurulumu 2 yıl ve toplam ömrü 20 yıl olarak belirlenmiştir. Kullanılan amortisman yöntemi doğrusal amortisman yöntemidir ve amortisman süresi 18 yıl olarak belirlenmiştir. Gelir vergisi %30 ve baz yıl 2024 olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.4. Ekonomik model analizinin kabulleri

Parametre	Varsayımlar
Lokasyon	Eskişehir, Türkiye
Baz yıl	2024
Amortisman yöntemi	Doğrusal amortisman
Amortisman süresi	18 yıl
Tesis Ömrü	20 yıl
Tesis inşaat süresi	2 yıl
Yıllık çalışma süresi	8088 saat/yıl
Kapasite	225 kg/saat
Hurda değeri	0
Gelir vergisi	%30

Ekonomik analizlerin sonuçları Tablo 4.5’de sunulmuştur. Saatte 225 kg (8088 saat/yıl) kapasiteli bir tesis tarafından üretilen sürdürülebilir havacılık yakıtının minimum uygulanabilir satış fiyatı (MFSP) ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryolarına göre sırasıyla 0,9225 \$/L ve 0,8661 \$/L olarak hesaplanmıştır. ASTM D7566 senaryosunda daha fazla H₂ tüketildiği için birim maliyeti de daha yüksek olmaktadır. Yakıtın minimum satış fiyatının belirlenmesinde sermaye harcamaları (CapEx), hidrojen dahil operasyonel harcamalar (OpEx) ve %30 gelir vergisi dikkate alınmıştır. ASTM D7566 senaryosuna göre H₂ hariç işletme maliyeti (OpEx) ve H₂ maliyeti yakıt fiyatının sırasıyla %66’sını ve %32,6’sını oluşturmaktadır. ASTM D1655 senaryosuna göre ise, H₂ hariç işletme maliyeti (OpEx) ve H₂ maliyeti yakıt fiyatının sırasıyla %71,2’sini ve %27,7’sini oluşturmaktadır.

Tablo 4.5. *Sürdürülebilir havacılık yakıtı üretiminin maliyet analizi*

Parametre	Maliyet (\$) (ASTM D7566 senaryosu için)	Maliyet (\$) (ASTM D1655 senaryosu için)
CapEx	191660	191660
Toplam ekipman maliyeti (COE)	45775	45775
Sabit işletme maliyeti (FOC)	276782	276782
OpEx (H ₂ dahil olmadan)	649811	649811
H ₂ üretim maliyeti	319111 (43,672 ton için)	248109 (33,955 ton için)
OpEx (H ₂ dahil)	969122	897920
Değişken işletme maliyetleri (VOC) (H ₂ dahil olmadan)	373029	373029
Değişken işletme maliyetleri (VOC) (H ₂ dahil)	692340	621138
H ₂ maliyeti (1 L SHY için)	0,301	0,240
MFSP (L)	0,9225	0,8661

Bu tezde önerilen model, Eskişehir ilinde kurulacak bir tesiste atık lastik hammaddelerinden SHY üretiminin minimum satış fiyatı 0,9 \$/L olacak şekilde gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Belirtilen satış fiyatının makul kabul edilebilmesi için, diğer çalışmalarda hesaplanan fiyatlarla ve ticari jet yakıtı satış fiyatıyla karşılaştırılması gerekmektedir. Tablo 4.6 farklı çalışmalardan elde edilen SHY’larının minimum satış fiyatlarını göstermektedir. Bu çalışmada önerilen model ile elde edilen SHY’nın fiyatı, ticari jet yakıtı hariç diğer SHY’ları kıyaslanabilir bir düzeydedir. Bu

bulgular, bu çalışmada önerilen modelin işlevsel ve dikkate değer olduğunu göstermektedir. Ayrıca, tesis kapasitesi artırılarak ve sentetik gaz ve kömür gibi piroliz yan ürünlerinin satışı ile yakıt üretim maliyetlerinin daha fazla azaltılması olanak dahilindedir (Liu vd., 2020b).

Tablo 4.6. *Eskişehir ili için sürdürülebilir havacılık yakıtı üretim maliyetlerinin karşılaştırılması*

Yöntem	MFSP (\$/L)	Kaynakça
Atık lastik pirolizinden jet yakıtı üretilmesi	0,78	Rogachuk ve Okolie (2024)
Biyokütle pirolizinden jet yakıtı üretilmesi	3,21	Liu vd. (2020b); Wang vd. (2022)
Biyokütle pirolizinden jet yakıtı üretilmesi	1,46	Qiang ve Wang (2020)
ASTM sertifikalı teknolojiler	1,12 – 3,99	Watson vd. (2024)
Ticari jet yakıtı	0,5	Watson vd. (2024)
Atık lastik pirolizinden jet yakıtı üretilmesi	0,9225	Bu tez çalışması (ASTM D7566 senaryosu)
Atık lastik pirolizinden jet yakıtı üretilmesi	0,8661	Bu tez çalışması (ASTM D1655 senaryosu)

4.1.4.1. Değişken hammadde maliyet senaryolarının yakıt fiyatı üzerindeki etkisi

Bu bölüme kadar olan hesaplamalarda hammadde fiyatının 0 \$/kg olduğu varsayılmıştır. Ancak, atık lastik hammaddesinin maliyeti küresel olarak ton başına 100 \$ (0,1 \$/kg) veya daha fazla olabilmektedir (Yahya ve Omar, 2024). Bu nedenle, sürdürülebilir havacılık yakıtlarının en düşük satış fiyatı farklı hammadde maliyetleri dikkate alınarak yeniden hesaplanmış ve Tablo 4.7'de sunulmuştur.

Tablo 4.7. *Farklı atık lastik hammadde maliyetlerine dayalı sürdürülebilir havacılık yakıtı birim fiyatlarının değişimi*

Atık lastik hammaddesinin maliyeti (\$/kg)	ASTM D7566 Senaryosundaki MFSP (\$/L)	ASTM D1655 Senaryosundaki MFSP (\$/L)
0	0,9225	0,8661
0,1	1,0933	1,0385
0,2	1,2634	1,2104

ASTM D7566 senaryosuna göre, 0, 0,1 ve 0,2 \$/kg atık lastik hammadde maliyetleri için en düşük yakıt satış fiyatı sırasıyla 0,9225, 1,0933 ve 1,2634 \$/L olarak hesaplanmıştır. ASTM D7566 senaryosunda, atık lastik hammadde maliyeti 0,1 ve 0,2 \$/kg olması durumunda yakıtın maliyeti sırasıyla %18,5 ve %37 artış göstermektedir. ASTM D1655 senaryosuna göre, 0, 0,1 ve 0,2 \$/kg atık lastik hammadde maliyetleri için en düşük yakıt satış fiyatı sırasıyla 0,8661, 1,0385 ve 1,2104 \$/L olarak hesaplanmıştır. ASTM D1655 senaryosunda, atık lastik hammadde maliyeti 0,1 ve 0,2 \$/kg olması durumunda yakıtın maliyeti sırasıyla %19,9 ve %39,7 artış göstermektedir.

4.1.4.2. Piroliz yan ürünleri gelire dahil edildiğinde yakıt fiyatındaki değişim

Atık lastik piroliz işleminde, ALPY'na ek olarak iki yan ürün üretilir: ALPK ve sentez gazı. Bu ürünlerin miktarları önceki bölümde sıralanmıştır (Tablo 4.1). Ön hesaplamalar, 1817 ton atık lastikten ALPK ve sentez gazı üretiminin sırasıyla 569,3 ton/yıl ve 161,5 ton/yıl olduğunu göstermektedir. Bu ürünlerin satışı önemli miktarlarda gelir yaratma potansiyeline sahiptir ve böylece MFSP bir ölçüde azaltabilir.

ALPK ve sentez gazının satışından elde edilecek tahmini gelirler Tablo 4.8'de sunulmuştur. ALPK ve sentez gazının birim fiyatlarının sırasıyla 50 \$/ton ve 200 \$/ton olduğu varsayılmıştır (Yahya ve Omar, 2024). ALPK'nın tamamının satılmayacağı unutulmamalıdır. Daha önce de belirtildiği gibi, ALPK elektrokimyasal oksidasyon yoluyla H₂ üretmek için kullanılacaktır. ALPK'nin elektrokimyasal oksidasyonu sırasında, 1 kg H₂ üretmek için yaklaşık 3,677 kg ALPK tüketildiği hesaplanmıştır. H₂ üretimi sırasında tüketilecek karbon miktarı Denklem (2.6)'da belirtilen kimyasal reaksiyon ($C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$) dikkate alınarak belirlenmiştir. Stokiyometrik hesaplamalara göre, bu reaksiyon sonucunda 1 mol karbon (~12,01 g/mol) ve 2 mol H₂ (2x2,016 g/mol) ortaya çıkmaktadır (Narayanan ve Lakshmikutty, 2016). Bu reaksiyon ile, 1 kg H₂ üretmek için yaklaşık 248 mol karbon tüketilmektedir. Bir mol karbonun 12,01 grama eşdeğer olduğu göz önüne alındığında, 248,5 mol karbonun kütlesi yaklaşık 2979 gram olarak hesaplanmıştır (2,979 kg). Hesaplanan bu değer %100 karbondan oluşan bir hammadde için geçerlidir. Ancak Tablo 2.2'te verilen değerlerin ortalaması alındığında ALPK'nün karbon içeriğinin ~%81,6 olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda, 1 kg H₂ üretmek için gerekli ALPK miktarı 3,650 kg olarak belirlenmiştir. ASTM D7566 senaryosuna göre hidro-işlemler sırasında 43672 kg H₂ tüketileceği düşünüldüğünde, H₂ üretimi sırasında yaklaşık 160 ton ALPK tüketilecektir. Bu durumda, bu değer üretilen

toplam ALPK'den (569,3 ton) çıkarıldığında satılabilir ALPK miktarı (409,3 ton/yıl) belirlenecektir. Sonuç olarak, 409,3 ton ALPK ve 161,5 ton sentez gazının satışından 52765 \$ gelir edilebilmektedir.

Tablo 4.8. Atık lastik piroliz kömürü ve sentez gazının satışından elde edilecek tahmini gelir

Piroliz yan ürünü	Satılacak miktar (ton/yıl)	Satış fiyatı (\$/ton)	Tahmini gelir (\$)	Toplam gelir (\$)
ALPK	409,3	50	20465	52765
Sentez gazı	161,5	200	32300	

Piroliz yan ürünlerinden elde edilen gelir dikkate alındığında, yakıtın satış fiyatında doğal olarak hafif bir düşüş gerçekleşecektir. Farklı senaryolar altında yakıt fiyatındaki değişim Tablo 4.9'da sunulmaktadır. Yan ürün gelirleri dahil edildiğinde, ASTM D7566 senaryosu ve ASTM D1655 senaryosu kapsamında yakıt satış fiyatı sırasıyla 0,8736 – 1,2143 \$/L ve 0,7990 – 1,1437 \$/L aralığında olacaktır.

Tablo 4.9. Farklı senaryolar altında sürdürülebilir havacılık yakıtı birim fiyatlarındaki değişim

Atık lastik hammaddesinin maliyeti (\$/kg)	ASTM D7566 Senaryosundaki MFSP (\$/L)	Yan ürün geliri dahil edilen ASTM D7566 MFSP (\$/L)	ASTM D1655 Senaryosundaki MFSP (\$/L)	Yan ürün geliri dahil edilen ASTM D1655 MFSP (\$/L)
0	0,9225	0,8736	0,8661	0,7990
0,1	1,0933	1,0439	1,0385	0,9714
0,2	1,2634	1,2143	1,2104	1,1437

4.2. Türkiye Geneline Toplanan Atık Lastiklerin Yakıt Üretim Potansiyeli

Bu bölüme kadar yapılan tüm hesaplamalar Eskişehir ilinde yılda 1.817 ton atık lastik toplandığı varsayımına dayanmaktadır. Ancak, Türkiye genelinde yıllık bazda daha fazla miktarda atık lastik olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle, Türkiye genelindeki atık lastiklerin sürdürülebilir havacılık yakıtına dönüştürülmesi durumunda karşılaşılabilecek faktörlerin aydınlatılması gerekmektedir. Bu bölümde, Türkiye genelinde toplanan atık lastiklerden sürdürülebilir havacılık yakıtı üretim miktarları ve maliyetleri üzerine yapılan bir çalışmanın sonuçları sunulmaktadır.

4.2.1. Türkiye geneli atık lastik piroliz ürünlerinin miktarı

Türkiye'de her yıl 180.000 ila 300.000 ton arasında araç lastiği kullanım ömrünü tamamladığı için atık olarak sınıflandırılmaktadır (Durna, Goncagül ve Nevim, 2020; Ertürk vd., 2023). Bu kullanım ömrünü tamamlamış atık lastikler, kurulacak yüksek kapasiteli merkezi bir tesis ile sürdürülebilir havacılık yakıtına dönüştürülebilir. Bu doğrultuda, Türkiye geneli için hesaplamalar 25 ton/saat ve 8088 saat/yıl (202200 ton/yıl) atık lastik işleme kapasitesine sahip bir tesis göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir.

Türkiye geneli için toplam 202200 ton/yıl atık lastiğin piroliz edilmesi sonucu elde edilecek ürün miktarları Tablo 4.10'da sunulmuştur. Ham ALPY, filtre edilmiş ALPY, ALPK ve piroliz gaz miktarları sırasıyla 93780 ton/yıl, 92183 ton/yıl, 63349 ton/yıl ve 17976 ton/yıl olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.10. Türkiye geneli atık lastik piroliz ürün miktarları

Parametre	Atık lastik toplam kütlesine oranı (% ağı.)	1000 g atık lastiğe karşılık gelen miktar (g)	Türkiye geneli için ürün miktarı (ton/yıl)
Atık lastik toplam kütlesi	100	1000	202.200
Toplam lastik kütlesindeki organik bileşikler	86,6	866	175.105
Ham ALPY miktarı	46,38	463,8	93.780
Filtre edilmiş ALPY miktarı	45,59	455,9	92.183
Piroliz kömür (ALPK) miktarı	31,33	313,3	63.349
Piroliz gaz (syngas) miktarı	8,89	88,9	17.976

4.2.2. Toplam hidrojen tüketimi

Daha önce de belirtildiği gibi (Tablo 4.2), ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryolarına göre 1000 g filtre edilmiş ALPY'yi rafine etmek için sırasıyla ~52,72 g ve ~40,99 g H₂ tüketilmektedir. Bu durumda, 92183 ton filtre edilmiş ALPY'nın rafine edilmesi için tüketilecek H₂ miktarları Tablo 4.11'de sunulmuştur. 92183 ton/yıl filtre edilmiş ALPY'nı, ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryolarına göre rafine etmek için (HDS, HDN ve HDA proseslerinde) sırasıyla yaklaşık 4860 ton/yıl ve 3779 ton/yıl H₂ tüketileceği belirlenmiştir.

Tablo 4.11. ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryolarına göre Türkiye geneli için yıllık hidrojen gereksinimi

	ASTM D7566 senaryosu (%100 aromatik doygunluk)	ASTM D1655 senaryosu (%75 aromatik doygunluk)
1000 g ALPY'nın hidro-işlemi için toplam H ₂ tüketimi (g)	~52,72	~40,99
92183 ton filtre edilmiş ALPY'nın hidro-işlemi için toplam H ₂ tüketimi (ton)	4.860	3.779

4.2.3. Toplam sürdürülebilir havacılık yakıtı üretim miktarı

Türkiye geneli toplam SHY üretim miktarı daha önce belirtilen ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryoları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu durumda, ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryolarına göre, rafine edilen yakıtın (filtre edilmiş ALPY) toplam kütlesi HDS, HDN ve HDA işlemlerinden sonra sırasıyla kütlece %2,989 ve %1,8116 artmaktadır. Bu hesaplamalar doğrultusunda ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryoları göre üretilebilecek SHY miktarları Tablo 4.12'de sunulmuştur. ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryolarına dayalı hesaplamalar, Türkiye genelinde sırasıyla 94938 ton/yıl ve 93853 ton/yıl SHY üretilebileceğini göstermektedir. Üretilen sürdürülebilir havacılık yakıtının yoğunluğu 800 kg/m³ kabul edilerek yapılan hesaplama göre, ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryolarında üretilen SHY miktarı sırasıyla 118672,50 m³/yıl ve 117316,25 m³/yıl olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.12. Farklı hidro-işlem senaryolarına göre Türkiye geneli için yıllık hidrojen tüketim miktarı

Hidrodearomatizasyon Senaryo	Toplam SHY üretimi (ton/yıl)	Toplam SHY üretimi (m ³ /yıl)
ASTM D7566 (%100 aromatik doygunluk)	94938	118672,50
ASTM D1655 (%75 aromatik doygunluk)	93853	117316,25

4.2.4. Ekonomik analiz

Tablo 4.13'te gösterildiği gibi, Türkiye genelinde toplanan atık lastikler için kurulacak sürdürülebilir havacılık yakıtı üretim tesisinin ekonomik analizi belirli varsayımlara dayandırılmaktadır. Tesisin inşaat süresi iki (2) yıl, toplam tesis ömrü ise 20 yıl olarak öngörülmüştür. Amortisman yöntemi doğrusaldır ve amortisman süresi 18

yıl olarak belirlenmiştir. Son olarak, gelir vergisi %30'dur ve baz yıl 2024 olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.13. *Türkiye geneli tesisin ekonomik model kabulleri*

Parametreler	Varsayımlar
Lokasyon	Türkiye
Baz yıl	2024
Amortisman yöntemi	Doğrusal amortisman
Amortisman süresi	18 yıl
Tesis Ömrü	20 yıl
Tesis inşaat süresi	2 yıl
Yıllık çalışma süresi	8088 saat/yıl
Kapasite	25000 kg/saat
Hurda değeri	0
Gelir vergisi	%30

Tablo 4.14. *Türkiye geneli sürdürülebilir havacılık yakıtı üretiminin maliyet analizi*

Parametre	Maliyet (\$) (ASTM D7566 senaryosu için)	Maliyet (\$) (ASTM D1655 senaryosu için)
CapEx	2.476.133	2.476.133
Toplam ekipman maliyeti (COE)	597.915	597.915
Sabit işletme maliyeti (FOC)	2.564.933	2.564.933
OpEx (H ₂ dahil olmadan)	44.012.608	44.012.608
H ₂ üretim maliyeti	35.512.020 (4860 ton için)	27.613.153 (3779 ton için)
OpEx (H ₂ dahil)	79.524.628	71.625.761
Değişken işletme maliyetleri (VOC) (H ₂ dahil olmadan)	41.447.675	41.447.675
Değişken işletme maliyetleri (VOC) (H ₂ dahil)	76.959.695	69.060.828
H ₂ maliyeti (1 L SHY için)	0,301	0,240
MFSP (L)	0,6716	0,6120

Türkiye genelinde toplanan atık lastiklerin geri dönüştürülmesi için kurulacak merkezi bir yakıt üretim tesiste üretilecek SHY'nın MFSP'ı Tablo 4.14'de sunulmuştur. ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryolarına yakıtın en düşük satış fiyatı sırasıyla

0,6716 \$/L ve 0,6120 \$/L olarak belirlenmiştir. Yakıt harcamalarını etkileyen en önemli faktör işletme maliyetleridir. ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryolarının hidrojen hariç değişken işletme maliyeti, MFSP'nin sırasıyla yaklaşık %52 ve %57,7'sini oluşturmaktadır. ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryolarının H₂ maliyeti, MFSP'nin sırasıyla yaklaşık %44,5 ve %38,4'ünü oluşturmaktadır.

4.2.4.1. Değişken hammadde maliyet senaryolarının yakıt fiyatı üzerindeki etkisi

Tablo 4.14'te gösterilen yakıtın minimum satış fiyatının belirlenmesinde, atık lastik hammaddesinin maliyetinin 0 \$/kg olduğu varsayılmıştır. Bununla birlikte, SHY veya diğer biyoyakıtların üretim maliyetlerinin önemli bir kısmını hammadde satın alma maliyeti oluşturmaktadır (Watson vd., 2024). Bu doğrultuda, değişken hammadde maliyetinin MSFP üzerindeki etkisi incelenmiştir. Farklı hammadde maliyetleri olması durumunda üretilen yakıtın satış fiyatı Tablo 4.15’de sunulmuştur.

Tablo 4.15. Türkiye geneli ve Eskişehir ili için farklı atık lastik hammadde maliyetlerine göre sürdürülebilir havacılık yakıtı birim fiyatlarındaki değişimler

Atık lastik hammadde maliyeti (\$/kg)	Türkiye - ASTM D7566 Senaryosu MFSP (\$/L)	Eskişehir - ASTM D7566 Senaryosu MFSP (\$/L)	Türkiye - ASTM 1655 Senaryosu MFSP (\$/L)	Eskişehir - ASTM 1655 Senaryosu MFSP (\$/L)
0	0,6716	0,9225	0,6120	0,8661
0,1	0,8419	1,0933	0,7846	1,0385
0,2	1,0125	1,2634	0,9568	1,2104

25000 kg/saat kapasiteli (Türkiye geneli atıklar için) tesis için ASTM D7566 senaryosuna göre, hammadde maliyeti 0, 0,1 ve 0,2 \$/kg olması durumundaki MFSP sırasıyla 0,6716, 0,8419 ve 1,0125 \$/L olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere, 25000 kg/saat kapasiteli tesisin üreteceği yakıtın MFSP'si, 225 kg/saat kapasiteli (Eskişehir ilinde atık miktarı için) tesisin üreteceği yakıtın maliyetinden daha düşüktür. ASTM D7566 senaryosuna göre, 225 kg/saat kapasiteli bir tesis tarafından üretilen yakıtın en düşük satış fiyatı, 25000 kg/saat kapasiteli tesis tarafından üretilen yakıttan %19,9 – %27,2 daha pahalı olacaktır. ASTM D1655 senaryosuna göre ise, Eskişehir ilindeki 225 kg/saat kapasiteli tesis tarafından üretilen yakıtın satış fiyatı, Türkiye genelinde kurulacak 25000 kg/saat kapasiteli tesis tarafından üretilen yakıttan yaklaşık %20,9 ila %29,3 daha

yüksek olacaktır. Bu durumun oluşmasının temel nedeni olarak sermaye harcamaları ve işgücü maliyetleridir. Tesisin üretim kapasitesi yaklaşık olarak 111 kat (25000 kg / 225 kg) artarken sermaye harcamaları ve işgücüne bağlı sabit işletme maliyeti (FOC) sırasıyla yaklaşık 13 ve 9 kat artmıştır. Bunun bir sonucu olarak, yakıt üretim maliyetinde azalma gerçekleşmiştir.

4.2.4.2. Piroliz yan ürünleri gelire dahil edildiğinde yakıt fiyatındaki değişim

Buraya kadar olan bölümde (Türkiye geneli kurulacak merkezi bir tesis için) ALPK ve sentez gazı gibi piroliz yan ürünlerinden elde edilecek gelir MFSP hesaplamalarına dahil edilmemiştir. Bu bölümde, piroliz yan ürünlerinin satışından elde edilen gelirler dahil edildiğindeki MFSP değişimi incelemiştir. Piroliz yan ürünlerinin üretimi ve satışından elde edilen mali getiri Tablo 4.16'da sunulmuştur. ALPK ve sentez gazının satışından elde edilen toplam gelir yıllık 5.872.400 \$'dır. Tablo 4.10'da özetlenen bulgulara belirtildiği gibi, Türkiye'de kurulacak merkezi bir tesis ile yılda toplam 63.349 ton ALPK üretilebilmektedir. Bu miktarın yaklaşık 17.805 tonu H₂ üretiminde kullanılabilirken, kalan 45.544 tonu gelir elde etmek için satılabilir. Satılan bu miktardan yıllık 2.277.200 \$ gelir elde edilebileceği hesaplanmıştır. Satılacak ALPK miktarının belirlenmesinde, önceki bölümlerde belirtilen hesaplamalar dikkate alınmıştır (Bölüm 4.1.4.2). Bir diğer piroliz ürün olan sentez gazının satışından yıllık 3.595.200 \$ gelir elde edilebileceği hesaplanmıştır.

Tablo 4.16. Türkiye geneli tesis için atık lastik piroliz kömürü ve sentez gazının satışından elde edilecek tahmini gelir

Piroliz yan ürünü	Satılacak miktar (ton/yıl)	Satış fiyatı (\$/ton)	Tahmini gelir (\$)	Toplam gelir (\$)
ALPK	45544	50	2.277.200	5.872.400
Sentez gazı	17976	200	3.595.200	

Piroliz yan ürünlerinin satışından elde edilen gelir de hesaba katıldığında, üretilen yakıtın satış fiyatı düşmektedir. Yakıt fiyatlarındaki söz konusu değişim ASTM D7566 senaryosuna göre hesaplanmış ve Tablo 4.17'de sunulmuştur. Piroliz yan ürünlerinin satışından elde edilen gelir de hesaba katıldığında, Türkiye geneli (25000 kg/saat kapasiteli) tesisin ürettiği yakıtın satış fiyatı yaklaşık %4,9 ila %7,6 arasında

azalmaktadır. Tablo 4.17'de gösterildiği gibi, farklı kapasitelere sahip tesisler tarafından üretilen yakıtların satış fiyatlarının karşılaştırmalı bir analizi de sunulmaktadır. Tabloda özellikle, kapasiteleri saatte 225 kg ile 25.000 kg arasında değişen tesisler tarafından üretilen yakıtlara ilişkin veriler sunulmaktadır. Yüksek kapasiteli tesis tarafından üretilen yakıtın en düşük satış fiyatı, düşük kapasiteli tesise göre yaklaşık %20 ila %30 daha düşüktür.

Tablo 4.17. ASTM D7566 senaryosuna göre Türkiye geneli ve Eskişehir ili için sürdürülebilir havacılık yakıtı birim fiyatlarındaki değişim

Atık lastik hammaddesinin maliyeti (\$/kg)	Türkiye - ASTM D7566 Senaryosu MFSP (\$/L)	Türkiye - yan ürün geliri dahil edilen ASTM D7566 MFSP (\$/L)	Eskişehir - ASTM D7566 Senaryosu MFSP (\$/L)	Eskişehir - yan ürün geliri dahil edilen ASTM D7566 MFSP (\$/L)
0	0,6716	0,6221	0,9225	0,8736
0,1	0,8419	0,7924	1,0933	1,0439
0,2	1,0125	0,9630	1,2634	1,2143

Tablo 4.18. ASTM D1655 senaryosuna göre Türkiye geneli ve Eskişehir ili için sürdürülebilir havacılık yakıtı birim fiyatlarındaki değişim

Atık lastik hammaddesinin maliyeti (\$/kg)	Türkiye - ASTM D1655 Senaryosu MFSP (\$/L)	Türkiye - yan ürün geliri dahil edilen ASTM D1655 MFSP (\$/L)	Eskişehir - ASTM D1655 Senaryosu MFSP (\$/L)	Eskişehir - yan ürün geliri dahil edilen ASTM D1655 MFSP (\$/L)
0	0,6120	0,5627	0,8661	0,7990
0,1	0,7846	0,7345	1,0385	0,9714
0,2	0,9568	0,9067	1,2104	1,1437

Tablo 4.18'de gösterildiği gibi, piroliz yan ürünlerinin satışından elde edilen gelirin dahil edilmesi, ASTM D1655 senaryosuna göre üretilen yakıtın minimum satış fiyatının düşürülmesine katkıda bulunmaktadır. Kapasitesi saatte 25000 kg olan tesiste üretilen yakıtın satış fiyatı, piroliz yan ürünlerinin satışı sonucu yaklaşık %5,2 ila %8,1 oranında azalmıştır. Tablo 4.18'de gösterildiği üzere, saatte 225 kg'dan 25.000 kg'a kadar değişen kapasitelerin yakıt fiyatları üzerindeki etkisi ASTM D1655 senaryosunda belirlenen

parametrelere uygun olarak sunulmuştur. Kapasitesi 25.000 kg/saat olan tesiste üretilen yakıtın satış fiyatı 225 kg/saat kapasiteli tesise kıyasla yaklaşık %20 ila %30 oranında düşmektedir.

Bu tezde önerilen jet yakıtı üretim modelinin diğer çalışmalarla karşılaştırılması, çalışmanın bilimsel öneminin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Bu doğrultuda, önerilen model kullanılarak üretilen jet yakıtının; ticari jet yakıtı, ASTM onaylı SHY üretim teknolojileri ve literatürdeki diğer çalışmalar kapsamında üretilen jet yakıtlarının en düşük satış fiyatlarıyla karşılaştırmalı analizi Tablo 4.19’da sunulmuştur.

Tablo 4.19. Yan ürün satışları gelire dahil edildiğinde, sürdürülebilir havacılık yakıtı üretim maliyetlerinin literatürle karşılaştırılması

Yöntem	MFSP (\$/L)	Kaynakça
Atık lastikten piroliz ile jet yakıtı üretilmesi	0,78	Rogachuk ve Okolie (2024)
Biyokütleden piroliz ile jet yakıtı üretilmesi	3,21	Liu vd. (2020b); Wang vd. (2022)
Biyokütleden piroliz ile jet yakıtı üretilmesi	1,46	Qiang ve Wang (2020)
ASTM sertifikalı teknolojileri ile SHY üretilmesi	1,12 – 3,99	Watson vd. (2024)
Ticari jet yakıtı üretilmesi	0,50	Watson vd. (2024)
Atık lastik pirolizinden jet yakıtı üretilmesi	0,8736 – 1,2143	Bu tez çalışması (ASTM D7566 senaryosu – Eskişehir ili)
Atık lastik pirolizinden jet yakıtı üretilmesi	0,7990 – 1,1437	Bu tez çalışması (ASTM D1655 senaryosu – Eskişehir ili)
Atık lastik pirolizinden jet yakıtı üretilmesi	0,6221 – 0,9630	Bu tez çalışması (ASTM D7566 senaryosu – Türkiye geneli)
Atık lastik pirolizinden jet yakıtı üretilmesi	0,5627 – 0,9067	Bu tez çalışması (ASTM D1655 senaryosu – Türkiye geneli)

Hem Eskişehir ili hem de Türkiye genelinde kurulacak tesislerde üretilen jet yakıtının en düşük satış fiyatı, ASTM onaylı jet yakıtlarının ortalama satış fiyatından daha düşüktür. Dolayısıyla, bu çalışmada önerilen jet yakıtı üretim modeli, ekonomik açıdan mevcut ASTM onaylı teknolojilere kıyasla daha cazip bir seçenek sunmaktadır. Ayrıca, önerilen modelin literatürde yer alan diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında da ekonomik olarak daha avantajlı ya da en azından benzer düzeyde olduğu görülmektedir. Buna karşın, fosil kökenli jet yakıtları için aynı durum geçerli değildir. Eskişehir ilinde toplanan

atıklardan üretilecek jet yakıtının en düşük satış fiyatı, fosil kökenli jet yakıtına kıyasla %60 ile %143 arasında daha yüksektir. Benzer şekilde, Türkiye genelinde toplanan atık lastiklerden üretilecek jet yakıtının en düşük satış fiyatı, fosil kökenli jet yakıtına kıyasla yaklaşık %13 ile %93 oranında daha fazladır. Ancak, Türkiye genelindeki üretim ölçeği dikkate alındığında, önerilen modelle üretilen jet yakıtının ekonomik olarak fosil kökenli alternatiflerle rekabet edebilecek seviye yakın olduğu ifade edilebilir.

4.2.4.3. Değişken amortisman sürelerinin ve kâr marjlarının yakıt fiyatı üzerindeki etkisi

Bu bölüme kadar yapılan ekonomik analizlerde amortisman süresi 18 yıl olarak kabul edilmiştir ve dolayısıyla yakıt satışının kâr marjı çok düşük olmuştur. Ancak hem amortisman süresinin uzun tutulması hem de kâr marjının çok düşük olması, yatırımcılar tarafından genellikle tercih edilen bir durum değildir. Dolayısıyla, önerilen jet yakıtı üretim modelinin yatırımcılar açısından daha cazip bir konumda olabilmesi için daha kısa bir amortisman süresine ve daha yüksek bir kâr marjına sahip olması gerekmektedir.

Bu bölümde, farklı amortisman sürelerinin ve kâr marjlarının yakıtın satış fiyatı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hesaplamalar, Türkiye genelindeki tesis için, piroliz yan ürünlerinin (gaz ve kömür) gelire dahil edildiği ve hammadde maliyetinin kilogram başına 0,1 \$ olarak kabul edildiği senaryoya dayanmaktadır. Bu kabuller, yakıt üretimi açısından optimum koşullar göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

Değişken amortisman sürelerinin (2, 4, 6, 8 ve 18 yıl) yakıt fiyatı ve kâr marjı üzerindeki etkisi Tablo 4.20’de sunulmuştur. Amortisman süresi 18 yıldan 2 yıla düşürüldüğünde, ASTM D7566 ve ASTM D1655 senaryoları için yakıt fiyatı litre başına sırasıyla, 0,7924 \$’dan 0,8059 \$’a ve 0,7345 \$’dan 0,7479 \$’a yükselirken, kâr marjları sırasıyla %0,21’den %1,85’e ve %0,23’ten %2,02’ye yükselmiştir. Sonuç olarak, önerilen yakıt üretim modeli ile kurulacak tesis, %1,85 ve %2,02 gibi düşük kâr marjları ile kendini yalnızca 2 yıl gibi kısa bir sürede amorti edebilmektedir.

Değişken kâr marjlarının (%5, %10, %15 ve %20) yakıt fiyatı ve amortisman süresi üzerindeki etkileri bu tez çalışmasında ayrıca incelenmiştir. Tablo 4.21’de görüldüğü üzere, kâr marjının %5’ten %20’ye çıkarılması durumunda ASTM D7566 senaryosuna göre üretilen yakıtın satış fiyatı litre başına 0,8293 \$’dan 0,9558 \$’a yükselirken, amortisman süresi 0,503 yıldan 0,109 yıla gerilemektedir. Benzer şekilde, ASTM D1655 senaryosu için yakıtın satış fiyatı litre başına 0,7720 \$’dan 0,9060 \$’a yükselirken

amortisman süresi 0,547 yıldan 0,116 yıla düşmektedir. Artan kâr marjının artırılması amortisman süresi azalırken yakıtın satış fiyatında kayda değer şekilde artmasına neden olmaktadır.

Tablo 4.20. *Değişken amortisman sürelerinin yakıt fiyatı ve kâr marjı üzerindeki etkisi*

Amortisman süresi (yıl)	ASTM D7566 – MFSP (\$/L)	Kâr Marjı (%)	ASTM D1655 – MFSP (\$/L)	Kâr Marjı (%)
18	0,7924	0,21	0,7345	0,23
8	0,7947	0,47	0,7366	0,51
6	0,7960	0,62	0,7379	0,68
4	0,7985	0,93	0,7404	1,02
2	0,8059	1,85	0,7479	2,02

Tablo 4.21. *Değişken kâr marjlarının yakıt fiyatı ve amortisman süresi üzerindeki etkisi*

Kâr Marjı (%)	ASTM D7566 – MFSP (\$/L)	Amortisman süresi (yıl)	ASTM D1655 – MFSP (\$/L)	Amortisman süresi (yıl)
0,21 (D7566) ve 0,23 (D1655)	0,7924	18	0,7345	18
5	0,8293	0,503	0,7720	0,547
10	0,8700	0,240	0,8153	0,259
15	0,9123	0,152	0,8599	0,164
20	0,9558	0,109	0,9060	0,116

Bu bölüme kadar yapılan hesaplamalar açık bir şekilde göstermektedir ki önerilen jet yakıtı üretim modeli ASTM onaylı SHY üretim teknolojilerine kıyasla daha düşük yakıt satış fiyatı sunmaktadır (Watson vd., 2024). Ancak, kâr marjlarının %5 ile %20 arasında değişmesi durumunda, önerilen model ile üretilen yakıtın satış fiyatı fosil kökenli jet yakıtından (0,5 \$/L) yaklaşık %54,4 ile %91,2 aralığında daha yüksek olmaktadır. Atık lastiklerden üretilen jet yakıtının satış fiyatı, her ne kadar fosil kökenli jet yakıtlarına kıyasla daha yüksek olsa da önerilen modelde rafineri sırasında gerçekleşen reaksiyonlar sırasında yan ürün olarak önemli miktarlarda NH_3 ve H_2S üretilmektedir. Bu ürünleri satışı ile gelirler elde edilebilir ve böylelikle maliyetler daha aşağılara çekilebilir.

Piroliz yağının rafine edilmesi sürecinde elde edilen değerli bir yan ürün olan NH_3 için örnek bir gelir hesaplaması yapılmış ve bunun operasyonel harcamalar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu hesaplamanın yürütülebilmesi için öncelikle Türkiye genelindeki yakıt üretim tesisinde yıllık NH_3 üretim miktarı belirlenmiştir. Bu miktarın hesaplanmasında, piroliz yağının azot (N) içeriği (kütlegece %0,820; bkz. Tablo 3.4) ile yıllık piroliz yağ üretim miktarı (92.183 ton/yıl; bkz. Tablo 4.10) dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda, Türkiye genelindeki tesiste rafine edilecek piroliz yağında yaklaşık 755,90 ton N elementi bulunduğu hesaplanmıştır. Bu N elementi, HDN prosesi ile NH_3 'e dönüştürülmektedir. Yapılan mol hesaplamaları sonucunda, HDN prosesi ile yılda yaklaşık 918,36 ton NH_3 üretilbileceği belirlenmiştir. Uluslararası piyasa verilerine göre, 1 ton NH_3 'ün fiyatı 500 \$'ın üzerindedir (IMARC, 2025). Bu durumda, NH_3 satışından yıllık yaklaşık 460 bin \$ gelir elde edilebileceği öngörülmektedir. Benzer şekilde, rafineri sürecinde oluşan bir diğer yan ürün olan H_2S 'in satışıyla da ek gelir sağlanabilir. Ancak, bu tür yan ürünlerden elde edilen yıllık gelir, toplam operasyonel giderlerin %1'inden daha azına karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, önerilen yakıt üretim modelinin teknolojik olgunluk seviyesi artana kadar kısa vadede farklı çözümlerin hayata geçirilmesi gereklidir.

Bu çözüm önerilerinin başında hammadde sübvansiyonları gelmektedir. Hammadde maliyetinin 0,1 \$/kg olması durumunda, Türkiye genelindeki yakıt üretim tesisinin yıllık hammadde gideri yaklaşık 20,22 milyon \$'a karşılık gelmektedir. Bu maliyet, ASTM D1655 ve ASTM D7566 rafineri senaryoları için öngörülen operasyonel harcamaların sırasıyla %22,0'sine ve %20,3'üne denk düşmektedir. Devlet tarafından hammadde sübvansiyonları sağlanması durumunda, operasyonel harcamalarda ve dolayısıyla yakıt fiyatlarında anlamlı azalmalar meydana gelecektir. Bu nedenle, önerilen yakıt üretim modelinin fosil yakıtlara kıyasla daha cazip bir seçenek hâline gelebilmesi için kısa vadede hammadde sübvansiyonlarının hayata geçirilmesi, en makul çözüm olarak öne çıkmaktadır. Orta ve uzun vadede ise, teknolojik gelişmeler ile birlikte önerilen yakıt üretim modeli ile daha düşük maliyetlere jet yakıtı üretilbileceği öngörülmektedir.

4.3. Zorluklar ve Gelecek Perspektifi

Bu tez çalışmasında önerilen modelin uygulanması ve sürdürülmesi sürecinde karşılaşılabilecek en önemli zorluklardan biri, atık lastik piroliz kömürünün (ALPK) elektro

kimyasal oksidasyon hızının yavaş olmasıdır. Bunun bir sonucu olarak düşük hızda hidrojen üretimi gerçekleşmektedir. Dolayısıyla, HDA, HDN ve HDS işlemleri için gerekli olan hidrojen talebinin karşılanması için önemli sayıda elektrokimyasal hücreye ihtiyaç duyulabilmektedir. Öte yandan, karbon destekli su elektrolizi teknolojisinin hala geliştirilme aşamasında olduğu göz önüne alındığında, gelecekte bu endişelerin üstesinden gelinmesinin mümkün olduğu öngörülmektedir. Karbon destekli su elektrolizinde, hidrojen üretimi teorik olarak 0,21 V potansiyelde başlamaktadır. Ancak, pratikte, hücre voltajı 0,8 V ve üzerine çıktığında kayda değer hızlı hidrojen üretimi gerçekleşmektedir. Bunun temel nedeni ise, karbon oksidasyonunun oldukça yavaş gerçekleşmesidir. Düşük potansiyellerde daha yüksek yük transferine izin veren elektrokatalizörlerin geliştirilmesi ile, karbon oksidasyonu hızlandırılabilir ve H₂ üretim hızında önemli artış gerçekleşebilir. Özellikle yüksek seçiciliğe sahip elektrokatalizörlerin geliştirilmesi üzerine ciddi sayıda araştırma yapılması gerektiği düşünülmektedir. Bu araştırmaların sayısı ve kalitesi arttıkça, H₂ üretim hızında önemli iyileştirmeler sağlanabileceği öngörülmektedir. Böylelikle, önerilen model çok daha etkili bir şekilde uygulanabilir.

Bu çalışmada karşılaşılan bir diğer zorluk ise, ALPY'nin içeriğinde yüksek oranda doymamış hidrokarbonların bulunmasıdır. Bu doymamış hidrokarbonları doymuş hidrokarbonlara dönüştürmek için önemli miktarda H₂ tüketilmektedir. ALPY'nin rafine edilmesi sırasında tüketilen H₂ miktarını azaltacak uygulamalar önerilen modelin daha verimli olmasına katkı sağlayabilir. Biyokütle ve atık lastik gibi farklı bileşen içeriğine sahip hammaddelerin birlikte piroliz edilmesiyle bu sorunun üstesinden gelinebileceği öngörülmektedir (Wang vd., 2021b). Böylece, daha az H₂ tüketimi ile ve dolayısıyla daha düşük maliyetle SHY üretilebileceği öngörülmektedir. Azalan maliyetlerin bir sonucu olarak, SHY'larına olan talepte artış gerçekleşebilir.

ALPY'nin HDN ve HDS işlemleri sırasında NH₃ (amonyak) ve H₂S (hidrojen sülfür) gibi yan ürünler üretilmektedir. Bu yan ürünler farklı sektörlerde hammadde olarak kullanıldığı için katma değerli ürün olarak sınıflandırılabilir. NH₃, gaz türbini motorlarında doğrudan yakıt olarak kullanılabilir (Fatehi, Campaldini ve Renzi, 2025; Ayaz, Altuntas ve Caliskan, 2018, s.61; Ayaz, Altuntas ve Caliskan, 2023, s.61). Ayrıca, NH₃ (Ayaz, Altuntas ve Caliskan, 2020, s.61) ve H₂S (Lou, Wang ve Song, 2024) yan ürünleri H₂ taşıyıcıları olduğundan, elektrokimyasal bir süreçle yeniden H₂ üretiminde de

kullanılabilirler. Bu sayede, fosil yakıtlara olan bağımlılık azaltılabilir ve Birleşmiş Milletler'in karbon nötr (karbonsuzlaşma) hedefine destek sağlanabilir.

Atık lastiklerin pirolizi sonucu üretilen ALPK, elektrokimyasal oksidasyon ile H₂ üretmek için kullanılmıştır. ALPK'nün elektrokimyasal oksidasyonunda, katot bölümünde H₂ üretilirken, anot bölümünde toplam H₂ üretiminin hacimsel olarak yarısına eşit miktarda CO₂ üretilmesi beklenmektedir (teorik olarak) (Yu vd., 2021). Anotta üretilen CO₂ gazı, H₂ ve diğer değerli ürünleri sentezlemek amacıyla gazlaştırma gibi çeşitli proseslerde yardımcı ürün olarak kullanılabilir. Karbondioksit gazı, gazlaştırma işleminde kömür, kanalizasyon atığı ve biyokütle gibi malzemelerle (700 ila 1500 °C arasında değişen sıcaklıklarda) reaksiyona girerek H₂, metan (CH₄) ve karbon monoksit (CO) içeren katma değerli sentetik gaz üretmek için kullanılabilir (Mishra, Gautam ve Sharma, 2018; Midilli vd., 2021). Yan ürün CO₂, gazlaştırma prosesinin yanı sıra CO₂ hidrojenasyonu yoluyla metanol (Atsonios, Panopoulos, ve Kakaras, 2016a, s.61), etanol (Atsonios, Panopoulos, ve Kakaras, 2016b, s.61) ve hidrokarbonlardan meydana gelen çeşitli katma değerli kimyasal ürünlerin veya yakıtların (Ye vd., 2019; Saeidi vd., 2021) sentezinde kullanılabilir. ALPK'nün elektrokimyasal oksidasyonunun bir ürünü olan CO₂ gazı, atık bir yan ürün olarak değerlendirilmek yerine, çeşitli endüstrilerde değerli ürünlerin üretimi için bir hammadde olarak kullanılabilir. Bu yaklaşım, tesis veya sistemin genel verimliliğini artırırken karbon emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunabilir.

Atık lastiklerin vakum pirolizi ile, piroliz yağına ve kömürüne ek olarak önemli oranda sentez gazı da üretilmektedir. Toplam lastik kütlelerinin %8,89'una karşılık gelen sentez gazı (Tablo 4.1'de sunulmuştur) genel olarak H₂, CH₄, CO, CO₂ ve C₁-C₄ zincir uzunluğuna sahip hidrokarbonların değişen oranlardaki karışımından meydana gelmektedir (Laresgoiti vd., 2000). Bileşik yapısından dolayı piroliz gazı elektrik üretiminde kullanılabilmektedir (Czajczyńska vd., 2017). Ayrıca, piroliz ve gazlaştırma gibi işlemler 6000 – 1000 °C aralığındaki sıcaklıklarda reaksiyona giren piroliz gazının H₂ içeriğini artırabilir, bu da gazın yüksek H₂ içeriğine sahip olmasına ve değer kazanmasına katkıda bulunabilir (Lopez-Uribebarrenechea vd., 2020). Sonuç olarak, atık lastiklerin pirolizi ile üretilen sentetik gaz, içerdiği bileşikler nedeniyle değerli bir emtiadır ve çeşitli amaçlar için kullanılabilir.

Eskişehir ilinde, toplanan atık lastikler genellikle bir süre depolanır ve talep olması durumunda beton üretim tesislerinde kömür yerine enerji üretmek için yakılmaktadır.

Atık lastiklerin yakılması atmosfere önemli miktarda sülfür dioksit (SO ve SO_2), nitrojen dioksit (NO ve NO_x), aromatik hidrokarbonlar ve partikül madde gibi zehirli emisyonlar salarak havayı, toprağı ve tatlı su kaynaklarını kirletmektedir. Atık lastiklerin doğrudan yakılmasından ziyade sera gazı emisyonlarının salınımını azaltacak geri dönüşüm tekniklerinin benimsenmesi ve hataya geçirilmesi gerekmektedir. Çalışmalarda, atık lastiklerin yakılması yerine piroliz yoluyla geri dönüştürülmesi halinde, 521 kg karbondioksit (1 ton atık lastik için) eşdeğer daha az sera gazı emisyonu salındığı bildirilmiştir (Liu vd., 2025). Bu tez çalışmasında, atık lastiklerin doğrudan yakılmasına alternatif ve çevreci bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile atık lastik katma değerli bir ürün olan sürdürülebilir havacılık yakıtına dönüştürülmektedir. Bu durumda, çok daha az miktarlarda sera gazı emisyonu salınabilecektir. Ayrıca, atık lastiklerin uzun süre depolanmasının çevreye zarar verebileceği endişeleri de ele alınmıştır. Nihai çözüm, atık lastiklerin çevre dostu bir yaklaşım olan sürdürülebilir havacılık yakıtına dönüştürülmesidir.

5. DEĞERLENDİRMELER

Bu tez çalışmasında, Eskişehir ilinde (1817 ton/yıl) ve Türkiye genelinde (202.200 ton/yıl) toplanan atık lastiklerden sürdürülebilir havacılık yakıtı üretimi için bir model geliştirilmiştir. Önerilen modelde atık lastikler öncelikle piroliz işlemi ile yağ, kömür ve gaz ürünlerine dönüştürülmektedir. Daha sonra, atık lastik piroliz yağı rafineri prosesleriyle jet yakıtına dönüştürülürken, atık lastik piroliz kömürü elektrokimyasal oksidasyon yoluyla hidrojen üretmek için kullanılmıştır. Bu aşamalarda elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca verilmiştir.

- Vakum piroliz işleminden sonra atık lastikten elde edilen ham piroliz yağı, piroliz kömürü ve piroliz gazı ürünlerinin miktarı, toplam atık lastik kütlelerinin sırasıyla %46,38, %31,33 ve %8,89'dur. Yıllık 1817 ton atık lastik kütlesi için ham piroliz yağı, piroliz kömürü ve piroliz gazı ürünlerinin üretim miktarı sırasıyla 842,7 ton, 569,3 ton ve 161,5 ton olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak, ham atık lastik piroliz yağının kütlece %1,7'si kalıntı veya tortulardan oluşmaktadır. Bu kalıntılar filtre edildikten sonra toplam atık lastik piroliz yağı kütlesi yaklaşık 828,40 ton olarak belirlenmiştir. Yıllık 202.200 ton atık lastik kütlesi için ham piroliz yağı, piroliz kömürü ve piroliz gazı ürünlerinin üretim miktarı sırasıyla 93.780 ton, 63.349 ton ve 17.976 ton olarak hesaplanırken, filtre edilmiş atık lastik piroliz yağı kütlesi yaklaşık 92.183 tondur.
- Filtre edilmiş atık lastik piroliz yağının rafine edilmesi sırasında yağın bileşimine bağlı olarak değişen oranlarda hidrojen tüketilmektedir. Hidrodenitrojenasyon, hidrodesülfürizasyon ve hidrodearomatizasyon işlemleri sırasında 1000 g atık lastik piroliz yağını sürdürülebilir havacılık yakıtına dönüştürmek için 40,99 g ile 52,72 g aralığında hidrojen gerektiği belirlenmiştir. 828,40 ton atık lastik piroliz yağının rafine etmek için 33,95 ile 43,67 ton arasında hidrojen tüketildiği hesaplanırken 92183 ton atık lastik piroliz yağının rafine etmek için 3779 ile 4860 ton arasında hidrojen tüketildiği belirlenmiştir.
- Hidrodenitrojenasyon, hidrodesülfürizasyon ve hidrodearomatizasyon işlemleri sırasında atık lastik piroliz yağının içeriğinden nitrojen ve sülfür elementleri giderilirken hidrojen eklenmiştir. Hidrodenitrojenasyon ve hidrodesülfürizasyon işlemleri ile giderilen nitrojen ve sülfür toplam kütleden çıkarılırken hidrodearomatizasyon sırasında bağlanan hidrojen toplam kütleyle dahil edilmiştir. Bu hidro-işlemlerden sonra 828,40 ton rafine edilmiş atık lastik piroliz

yağından yıllık 843,41 ila 853,13 ton (1054,262 ila 1066,412 m³) aralığında sürdürülebilir havacılık yakıtı üretildiği hesaplanırken 92183 ton rafine edilmiş atık lastik piroliz yağından yıllık 93853 ila 94938 ton (117316,25 ila 118672,50 m³) aralığında sürdürülebilir havacılık yakıtı üretildiği hesaplanmıştır.

- Önerilen modelde, Eskişehir ilinde kurulacak 225 kg/saat ve 8088 saat/yıl kapasiteli bir tesisin üreteceği yakıtın en düşük satış fiyatı ASTM D1655 ve ASTM D7566 senaryolarına göre sırasıyla 0,7990-1,2104 \$/L ve 0,8736-1,2634 \$/L aralığındadır. Türkiye genelinde kurulacak 25000 kg/saat ve 8088 saat/yıl kapasiteli merkezi bir tesis ile ASTM D1655 ve ASTM D7566'da belirtilen standartlara göre üretilen yakıtın en düşük satış fiyatı sırasıyla 0,5627-0,9568 \$/L ve 0,6221-1,0125 \$/L aralığındadır. ASTM D7566 senaryosunda tüketilen hidrojen miktarı (~52,75 g/1000 g piroliz yağı) ASTM D1655 senaryosunda tüketilen hidrojen miktarından (~40,99 g/1000 g piroliz yağı) daha fazladır. Bunun bir sonucu olarak, yakıtın birim maliyeti ASTM D7566 senaryosunda daha yüksektir. Ayrıca, daha yüksek kapasiteli tesiste düşük kapasiteli tesise kıyasla birim hammadde başına hem daha işçi hem de daha az sermaye harcaması gereklidir. Bu durum, yüksek kapasiteli tesisteki yakıt üretim maliyetlerinin düşmesine katkı sunmuştur.
- Hidrojenin yakıt maliyeti üzerindeki etkisi tesis kapasitesine ve ASTM senaryosuna göre değişmektedir. Saatte 225 kg ve yılda 8088 saat kapasiteli bir tesiste, ASTM D1655 senaryosuna göre hidrojen maliyeti, üretilen yakıt maliyetinin yaklaşık %20 ila %30'udur. ASTM D7566 senaryosuna göre, hidrojen maliyeti üretilen yakıt maliyetinin yaklaşık %23,8 ila %34,5'idir. Saatte 25000 kg ve yılda 8088 saat kapasiteli tesis için ise, ASTM D1655 senaryosuna göre hidrojen maliyeti, yakıt maliyetinin yaklaşık %25,1 ila %42,7'sidir. ASTM D7566 senaryosuna göre, hidrojen maliyeti yakıt maliyetinin yaklaşık %29,7 ila %48,4'üdür.

KAYNAKÇA

- Abe, J. O., Popoola, A. P. I., Ajenifuja, E., and Popoola, O. M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International journal of hydrogen energy*, 44(29), 15072-15086. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>.
- Alvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Mkhize, N. M., Danon, B., Van der Gryp, P., ... and Olazar, M. (2017). Evaluation of the properties of tyre pyrolysis oils obtained in a conical spouted bed reactor. *Energy*, 128, 463-474. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.163>.
- Amikam, G., Fridman-Bishop, N., and Gendel, Y. (2020). Biochar-assisted iron-mediated water electrolysis process for hydrogen production. *ACS omega*, 5(49), 31908-31917. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04820>.
- Atsonios, K., Panopoulos, K. D., and Kakaras, E. (2016a). Investigation of technical and economic aspects for methanol production through CO₂ hydrogenation. *International Journal of hydrogen energy*, 41(4), 2202-2214. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.074>.
- Atsonios, K., Panopoulos, K. D., and Kakaras, E. (2016b). Thermocatalytic CO₂ hydrogenation for methanol and ethanol production: Process improvements. *international journal of hydrogen energy*, 41(2), 792-806. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.001>.
- Ayaz, S. K., Altuntas, O., and Caliskan, H. (2018). Effect of ammonia fuel fraction on the exergetic performance of a gas turbine. *Energy Procedia*, 144, 150-156. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.06.020>.
- Ayaz, S. K., Altuntas, O., and Caliskan, H. (2020). Thermoecologic assessment and life cycle-based environmental pollution cost analysis of microgas turbine. *Journal of Environmental Engineering*, 146(1), 04019096. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001611](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001611).
- Ayaz, S. K., Altuntas, O., and Caliskan, H. (2021). Enhanced life cycle modelling of a micro gas turbine fuelled with various fuels for sustainable electricity production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111323. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111323>.
- Baharudin, L., and James Watson, M. (2017). Hydrogen applications and research activities in its production routes through catalytic hydrocarbon conversion. *Reviews in Chemical Engineering*, 34(1), 43-72. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0040>.
- Banar, M., Özkan, A., Akyıldız, V., Cokaygil, Z., and Onay, Ö. (2015). Evaluation of solid product obtained from tire-derived fuel (TDF) pyrolysis as carbon black. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17, 125-134. <https://doi.org/10.1007/s10163-014-0233-2>.

- Callegari, A., Bolognesi, S., Cecconet, D., and Capodaglio, A. G. (2020). Production technologies, current role, and future prospects of biofuels feedstocks: A state-of-the-art review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(4), 384-436. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1629801>.
- Campuzano, F., Martínez, J. D., Agudelo Santamaría, A. F., Sarathy, S. M., and Roberts, W. L. (2023). Pursuing the end-of-life tire circularity: an outlook toward the production of secondary raw materials from tire pyrolysis oil. *Energy and Fuels*, 37(13), 8836-8866. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c00847>.
- Castañeda, L. C., Muñoz, J. A. D., and Ancheyta, J. (2011). Comparison of approaches to determine hydrogen consumption during catalytic hydrotreating of oil fractions. *Fuel*, 90(12), 3593-3601. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.047>.
- Chen, L., Nakamoto, R., Kudo, S., Asano, S., and Hayashi, J. I. (2019). Biochar-assisted water electrolysis. *Energy and Fuels*, 33(11), 11246-11252. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02925>.
- Chen, X., Ying, Z., Sun, H., Zheng, X., Dou, B., and Cui, G. (2025). Comparison of three-component co-pyrolytic char and corn straw biochar for assisting water electrolysis to achieve efficient hydrogen production. *Journal of Power Sources*, 630, 236138. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.236138>.
- Chen, Y. K., Lin, C. H., and Wang, W. C. (2020). The conversion of biomass into renewable jet fuel. *Energy*, 201, 117655. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117655>.
- Chi, J., and Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese journal of catalysis*, 39(3), 390-394. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8).
- Czajczyńska, D., Krzyżyńska, R., Jouhara, H., and Spencer, N. (2017). Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review. *Energy*, 134, 1121-1131. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.042>.
- Dai, X., Yin, X., Wu, C., Zhang, W., and Chen, Y. (2001). Pyrolysis of waste tires in a circulating fluidized-bed reactor. *Energy*, 26(4), 385-399. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00003-2).
- de Marco Rodriguez, I., Laresgoiti, M. F., Cabrero, M. A., Torres, A., Chomon, M. J., and Caballero, B. (2001). Pyrolysis of scrap tyres. *Fuel processing technology*, 72(1), 9-22. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00174-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00174-6).
- Dębek, C., and Walendziewski, J. (2015). Hydrotreating of oil from pyrolysis of whole tyres for passenger cars and vans. *Fuel*, 159, 659-665. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.07.024>.
- del Portal, X. R. (2010). On the qualitative properties of the optimal income tax. *Mathematical Social Sciences*, 59(3), 288-298. <https://doi.org/10.1016/j.mathsocsci.2009.11.005>.

- Dhooge, P. M., Stilwell, D. E., and Park, S. M. (1982). Electrochemical studies of coal slurry oxidation mechanisms. *Journal of the Electrochemical Society*, 129(8), 1719. <https://doi.org/10.1149/1.2124257>.
- Djandja, O. S., Wang, Z., Duan, P., Wang, F., and Xu, Y. (2021). Hydrotreatment of pyrolysis oil from waste tire in tetralin for production of high-quality hydrocarbon rich fuel. *Fuel*, 285, 119185. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119185>.
- Du, Y., Ying, Z., Zheng, X., Dou, B., and Cui, G. (2023). Efficient anodic biochar oxidation over three-dimensional self-support nickel-iron nanosheet on nickel foam in biochar-assisted water electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(3), 894-908. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.004>.
- Durna, E., Goncagül, K. O. Z., and Nevim, G. (2020). Türkiye’de ömrünü tamamlamış lastiklerin yönetiminde en uygun bertaraf seçeneğinin PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE yöntemi ile belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*. <https://doi.org/10.2339/politeknik.591100>.
- Elmalik, E. E., Raza, B., Warrag, S., Ramadhan, H., Alborzi, E., and Elbashir, N. O. (2014). Role of hydrocarbon building blocks on gas-to-liquid derived synthetic jet fuel characteristics. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(5), 1856-1865. <https://doi.org/10.1021/ie402486c>.
- El-Shafie, M. (2023). Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. *Results in Engineering*, 20, 101426. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426>.
- Ertürk, T., Arslan, A., Tunçer, E., Doğan, B., and Yeşilyurt, M. K. (2023). The assessment of performance and emissions characteristics of a CI engine running on waste tyre pyrolysis oil as an alternative fuel and its blends with diesel fuel. *International Journal of Energy Studies*, 8(4), 831-847. <https://doi.org/10.58559/ijes.1366789>.
- Ewan, B. C., and Adeniyi, O. D. (2013). A demonstration of carbon-assisted water electrolysis. *Energies*, 6(3), 1657-1668. <https://doi.org/10.3390/en6031657>.
- Fahim, M. A., Al-Sahhaf, T. A., and Elkilani, A. (2010). Fundamentals of petroleum refining. *Elsevier*, 11-31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52785-1.00002-4>.
- Fan, Y., Guan, J., He, D., Hong, Y., and Zhang, Q. (2023). The influence of inherent minerals on the constant-current electrolysis process of coal-water slurry. *Energy*, 285, 128766. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128766>.
- Fatehi, M., Campaldini, G., and Renzi, M. (2025). Micro gas turbine fed by ammonia with steam injection: Performance and combustion analysis. *Applied Thermal Engineering*, 264, 125428. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125428>.
- Frigo, S., Seggiani, M., Puccini, M., and Vitolo, S. (2014). Liquid fuel production from waste tyre pyrolysis and its utilisation in a Diesel engine. *Fuel*, 116, 399-408. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.044>.

- Gu, X., Ying, Z., Zheng, X., Du, Y., Sun, H., Chen, X., ... and Cui, G. (2024). Electrochemical activation of biochar and energy-saving hydrogen production by regulation of biochar-assisted water electrolysis. *Energy Conversion and Management*, 300, 117885. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117885>.
- Gunerhan, A., Altuntas, O., and Açıkkalp, E. (2025). A comprehensive analysis of the production of H₂ and value-added chemicals from the electrolysis of biomass and derived feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 192, 107510. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107510>.
- Gunerhan, A., Altuntas, O., and Caliskan, H. (2023). Utilization of renewable and sustainable aviation biofuels from waste tyres for sustainable aviation transport sector. *Energy*, 276, 127566. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127566>.
- Gunerhan, A., Altuntas, O., and Caliskan, H. (2024). Analyzing the influence of feedstock selection in pyrolysis on aviation gas turbine engines: A study on performance, combustion efficiency, and emission profiles. *Energy*, 306, 132513. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132513>.
- Hita, I., Gutiérrez, A., Olazar, M., Bilbao, J., Arandes, J. M., and Castaño, P. (2015a). Upgrading model compounds and Scrap Tires Pyrolysis Oil (STPO) on hydrotreating NiMo catalysts with tailored supports. *Fuel*, 145, 158-169. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.055>.
- Hita, I., Rodríguez, E., Olazar, M., Bilbao, J., Arandes, J. M., and Castaño, P. (2015b). Prospects for obtaining high quality fuels from the hydrocracking of a hydrotreated scrap tires pyrolysis oil. *Energy and Fuels*, 29(8), 5458-5466. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01181>.
- Howe, D., Westover, T., Carpenter, D., Santosa, D., Emerson, R., Deutch, S., ... and Lukins, C. (2015). Field-to-fuel performance testing of lignocellulosic feedstocks: an integrated study of the fast pyrolysis–hydrotreating pathway. *Energy and Fuels*, 29(5), 3188-3197. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00304>.
- Huang, Y., Zhou, W., Xie, L., Li, J., He, Y., Chen, S., ... and Qin, Y. (2022). Edge and defect sites in porous activated coke enable highly efficient carbon-assisted water electrolysis for energy-saving hydrogen production. *Renewable Energy*, 195, 283-292. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.037>.
- İlkılıç, C., and Aydın, H. (2011). Fuel production from waste vehicle tires by catalytic pyrolysis and its application in a diesel engine. *Fuel Processing Technology*, 92(5), 1129-1135. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.01.009>.
- İMARÇ. Ammonia Prices, Trend, Chart, Demand, Market Analysis, News, Historical and Forecast Data Report 2025 Edition, <https://www.imarcgroup.com/ammonia-pricing-report>, 2025, Erişim tarihi: 20.06.2025.
- Jang, D., Kim, J., Kim, D., Han, W. B., and Kang, S. (2022). Techno-economic analysis and Monte Carlo simulation of green hydrogen production technology through

- various water electrolysis technologies. *Energy Conversion and Management*, 258, 115499. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115499>.
- Jang, J. W., Yoo, T. S., Oh, J. H., and Iwasaki, I. (1998). Discarded tire recycling practices in the United States, Japan and Korea. *Resources, conservation and recycling*, 22(1-2), 1-14. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(97\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(97)00041-4).
- Jie, Z. H. O. U., Jingdai, W. A. N. G., Xiaohong, R. E. N., and Yongrong, Y. A. N. G. (2006). Surface modification of pyrolytic carbon black from waste tires and its use as pigment for offset printing ink. *Chinese journal of chemical engineering*, 14(5), 654-659. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(06\)60130-4](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(06)60130-4).
- Khan, W., Shyamal, D. S., and Kazmi, A. A. (2024). Management of end-of-life tyres in India: current practices, regulatory framework, challenges, and opportunities. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(3), 1310-1325. <https://doi.org/10.1007/s10163-024-01937-3>.
- Kou, K., Zhou, W., Chen, S., and Gao, J. (2021). Mechanism investigation of carboxyl functional groups catalytic oxidation in coal assisted water electrolysis cell. *Energy*, 226, 120243. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120243>.
- Kyari, M., Cunliffe, A., and Williams, P. T. (2005). Characterization of oils, gases, and char in relation to the pyrolysis of different brands of scrap automotive tires. *Energy and Fuels*, 19(3), 1165-1173. <https://doi.org/10.1021/ef049686x>.
- Lahijani, P., Mohammadi, M., and Mohamed, A. R. (2019). Investigation of synergism and kinetic analysis during CO₂ co-gasification of scrap tire char and agro-wastes. *Renewable Energy*, 142, 147-157. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.113>.
- Laresgoiti, M. F., Caballero, B. M., de Marco, I., Torres, A., Cabrero, M. A., and Chomón, M. J. (2004). Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 71(2), 917-934. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2003.12.003>.
- Laresgoiti, M. F., de Marco, I., Torres, A., Caballero, B., Cabrero, M. A., and Chomón, M. J. (2000). Chromatographic analysis of the gases obtained in tyre pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 55(1), 43-54. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(99\)00073-X](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(99)00073-X).
- Lau, J. I. C., Wang, Y. S., Ang, T., Seo, J. C. F., Khadaroo, S. N., Chew, J. J., ... and Sunarso, J. (2024). Emerging technologies, policies and challenges toward implementing sustainable aviation fuel (SAF). *Biomass and Bioenergy*, 186, 107277. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107277>.
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C., Lim, L. L., ... and Sausen, R. (2009). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric environment*, 43(22-23), 3520-3537. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024>.

- Lefebvre, A. H., Ballal, D. R. (2010). Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions. 3rd ed. Boca Raton: CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781420086058>
- Lewandowski, W. M., Januszewicz, K., and Kosakowski, W. (2019). Efficiency and proportions of waste tyre pyrolysis products depending on the reactor type—A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 140, 25-53. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.03.018>.
- Li, F., Jiang, J., Liu, P., Zhai, Q., Wang, F., Hse, C. Y., and Xu, J. (2018). Catalytic cracking of triglycerides with a base catalyst and modification of pyrolytic oils for production of aviation fuels. *Sustainable Energy and Fuels*, 2(6), 1206-1215. <https://doi.org/10.1039/C7SE00505A>.
- Li, S. Q., Yao, Q., Chi, Y., Yan, J. H., and Cen, K. F. (2004). Pilot-scale pyrolysis of scrap tires in a continuous rotary kiln reactor. *Industrial and engineering chemistry research*, 43(17), 5133-5145. <https://doi.org/10.1021/ie030115m>.
- Li, W., Huang, C., Li, D., Huo, P., Wang, M., Han, L., ... and Wang, M. (2016). Derived oil production by catalytic pyrolysis of scrap tires. *Chinese Journal of Catalysis*, 37(4), 526-532. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)60998-6](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)60998-6).
- Lim, S. H., and Hong, Y. (2014). Fuel hedging and airline operating costs. *Journal of air transport management*, 36, 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2013.12.009>.
- Liu, Q., Bai, X., Su, X., Huang, B., Wang, B., Zhang, X., ... and Qian, G. (2020a). The promotion effect of biochar on electrochemical degradation of nitrobenzene. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118890. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118890>.
- Liu, C., Ren, J., Hu, Y., Song, J., Yang, W. (2025). Future projections and life cycle assessment of end-of-life tires to energy conversion in Hong Kong: Environmental, climate and energy benefits for regional sustainability. *Sustain Prod Consump*, 55, 328-339. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.03.001>.
- Liu, Y. C., and Wang, W. C. (2020b). Process design and evaluations for producing pyrolytic jet fuel. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 14(2), 249-264. <https://doi.org/10.1002/bbb.2061>.
- López, G., Olazar, M., Artetxe, M., Amutio, M., Elordi, G., and Bilbao, J. (2009). Steam activation of pyrolytic tyre char at different temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85(1-2), 539-543. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.002>
- Lopez-Uribebarrenechea, A., Gastelu, N., Acha, E., Caballero, B. M., Orue, A., Jiménez-Suárez, A., ... and De Marco, I. (2020). Reclamation of carbon fibers and added-value gases in a pyrolysis-based composites recycling process. *Journal of cleaner production*, 273, 123173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123173>.

- Lou, M., Wang, R., and Song, H. (2024). Advances and challenges toward efficient utilization of H₂S for H₂ production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114529. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114529>.
- Luo, H., Barrio, J., Sunny, N., Li, A., Steier, L., Shah, N., ... and Titirici, M. M. (2021). Progress and perspectives in photo-and electrochemical-oxidation of biomass for sustainable chemicals and hydrogen production. *Advanced Energy Materials*, 11(43), 2101180. <https://doi.org/10.1002/aenm.202101180>.
- Mahmood, A., Khushnood, R. A., and Zeeshan, M. (2020). Pyrolytic carbonaceous reinforcements for enhanced electromagnetic and fracture response of cementitious composites. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119288>.
- Martínez, J. D., Lapuerta, M., García-Contreras, R., Murillo, R., and García, T. (2013a). Fuel properties of tire pyrolysis liquid and its blends with diesel fuel. *Energy and Fuels*, 27(6), 3296-3305. <https://doi.org/10.1021/ef400602e>.
- Martínez, J. D., Puy, N., Murillo, R., García, T., Navarro, M. V., and Mastral, A. M. (2013b). Waste tyre pyrolysis—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 23, 179-213.
- Massaro, M. C., Biga, R., Kolisnichenko, A., Marocco, P., Monteverde, A. H. A., and Santarelli, M. (2023). Potential and technical challenges of on-board hydrogen storage technologies coupled with fuel cell systems for aircraft electrification. *Journal of Power Sources*, 555, 232397. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232397>.
- Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M. E., Akbulut, U., and Dincer, I. (2021). A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(50), 25385-25412. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.088>.
- Mikulski, M., Ambrosewicz-Walacik, M., Hunicz, J., and Nitkiewicz, S. (2021). Combustion engine applications of waste tyre pyrolytic oil. *Progress in Energy and Combustion Science*, 85, 100915. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100915>.
- Mirmiran, S., Pakdel, H., and Roy, C. (1992). Characterization of used tire vacuum pyrolysis oil: nitrogenous compounds from the naphtha fraction. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 22(3), 205-215. [https://doi.org/10.1016/0165-2370\(92\)85014-C](https://doi.org/10.1016/0165-2370(92)85014-C).
- Mishra, A., Gautam, S., and Sharma, T. (2018). Effect of operating parameters on coal gasification. *International Journal of Coal Science and Technology*, 5, 113-125. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0196-3>.
- Mohan, A., Dutta, S., and Madav, V. (2019). Characterization and upgradation of crude tire pyrolysis oil (CTPO) obtained from a rotating autoclave reactor. *Fuel*, 250, 339-351. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.139>.

- Mui, E. L., Ko, D. C., and McKay, G. (2004). Production of active carbons from waste tyres—a review. *Carbon*, 42(14), 2789-2805. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.06.023>.
- Narayanan, K. V., and Lakshmikutty, B. (2017). Stoichiometry and process calculations. 2nd ed. Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd..
- Nguyen, T., Abdin, Z., Holm, T., and Mérida, W. (2019). Grid-connected hydrogen production via large-scale water electrolysis. *Energy conversion and management*, 200, 112108. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112108>.
- Ogasawara, S., Kuroda, M., and Wakao, N. (1987). Preparation of activated carbon by thermal decomposition of used automotive tires. *Industrial and engineering chemistry research*, 26(12), 2552-2556. <https://doi.org/10.1021/ie00072a030>.
- Olukayode, N., Yang, W., Xiang, K., Ye, S., Sun, Z., Han, Z., and Sui, S. (2022). A Novel Chemical–Electrochemical Hydrogen Production from Coal Slurry by a Two-Step Process: Oxidation of Coal by Ferric Ions and Electroreduction of Hydrogen Ions. *ACS omega*, 7(9), 7865-7873. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06759>.
- Pakdel, H., Pantea, D. M., and Roy, C. (2001). Production of dl-limonene by vacuum pyrolysis of used tires. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 57(1), 91-107. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(00\)00136-4](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(00)00136-4).
- Palos, R., Kekäläinen, T., Duodu, F., Gutiérrez, A., Arandes, J. M., Jänis, J., and Castaño, P. (2019). Screening hydrotreating catalysts for the valorization of a light cycle oil/scrap tires oil blend based on a detailed product analysis. *Applied Catalysis B: Environmental*, 256, 117863. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.117863>.
- Portofino, S., Donatelli, A., Iovane, P., Innella, C., Civita, R., Martino, M., ... and Galvagno, S. (2013). Steam gasification of waste tyre: Influence of process temperature on yield and product composition. *Waste management*, 33(3), 672-678. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.041>.
- Preciado-Hernandez, J., Zhang, J., Jones, I., Zhu, M., Zhang, Z., and Zhang, D. (2021). An experimental study of gasification kinetics during steam activation of a spent tyre pyrolysis char. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105306. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105306>.
- Qiang, S. S., and Wang, W. C. (2020). Experimental and techno-economic studies of upgrading heavy pyrolytic oils from wood chips into valuable fuels. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124136>.
- Qiao, Y., Chen, Z., Wu, X., Zheng, Y., Guan, S., Li, J., ... and Li, Z. (2022). Analysis of comprehensive utilization of waste tire pyrolysis char by combustion method. *Fuel*, 312, 122996. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122996>.
- Ramarad, S., Khalid, M., Ratnam, C. T., Chuah, A. L., and Rashmi, W. (2015). Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future. *Progress in Materials Science*, 72, 100-140. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.02.004>.

- Rogachuk, B. E., and Okolie, J. A. (2024). Comparative assessment of pyrolysis and Gasification-Fischer Tropsch for sustainable aviation fuel production from waste tires. *Energy Conversion and Management*, 302, 118110. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118110>.
- Roy, C., Chaala, A., and Darmstadt, H. (1999). The vacuum pyrolysis of used tires: End-uses for oil and carbon black products. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 51(1-2), 201-221. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(99\)00017-0](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(99)00017-0).
- Sabareeswaran, S., Balaji, R., Ramya, K., Rajalakshmi, N., and Dhathathereyan, K. S. (2013, June). Carbon assisted water electrolysis for hydrogen generation. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1538, No. 1, pp. 43-47). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.4810030>.
- Saeidi, S., Najari, S., Hessel, V., Wilson, K., Keil, F. J., Concepción, P., ... and Rodrigues, A. E. (2021). Recent advances in CO₂ hydrogenation to value-added products—Current challenges and future directions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 85, 100905. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100905>.
- Sajdak, M., Majewski, A. J., Sobek, S., Gałko, G., and Ouadi, M. (2025). Design of experiments method into upgrading pyrolytic oil for sustainable aviation fuel additives by hydrotreating and hydrocracking. *Waste Management*, 194, 258-269. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.01.012>.
- Sathiskumar, C., and Karthikeyan, S. (2019). Recycling of waste tires and its energy storage application of by-products—a review. *Sustainable Materials and Technologies*, 22, e00125. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00125>.
- Seljak, T., and Katrašnik, T. (2016). Designing the microturbine engine for waste-derived fuels. *Waste management*, 47, 299-310. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.004>.
- Seljak, T., Oprešnik, S. R., and Katrašnik, T. (2014). Microturbine combustion and emission characterisation of waste polymer-derived fuels. *Energy*, 77, 226-234. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.07.020>.
- Seljak, T., Širok, B., and Katrašnik, T. (2016). Advanced fuels for gas turbines: Fuel system corrosion, hot path deposit formation and emissions. *Energy conversion and management*, 125, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.056>.
- Seng-eiad, S., and Jitkarnka, S. (2016). Untreated and HNO₃-treated pyrolysis char as catalysts for pyrolysis of waste tire: In-depth analysis of tire-derived products and char characterization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 122, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.10.004>.
- Shafiee, S., and Topal, E. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished?. *Energy policy*, 37(1), 181-189. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.016>.
- Sienkiewicz, M., Kucinska-Lipka, J., Janik, H., and Balas, A. (2012). Progress in used tyres management in the European Union: A review. *Waste management*, 32(10), 1742-1751. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.01>.

- Singh, R. K., Ruj, B., Jana, A., Mondal, S., Jana, B., Sadhukhan, A. K., and Gupta, P. (2018). Pyrolysis of three different categories of automotive tyre wastes: Product yield analysis and characterization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 135, 379-389. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.08.011>.
- Srinivasan, S., Rajapaksha, A. U., Ashiq, A., de Magalhães Oliveira, L. M. T., Lins, P. V., Meili, L., and Selvasembian, R. (2024). Towards sustainable approach of the waste tyres employment in water pollutant sequestrations. *Journal of Cleaner Production*, 141930. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141930>.
- Straka, P., Auersvald, M., Vrtiška, D., Kittel, H., Šimáček, P., and Vozka, P. (2023). Production of transportation fuels via hydrotreating of scrap tires pyrolysis oil. *Chemical engineering journal*, 460, 141764. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141764>.
- Suchocki, T. (2024). Sustainable Energy Application of Pyrolytic Oils from Plastic Waste in Gas Turbine Engines: Performance, Environmental, and Economic Analysis. *Sustainability* (2071-1050), 16(19). <https://doi.org/10.3390/su16198566>.
- Suchocki, T., Lampart, P., Kazimierski, P., Januszewicz, K., and Gawron, B. (2021). Experimental investigation of performance and emission characteristics of a miniature gas turbine supplied by blends of kerosene and waste tyre pyrolysis oil. *Energy*, 215, 119125. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119125>.
- Sun, H., Ying, Z., Chen, X., Zheng, X., Dou, B., and Cui, G. (2025). Effects of pretreatment on biochar oxidation reaction and hydrogen production in lignocellulosic biochar-assisted water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 99, 752-760. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.275>.
- Suresh, R., Rajendran, S., Dutta, K., Khoo, K. S., and Soto-Moscoso, M. (2023). An overview on light assisted techniques for waste-derived hydrogen fuel towards aviation industry. *Fuel*, 334 (Part 1), 126645. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126645>.
- Tamizhdurai, P., Arthi, P., Mangesh, V. L., Krishnan, P. S., Kumar, N. S., Saravanan, P., ... and Kumaran, R. (2025). Clean energy technology: Hydro-processing of waste tyre pyrolysis oil (WTPO) to diesel fuel in a continuous reactor using Co/SBA-15 catalyst. *Applications in Energy and Combustion Science*, 21, 100305. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2024.100305>.
- Türkiye Cumhuriyeti Eskişehir Valiliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü. Eskişehir İli 2022 Yılı Çevre Durum Raporu. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/esk-seh-r -cdr2022-20230823154540.pdf>, 2023, Erişim tarihi: 20.02.2025.
- Valentini, F., and Pegoretti, A. (2022). End-of-life options of tyres. A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 5(4), 203-213. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.08.006>.

- Vasiliu, L., Gencel, O., Damian, I., and Harja, M. (2023). Capitalization of tires waste as derived fuel for sustainable cement production. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103104. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103104>.
- Wang, B., Zheng, H. B., Zeng, D. W., Fu, Y. F., Qiu, Y., and Xiao, R. (2021a). Microwave fast pyrolysis of waste tires: Effect of microwave power on product composition and quality. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155, 104979. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104979>.
- Wang, J., Bi, P., Zhang, Y., Xue, H., Jiang, P., Wu, X., ... and Li, Q. (2015). Preparation of jet fuel range hydrocarbons by catalytic transformation of bio-oil derived from fast pyrolysis of straw stalk. *Energy*, 86, 488-499. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.053>.
- Wang, M., Zhang, L., Li, A., Irfan, M., Du, Y., and Di, W. (2019). Comparative pyrolysis behaviors of tire tread and side wall from waste tire and characterization of the resulting chars. *Journal of environmental management*, 232, 364-371. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.091>.
- Wang, W. C., Liu, Y. C., and Nugroho, R. A. A. (2022). Techno-economic analysis of renewable jet fuel production: The comparison between Fischer-Tropsch synthesis and pyrolysis. *Energy*, 239, 121970. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121970>.
- Wang, Z., Burra, K. G., Lei, T., and Gupta, A. K. (2021b). Co-pyrolysis of waste plastic and solid biomass for synergistic production of biofuels and chemicals-A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 84, 100899. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100899>.
- Ward, J. W. (1993). Hydrocracking processes and catalysts. *Fuel Processing Technology*, 35(1-2), 55-85. [https://doi.org/10.1016/0378-3820\(93\)90085-I](https://doi.org/10.1016/0378-3820(93)90085-I).
- Watson, M. J., Machado, P. G., Da Silva, A. V., Saltar, Y., Ribeiro, C. O., Nascimento, C. A. O., and Dowling, A. W. (2024). Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: A critical review. *Journal of cleaner production*, 449, 141472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141472>.
- Wildschut, J., Mahfud, F. H., Venderbosch, R. H., and Heeres, H. J. (2009). Hydrotreatment of fast pyrolysis oil using heterogeneous noble-metal catalysts. *Industrial and engineering chemistry research*, 48(23), 10324-10334. <https://doi.org/10.1021/ie9006003>.
- Wu, X., Jiang, P., Jin, F., Liu, J., Zhang, Y., Zhu, L., ... and Li, Q. (2017). Production of jet fuel range biofuels by catalytic transformation of triglycerides based oils. *Fuel*, 188, 205-211. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.030>.
- Wu, Y., Guo, S., Wang, J., Xu, J., and Ding, M. (2025). Production of Jet Fuel Range Aromatics by Alkylation of Benzene with Olefins over Bifunctional Ga/ZSM-5 Catalyst. *Chemsuschem*, 18(2), e202401279. <https://doi.org/10.1002/cssc.202401279>.

- Xiao, Z., Pramanik, A., Basak, A. K., Prakash, C., and Shankar, S. (2022). Material recovery and recycling of waste tyres-A review. *Cleaner Materials*, 5, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100115>.
- Xin, C., Zhao, J., Ruan, R., Addy, M. M., Liu, S., and Mu, D. (2018). Economical feasibility of bio-oil production from sewage sludge through pyrolysis. *Thermal Science*, 22(Suppl. 2), 459-467. <https://doi.org/10.2298/TSCI170921258X>.
- Yahya, S. A., and Omar, M. M. (2024). Technoeconomic analysis: the potential and opportunities of transforming Saudi Arabian scrap tires into synthetic fuel via vacuum pyrolysis. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1415901. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1415901>.
- Ye, R. P., Ding, J., Gong, W., Argyle, M. D., Zhong, Q., Wang, Y., ... and Yao, Y. G. (2019). CO₂ hydrogenation to high-value products via heterogeneous catalysis. *Nature communications*, 10(1), 5698. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13638-9>.
- Ying, Z., Chen, X., Gu, X., Sun, H., Zheng, X., Dou, B., and Cui, G. (2024). Electrochemical upcycling of biochar particles at anode-electrolyte interface in biochar-assisted water electrolysis for hydrogen production. *Chemical Engineering Journal*, 498, 155681. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155681>.
- Ying, Z., Geng, Z., Zheng, X., Dou, B., and Cui, G. (2021). Enhancing biochar oxidation reaction with the mediator of Fe²⁺/Fe³⁺ or NO₂-/NO₃-for efficient hydrogen production through biochar-assisted water electrolysis. *Energy Conversion and Management*, 244, 114523. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114523>.
- Yu, P., Jiang, H., Peng, R., Ma, H., Zheng, R., Zhang, J. Z., and Botte, G. G. (2021). Novel Pd–Cr electrocatalyst with low Pd content for coal electrolysis for hydrogen production. *Journal of Power Sources*, 483, 229175. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229175>.
- Zhang, X., Wang, T., Ma, L., and Chang, J. (2008). Vacuum pyrolysis of waste tires with basic additives. *Waste Management*, 28(11), 2301-2310. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.009>.
- Zheng, X., Chang, J., and Fu, Y. (2015). One-pot catalytic hydrocracking of diesel distillate and residual oil fractions obtained from bio-oil to gasoline-range hydrocarbon fuel. *Fuel*, 157, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.002>.
- Zhou, Q., Zarei, A., De Girolamo, A., Yan, Y., and Zhang, L. (2019). Catalytic performance of scrap tyre char for the upgrading of eucalyptus pyrolysis derived bio-oil via cracking and deoxygenation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 139, 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.02.001>.
- Zhou, W., Chen, S., Meng, X., Li, J., Huang, Y., Gao, J., ... and Qin, Y. (2022). Two-step coal-assisted water electrolysis for energy-saving hydrogen production at cell voltage of 1.2 V with current densities larger than 150 mA/cm². *Energy*, 260, 125145. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125145>.

http-1: <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-12-10-03/> (Erişim tarihi: 03.03.2025)

http-2: <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-06-06-01/> (Erişim tarihi: 04.03.2025)

http-3: <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/sustainable-aviation-fuels/> (Erişim tarihi: 03.03.2025)



ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0001-6554-6790

Ad Soyad : Ali GÜNERHAN

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- Yıl, Üniversite, Enstitü/Fakülte, Bölüm, Anabilim Dalı
- 2010, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir Meslek Yüksekokulu, Elektronik Haberleşme Teknolojisi, Ön Lisans
- 2017, Anadolu Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü, Lisans
- 2021, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans
- 2025, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sivil Havacılık Anabilim Dalı, Doktora
- 2020 – 2021, Araştırma Görevlisi, Nişantaşı Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü
- 2020 – Devam Ediyor, Araştırma Görevlisi, Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzun Bilimleri Fakültesi, Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü

SCI, SSCI ve AHCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayımlanan Makaleler

- Gunerhan, A., Altuntas, O., and Caliskan, H. (2023). Utilization of renewable and sustainable aviation biofuels from waste tyres for sustainable aviation transport sector. *Energy*, 276, 127566.
- Gunerhan, A., and Genc Oztoprak, B. (2024). Production of super-hydrophobic Al2O3-TiO2 surfaces by using nanosecond fiber laser. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(12), 5895-5913.
- Guven, T. B., Degirmenci, H., Gunerhan, A., and Altuntas, O. (2024). Energy efficiency and sustainability: Implementing circular economy principles for cabin waste management in aviation. *Energy for Sustainable Development*, 81, 101515.

- Gunerhan, A., Altuntas, O., and Caliskan, H. (2024). Analyzing the influence of feedstock selection in pyrolysis on aviation gas turbine engines: A study on performance, combustion efficiency, and emission profiles. *Energy*, 306, 132513.
- Gunerhan, A., Altuntas, O., and Açikkalp, E. (2025). A comprehensive analysis of the production of H₂ and value-added chemicals from the electrolysis of biomass and derived feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 192, 107510.
- Gunerhan, A., Altuntas, O., and Caliskan, H. (2025). A Case Study of Sustainable Aviation Fuel Production from Scrap Tyres. *Energy*, 327, 136415.

Hakemli Bilimsel Toplantılarda Yayımlanmış Bildiriler:

- 2020, Sözlü Bildiri (Uluslararası), Gunerhan, A., and Genç Öztoprak, B., (2020). *Modification of Surface Properties of Al 2024 Alloy By Using Nanosecond Fiber Laser*. TURKISH PHYSICAL SOCIETY 36TH INTERNATIONAL PHYSICS CONGRESS (pp.61). Muğla, Turkey
- 2022, Sözlü Bildiri (Uluslararası), Gunerhan, A., Altuntas, O., and Caliskan, H., (2022). Use of ASTM Certified Alternative Jet Fuels in Aviation Gas Turbine Engines. *Aviation In The XXI-st Century 2022* (pp.15-19). KYIV, Ukraine
- 2023, Sözlü Bildiri (Uluslararası), Gunerhan, A., Altuntas, O., and Caliskan, H., (2023). Determination of Production Processes of ASTM-Compliant Bio-jet Fuel from Waste Tyre Feedstock. *The 6th International Conference on Alternative Fuels, Energy and Environment (ICAFEE 2023): Future and Challenges*, Kayseri, Turkey
- 2023, Sözlü Bildiri (Uluslararası), Gunerhan, A., Altuntas, O., and Caliskan, H., (2023). A Comprehensive Review of The Impact of Feedstock Chosen in The Pyrolysis Process on The Emissions of Gas Turbine Engines. *11th Global Conference on Global Warming* (pp.43-47). İstanbul, Turkey
- 2023, Sözlü Bildiri (Uluslararası), Guven, T. B., Degirmenci, H., Gunerhan, A., and Altuntas, O., (2023). Towards Zero Waste with the Circular Economy at Airports. *The 6th International Conference on Alternative Fuels, Energy and Environment (ICAFEE 2023): Future and Challenges* (pp.415-416). Kayseri, Turkey

- 2024, Sözlü Bildiri (Uluslararası), Gunerhan, A., Degirmenci, H., Guven, T. B., and Altuntas, O., (2024). RECYCLING OF AEROSPACE CFRP COMPOSITES THROUGH PYROLYSIS. INTERNATIONAL CONFERENCE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS (ICAA'24) (pp.5-6). Konya, Turkey
- 2024, Sözlü Bildiri (Uluslararası), Gunerhan, A., Altuntas, O., and Caliskan, H., (2024). A REVIEW ON H₂ PRODUCTION FROM PYROLYTIC BIOCHAR VIA ELECTROCHEMICAL OXIDATION. 19. Uluslararası İstanbul Fen, Mühendislik, Mimarlık ve Matematik Bilimlerinde Bilimsel Araştırmalar Kongresi (pp.517-530). İstanbul, Turkey

