

**TÜRK HAVA KURUMU ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**HAVACILIK SEKTÖRÜNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAKITLARIN
KULLANIMI ÜZERİNE AMPİRİK BİR ANALİZ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre Oğuzhan POLAT

Havacılık Yönetimi Anabilim Dalı

Havacılık Yönetimi Programı

HAZİRAN 2023

**TÜRK HAVA KURUMU ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**HAVACILIK SEKTÖRÜNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAKITLARIN
KULLANIMI ÜZERİNE AMPİRİK BİR ANALİZ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Emre Oğuzhan POLAT
2108051011**

Havacılık Yönetimi Anabilim Dalı

Havacılık Yönetimi Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yaşar KÖSE

Türk Hava Kurumu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü'nün 2108051011 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Emre Oğuzhan POLAT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “HAVACILIK SEKTÖRÜNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAKITLARIN KULLANIMI ÜZERİNE AMPİRİK BİR ANALİZ” başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Yaşar KÖSE

Türk Hava Kurumu Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sedat YENİCE

Hacı Bayram Veli Üniversitesi

Doç. Dr. Yaşar KÖSE

Türk Hava Kurumu Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Özkan YAVUZYILMAZ

Türk Hava Kurumu Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 2023

**TÜRK HAVA KURUMU ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ'NE**

“Yüksek Lisans olarak sunduğum”, “Havacılık Sektöründe Sürdürülebilir Yakıtların Kullanımı Üzerine Ampirik Bir Analiz” “adlı çalışmanın, tarafımdan akademik etik ve kurallara aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın yazıldığını ve yararlandığım kaynakların kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanmış olduğunu belirtir ve bunu onurumla doğrularım”.

Tarih

Emre Oğuzhan POLAT

İmza

ÖNSÖZ

Öncelikle, yüksek lisans eğitimime en değerli katkıları sağlayan, tez konumu belirleme aşamasından itibaren bilgi ve deneyimleri ile beni her adımda destekleyen ve yüreklendiren; çalışma disiplini ve zaman tanzimi yapma konusunda kendisinin örnek aldığı, Doç. Dr. Yaşar KÖSE'ye sağlamış olduğu destek ve her türlü yardımından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmam süresince gerek araştırma gerekse manevi bakımdan tüm süreçte yanımda olan eşim Derya POLAT'a, kızlarım Asya ve Ceren'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Emre Oğuzhan POLAT

İÇİNDEKİLER

TÜRK HAVA KURUMU ÜNİVERSİTESİ	1
ÖNSÖZ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
GİRİŞ	13
BİRİNCİ BÖLÜM	14
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ İLE MÜCADELE	14
1.1. İklim Değişikliği İle Mücadele Kavramı	14
1.2. İklim Değişikliğini Azaltmaya Yönelik Düzenlemeler	16
1.2.1. Montreal Protokolü	18
1.2.2. BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi	19
1.2.3. Kyoto Protokolü	19
1.2.4. Paris Anlaşması	20
1.3. Havacılık ve İklim Değişikliği İle Mücadele	21
1.3.1. Uluslararası Havacılık için Karbon Dengeleme ve Azaltma Programı (CORSIA) kavramı	24
1.3.1.1. CO ₂ emisyonlarının azaltılması	25
1.3.1.2. Çevresel bütünlük	25
1.3.1.3. Dengeleme gereksinimleri	26
1.3.2. Türkiye’de CORSIA Uygulanması	26
İKİNCİ BÖLÜM	28
HAVAYOLU SEKTÖRÜNDE KARBON SALINIMI	28
2.1. Havacılıkta Pil Teknolojisi Üzerine Yapılan Çalışmalar	33
2.2. Hidrojen Teknolojisi Üzerine Yapılan Çalışmalar	34
2.3. Ticari Havacılık İçin Küresel Yakıt Tüketiminin Modellenmesi	35
2.3.1. Piano-X Uygulaması	36
2.3.2. Atmosfair Havayolu Endeksi	36
2.3.3. GREET Havacılık Modülü	38
2.3.3.1. Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) Yöntemleri	39
2.3.3.2. Havacılık Modül Yapısı	40
2.3.3.3. Gösterge Paneli	41
2.3.3.3.1. Yol seçimi	42
2.3.3.3.2. Girdi parametreleri	43
2.3.3.3.3. Sonuçlar (MJ veya üretilen Galon yakıtla)	44
2.3.3.3.4. Girdi Etkileri	44
2.3.3.3.5. Uçak Tiplerine Göre Sonuçlar	44
2.3.3.4. Giriş verileri	45

2.3.3.4.1. Süreçler	45
2.3.3.4.2. LCI	46
2.3.3.4.3. Taşıma	46
2.3.3.4.4. Yanma	47
2.3.3.4.5. LUC (Land of Use Change)	48
2.3.3.5. Destek Bilgisi.....	48
2.3.3.5.1. LC Profili	48
2.3.3.5.2. EF (Emisyon Faktörleri)	50
2.3.3.5.3. Yük.....	51
2.3.3.5.4. Sonuçlar.....	51
2.3.3.5.5. Dışa Aktarma	51
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	52
HAVACILIK YAKITLARININ KARBON EMİSYONU VE MALİYET	
AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI.....	52
3.1. Araştırmanın Amacı.....	52
3.2. Araştırma Kapsamı ve Kısıtları	52
Araştırmada kullanılan farklı üretim teknikleri üretilen sürdürülebilir havacılık yakıt verileri, ABD Federal Havacılık Dairesi tarafından sağlanabildiğinden sürdürülebilir havacılık yakıtlarına ait hesaplamalar bu verilere dayanılarak yapılmıştır.	52
3.3.Araştırmanın Yöntemi	53
3.4.Örneklem Seçimi	53
3.5.Verilerin Toplanması ve Analizi.....	53
3.6.Araştırmanın Analizi.....	54
3.6.1.Ham Petrolün Yaşam Döngüsü Analizi.....	54
3.6.2.HEFA Yöntemi İle Dönüştürülen Mısır Ürününün Yaşam Döngüsü Analizi	55
3.6.3.HEFA Yöntemi İle Dönüştürülen Soya Fasulyesi Ürününün Yaşam Döngüsü Analizi	57
3.6.4.HEFA Yöntemi İle Dönüştürülen Canola Ürününün Yaşam Döngüsü Analizi	58
3.6.5.ATJ Yöntemi İle Dönüştürülen Mısır Ürününün Yaşam Döngüsü Analizi	59
3.6.6.ATJ Yöntemi İle Dönüştürülen Soya Fasulyesi Ürününün Yaşam Döngüsü Analizi	60
3.6.7.ETJ Yöntemi İle Dönüştürülen Mısır Ürününün Yaşam Döngüsü Analizi	62
BULGULAR.....	63
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKÇA	70
ÖZGEÇMİŞ	82

SİMGELER VE KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ACARE	: Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (Avrupa Havacılık Araştırmaları Danışma Konseyi)
AEDT	: Aviation Environmental Design Tool (Havacılık Çevresel Tasarım Aracı)
AEM	: Advanced Emission Model (Gelişmiş Emisyon Modeli)
ATJ	: Alcohol to Jet (Alkolden Jete Dönüşüm)
BADA	: Base Of Aircraft Data (Uçak Veri Tabanı)
BMİDÇS	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
CERT	: CO ₂ Estimation and Reporting Tool (Karbondioksit Tahmin ve Raporlama Aracı)
CI	: Carbon Intensity (Karbon Yoğunluğu)
CORSIA	: Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (Uluslararası Havacılık için Karbon Dengeleme ve Azaltma Planı)
CO₂	: Karbondioksit
EASA	: European Aviation Safety Agency (Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı)
EF	: Emission Factor (Emisyon Faktörü)
ETJ	: Ethanol to Jet (Etanolden Jete Dönüşüm)
ETS	: Emissions Trading System (Emisyon Ticaret Programı)
EU-ETS	: European Union Emission Trading System (Avrupa Emisyon Ticaret Programı)
FAA	: Federal Aviation Administration (Ulusal Havacılık Dairesi)
FT	: Fischer-Tropsch Metodu
FTG	: Fuel Task Group (Yakıt Görev Grubu)
GHG	: Greenhouse Gas (Sera Gazı)
GREET	: Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation (Sera gazları, Düzenlenmiş Emisyonlar ve Teknolojilerde Enerji Kullanımı)
HEFA	: Hydroprocessed Esters And Fatty Acids (Hidro işlenmiş Esterler ve Yağ Asitleri)
IATA	: International Air Transport Association (Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği)
ICAO	: International Civil Aviation Organisation (Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü)
IPCC	: The Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli)
LCA	: Life-Cycle Analysis (Yaşam Döngüsü Analizi)
LDC	: Least-developed country (En Az Gelişmiş Ülke)
LCI	: Life cycle inventory (Yaşam Döngüsü Envanteri)
LLDC	: Landlocked Developing Countries (Karayla çevrili Gelişmekte Olan Ülkeler)
LUC	: Land of Use Change (Kullanım Yeri Değişikliği)
MJ	: Mega Joule
MTOW	: Maximum Take Off Weight (Maksimum Kalkış Ağırlığı)

NO_x	: Nitrik Oksit
PFEI	: Payload Fuel Energy İntensity (Yük yakıt enerji yoğunlukları)
PtL	: Güçten Sıvıya
PTW	: Pump-To-Wheels (Uçağın Yaşam Döngüsü)
RCP	: Representative Concentration Pathways (Temsili Konsantrasyon Rotaları)
RTK	: Revenue Tonne-kilometres
SAF	: Sustainable Aviation Fuel (Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı)
SHGM	: Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü
SIDS	: Small Island Developing States (Gelişmekte Olan Küçük Ada Devletleri)
SSP	: Shared Socioeconomic Pathways (Paylaşılan Sosyoekonomik Yollar)
UNFCC	: United Nations Framework Convention on Climate Change (Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi)
USDOT	: US Department of Transportation (ABD Ulaştırma Bakanlığı)
WTP	: Well-To-Pump (Hammaddenin Yaşam Döngüsü Süreci)
WTW	: Well to wake (toplam yaşam döngüsü PTW+WTP)

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2. 1 Taşıma Usulleri Örneği.	46
Tablo 2. 2 LC Profil Sekmesinin Veri Yapısı.....	49
Tablo 2. 3 EF Sekmesinin Veri Yapısı.	50
Tablo 2. 4 EF Sekmesinin Veri Yapısı.	51
Tablo 3. 1 Yaşam/Enerji Döngüsü ve Maliyet Tablosu.....	63
Tablo 3. 2 İstanbul-Ankara Uçuşu.	65
Tablo 3. 3 Münih-Ankara Uçuşu.	65
Tablo 3. 4 New York-Ankara Uçuşu.	66

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1 Taşıma Girdileri Örneği.....	40
Şekil 2. 2 GREET Havacılık Modülünün Yapısı ve Veri Etkileşimi.	41
Şekil 2. 3 GREET Havacılık Modülü Göstergesi.	42
Şekil 2. 4 Yaşam Döngüsü Çevrimi.....	45
Şekil 2. 5 Örnek Taşıma Modeli Gösterimi	47
Şekil 3. 1 Ham Petrole Ait CO ₂ Yaşam Döngüsü.....	54
Şekil 3. 2 Toplam Enerji Yaşam Döngüsü.	55
Şekil 3. 3 Mısır Ürünü CO ₂ Yaşam Döngüsü.....	56
Şekil 3. 4 Mısır Ürünü Toplam Enerji Yaşam Döngüsü.....	56
Şekil 3. 5 Soya fasülyesi Ürünü CO ₂ Yaşam Döngüsü.	57
Şekil 3. 6 Soya Fasülyesi Toplam Enerji Yaşam Döngüsü.	57
Şekil 3. 7 Canola Ürünü CO ₂ Yaşam Döngüsü.	58
Şekil 3. 8 Canola Ürünü Toplam Enerji Yaşam Döngüsü.....	58
Şekil 3. 9 ATJ Mısır Ürünü CO ₂ Yaşam Döngüsü.	59
Şekil 3. 10 ATJ Mısır Ürünü Toplam Enerji Yaşam Döngüsü.....	60
Şekil 3. 11 Soya fasülyesi Ürünü CO ₂ Yaşam Döngüsü.	61
Şekil 3. 12 Soya Fasülyesi Ürünü Toplam Enerji Yaşam Döngüsü.	61
Şekil 3. 13 ETJ Mısır Ürünü CO ₂ Yaşam Döngüsü.	62
Şekil 3. 14 ETJ Mısır Ürünü Toplam Enerji Yaşam Döngüsü.	62
Şekil 3. 16 Karbondioksit Yaşam Döngüsü Grafiği.	63
Şekil 3. 17 Toplam Enerji Yaşam Döngüsü Grafiği.....	63
Şekil 3. 18 Maliyet Grafiği.	64
Şekil 3. 19 Yüzdesel Fark Grafiği.	66

ÖZET

HAVACILIK SEKTÖRÜNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAKITLARIN KULLANIMI ÜZERİNE AMPRİK BİR ANALİZ

POLAT, Emre Oğuzhan

Yüksek Lisans, Havacılık Yönetimi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yaşar KÖSE

Haziran -2023, 82 sayfa

Bu çalışma, farklı alternatif yakıtları analiz etmeyi ve değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Sürdürülebilir dönüşüme yönelik uygun bir geçiş çözümü olma potansiyeli dikkate alınarak, farklı alternatif yakıtlar ve bunların havacılık sektöründeki uçak motorlarında kullanımları bu amaçla analiz edilmektedir. İçerik analizi yöntemi kullanılarak, çevresel ve ekonomik değerlendirme yöntemleri olarak yaşam döngüsü değerlendirmesi ve yaşam döngüsü maliyetlemesi kullanılmaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde sera gazı etkisini azaltmaya yönelik düzenlemeler, üçüncü bölümünde ise gelecek vadeden havacılık yakıtları tanımlanmış, fosil yakıtlar ile sürdürülebilir havacılık yakıtları karşılaştırılmış, çevre ve maliyet analiz sonuçları sunulmuştur. Sonuç ve Değerlendirme bölümünde, çalışmanın sonuçlarının ve gelecekteki araştırmalar için beklentilerinin bir özeti sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir havacılık yakıtları, yaşam döngüsü değerlendirilmesi, yaşam döngüsü maliyeti.

ABSTRACT

AN EMPRIC ANALYSIS ON THE USE OF SUSTAINABLE FUELS IN THE AVIATION INDUSTRY

POLAT, Emre Oğuzhan

Master of Aviation Management Administration Dept.

Supervisor: Doç. Dr. Yaşar KÖSE

June -2023, 82 pages

This study aims to analyzing and evaluating different alternative fuels. Concerning their potential to be an appropriate transition solution towards sustainable transformation, different alternative fuels and their use in aircraft engines of the aviation sector are analyzed for this purpose. Using the content analysis method, life cycle assessment and life cycle costing are used as environmental and economic assessment methods.

In the second part of the study, regulations to reduce the greenhouse gas effect, and in the third part promising aviation fuels are defined, fossil fuels and sustainable aviation fuels are compared and the environmental and cost analysis results are presented. The conclusion section provides a summary of the benefits of the study and the prospects for future research.

Keywords: Sustainable aviation fuels, life cycle assesment, life cycle costing.

GİRİŞ

Yolcu ve kargo uçuşlarına olan talep son birkaç yılda önemli ölçüde artış göstermiştir. Devam eden küreselleşme ve neredeyse sınırsız seyahat olanakları nedeniyle, küresel hava yolculuğunun daha da artması beklenmektedir. COVID-19 öncesi önde gelen uçak üreticileri Airbus ve Boeing'in çalışmalarına göre, uçuş talebinin yılda %4,5'e kadar artacağı ve bunun sonucunda hava trafiğinin her 16 yılda iki katına çıkmasına sebep olacağı tahmin edilmektedir.

COVID-19 pandemisi, 2020 yılı verilerine göre hava yolculuğunda %75 azalmaya yol açmış ve kısa vadede bu büyümeyi yavaşlatmış olsa da uçuşlara olan talep toparlanma sürecine girmekte ve uzun vadede güçlü bir pozitif eğilim beklenmektedir.

Ancak bu gelişme ekonomik açıdan olumlu gelişme olarak görülürken, özellikle sera gazlarının salınımı, karbondioksit (CO₂) gibi artan küresel ısınmanın iklim üzerindeki etkileri çevreyi olumsuz etkileyen faktörlerin artışına sebep olacağı öngörülmektedir. 2019 yılı EASA raporuna göre havacılık sektörü küresel karbondioksit emisyonlarının %2,6'sından ve küresel sera gazının %5,9'undan sorumlu olarak görülmüştür.

Yeni nesil uçaklar sayesinde yaklaşık %25'lik yakıt verimliliği elde edilmesine rağmen uçuşlarda öngörülen büyüme nedeniyle 2050 yılına kadar yüksek irtifalardaki emisyonların oranının, yer seviyesindeki göre 3 kat daha etkili olması beklenmektedir.

BİRİNCİ BÖLÜM

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ İLE MÜCADELE

1.1. İklim Değişikliği İle Mücadele Kavramı

İklim değişikliği genel anlamda, iklimin ortalama halinde ya da değişkenliğinde uzun yıllar boyu süren istatistiksel değişimler olarak tanımlanmaktadır (Türkeş, 2008:27). İklimde meydana gelen değişimler, dünyanın bazı yerlerinde sıcaklıklarda meydana gelen değişiklikler ve yağışlardaki değişiklikler olarak görülmektedir. Yıllar boyunca yerkürede, iklim sisteminde değişiklikler ortaya çıkmıştır. Deniz seviyesindeki değişimler ve buzul hareketleri, ekolojik sistemde büyük değişikliklere neden olmuştur (Türkeş, 2000:7-24).

İklim değişikliği pek çok olumsuz sonuca yol açmaktadır. İklimdeki değişkenliğe bakıldığında, iklim ortalama halindeki standart sapmalar ile diğer istatistiklerinde meydana gelen değişimlerle ortaya çıkmaktadır. İklimsel değişkenlik, doğal süreçlerle ya da zorlama kaynaklı dışsal etkilere bağlı olarak oluşabilmektedir. İklim değişimi, doğal süreçler ya da dış etmenler yoluyla olabildiği gibi, arazi kullanımındaki insan kaynaklı faktörler sebebiyle de meydana gelebilmektedir. Örneğin; tarımsal faaliyetler, sera gazlarına sebep olan fosil yakıt kullanımı, atıkların artması, sanayileşme vb. faktörler sayılabilir. İnsan kaynaklı faktörler, dünyayı büyük bir tehditle karşı karşıya bırakmaktadır. İklim ve hava durumu farklı konulardır. Hava durumu kısa süreli, bir iki gün ya da hafta boyunca etkin bir faktördür. İklim ise, birikimsel bir durumdur. Bir bölgenin çok uzun süreli meteorolojik şartlarının hepsini kapsamaktadır (Gerste, 2017).

İklim değişikliğinin sebeplerine bakıldığında, öncelikle doğal faktörlerin ortaya çıkarak bu değişime sebebiyet verdiği görülmektedir. İklim değişikliğinin temel sebebi, dünyadaki ışınım dengesinin değişime uğramasıdır. Bu değişimin tespit edilmesi uzun süreli veriler ile anlaşılmaktadır. Normal şartlarda, atmosfer sistemine giren güneş enerjisi ile ışınımın dengeli olması gerekmektedir. Atmosfer sisteminde bulunan bazı gazlar “sera gazları” olarak bilinmektedir. Bu gazlar; “CO₂, CH₄, N₂O ve O₃” gazlarıdır. Güneşten gelen kısa dalga geçirgen, uzun dalga ise daha az geçirgen bir yapıdadır. Bu sebeple sera gazları güneşten yansıyan ısı enerjisini tutarak dünyanın daha çok ısınmasına neden olmaktadır. Bu durum “sera etkisi” olarak açıklanmaktadır (Gündoğan vd., 2015:4).

Ağustos 2021’de yayımlanan IPCC altıncı değerlendirme raporunda (AR 6) iklimin insan faaliyetleri sonucu değiştii ve bu faaliyetlerin küresel ısınmayı, en azından son iki bin yıldır görülmemiş bir seviyeye çıkarttığı vurgulanmıştır. 1880 yılından beri meydana gelen iklim değişikliği nedeniyle küresel sıcaklık 1°C yükselmiştir. Kar ve buz miktarları azalmış, deniz seviyeleri yükselmiştir. Kayıtlara geçen en sıcak 20 yılın 19’u 2001 yılından bu yana yaşanmıştır. Havadaki CO₂ düzeyi 650 bin yıllık süreçte en yüksek düzeyine ulaşmıştır. Felaketlerle geçen 2020 yılının maliyeti milyarlarca doları bulmuştur. Örneğin; Doğu Afrika’daki çekirge istilasının maliyeti 8,5 milyar dolar, ABD’deki kasırganın maliyeti 41 milyar dolar, Avustralya’daki orman yangınının maliyeti 5 milyar doları bulmuştur. Türkiye’de ise fırtına, sel, hortum gibi aşırı hava olayları nedeniyle tarımda 1,1 milyar liralık hasar tespit edilmiştir.

İklim değişikliğinin gelecekteki risklerini tahmin edebilmek için Temsili Konsantrasyon Rotaları (RCPs) oluşturulmuştur. RCPs; tüm sera gazları, aerosoller ve kimyasal olarak aktif gazların zaman serileri ve konsantrasyonlarının yanı sıra arazi kullanımı/arazi örtüsünü içeren senaryolardır. Aynı zamanda; AR 6’da, Ortak Sosyoekonomik Rotalar (SSPs) eklenmiştir. SSPs, iklim politikası müdahalesinin sayesinde iyi ve kötü senaryolar çalışlabilmektedir. SSPs tabanlı sosyo-ekonomik senaryolar ile RCPs tabanlı iklim projeksiyonlarının kombinasyonu, iklim etkisi ve politika analizi için yararlı bütünleştirici bir çerçeve sağlamaktadır.

1.2. İklim Değişikliğini Azaltmaya Yönelik Düzenlemeler

İklim değişikliğinin insan sağlığı üzerine birçok etkisi bulunmaktadır. İklim değişikliğinin sıcak-soğuk hava dalgaları ve aşırı hava olaylarının yol açtığı sağlık etkilerinin yanında UV radyasyonun yan etkileri, hava kalitesi değişiminin yol açtığı sağlık sorunları, gıda ve su ile ilişkili hastalıklar, bulaşıcı hastalıklar, vektörlerle ilişkili hastalıkların dağılımında ve etkinliğinde değişme, ruhsal hastalıklar, yeniden ortaya çıkan ve yeni hastalıklara neden olma gibi etkileri de vardır. Diğer bir ifadeyle iklim değişikliği, hem bulaşıcı (vektör ve su kaynaklı hastalıklar gibi) hem de bulaşıcı olmayan (kardiyovasküler hastalıklar, solunum yolu hastalıkları, ruh sağlığı sorunları gibi) hastalıkların ölüm, yaralanma ve hastalık oranlarını etkilemektedir. İklim değişikliğinden ilk etkilenenler bir şehrin en kırılgan bölgesi ve en kırılgan grupları olmaktadır. İklim değişikliğine karşı bireysel düzeyde kırılganlık, insanların maruz kalma düzeyine, kişisel özelliklerine (yaş, eğitim, gelir ve sağlık durumu gibi) ve sağlık hizmetlerine erişimlerine göre farklılaşmaktadır. Yaşlı insanlar, çocuklar, açık havada çalışanlar, kronik sağlık sorunu olanlar, yoksullar, etnik azınlıklar ve evsizler özellikle hassas nüfus gruplarıdır.

Sanayileşme ile birlikte ekonomik ve toplumsal anlamda insanın hayatında değişimler olmuştur. Daha fazla endüstrileşme isteği, daha çok para kazanma hırısı, sanayiye çok fazla verilen önem çevre konularının göz ardı edilmesine yol açmıştır. Ekonominin canlanması için gerçekleştirilen endüstriyel faaliyetler, çevresel yıkıma yol açmıştır. Bu durum, çevresel konular için bir dönüm noktası olmuştur. İlerleyen süreçte sanayi sektörü, çevrenin en büyük düşmanı konumuna gelmiştir. İnsanlar, dünyada gerçekleştirdiği bazı faaliyetler sebebiyle iklim değişikliğine daha fazla yol açabilmektedir. Bu faaliyetler genellikle ekonomik, tarımsal faaliyetler olmaktadır. Bu faaliyetler sonucunda atmosferdeki sera gazı oranı daha çok artmakta, doğal sera etkisi üzerinde büyük bir iz bırakmaktadır (Gündoğan vd., 2015:5).

Atmosferdeki sera gazı oranının değişmesine sebep olan faktörlere bakıldığında; ulaşım, barınma, elektrik üretimi gibi sektörlerde kullanılan petrol, kömür gibi yakıtların kullanılması ile yerin altındaki karbon moleküllerinin atmosferdeki O₂ ile birleşerek sera gazına dönüşmesi, tarım sektöründe kullanılan yöntemler sonucunda yeni sera gazlarının oluşması, 20. yüzyılda geliştirilen sanayi ürünleri ile ortaya çıkan zararlı gazların atmosfere salınımı, orman bölgelerinin sanayi, konut, enerji çalışmaları için dönüştürülmesi gibi pek çok faktör bulunmaktadır. Ayrıca; organik karbon, siyah karbon,

biyokütle aerosolleri, arazi kullanımındaki değişiklikler gibi etmenler de iklim değişikliğinin ortaya çıkışında önemli rol oynamaktadır (Türkeş, 2008:27).

Sanayileşmiş ülkelerde yaşayan kişilerin büyük çoğunluğu, iklim krizinin insan kaynaklı olduğunu savunmaktadırlar. Bu konuda gerekli tedbirlerin alınması gerektiğini belirtmektedirler (Gerste, 2017). İnsani faktörler iklim değişikliğinin meydana gelişinde büyük bir etken olup, dünyayı tehlikeye sürüklemektedir. İnsanın doğada sadece kendini egemen olarak görmesi iklim değişikliği felaketinin en önemli sebeplerinden biridir. İnsan, kendi çıkarı için doğal dengeyi bozacak eylemlerde bulunmaktadır. Ekosistemler artık hem cansız varlıklar hem de insanlar için sürdürülemez bir boyuta gelmiştir. Bu konu kapsamında hazırlanan yasal düzenlemeler bile, insan merkezci bir anlayışla hazırlanmıştır. Dünyanın karşı karşıya olduğu çevresel tehditleri azaltmak ve yok etmek için bu anlayışın değişmesi gerekmektedir (Algan, 2008:193). İnsanın doğada kendini en güçlü varlık zannetmesi, küresel iklim krizinin sebepleri araştırılırken en önemli sorunlardan biridir. Canlı cansız tüm varlıkların bu gezegenin bir parçası olduğu göz ardı edilmemelidir.

İklim değişikliğine karşı önlemler almak ve mücadele etmek, uzun yıllardır süregelen bir eylemdir. İklim değişiminin giderek artması ve daha çok tehlikeli bir hal almaya başlamasıyla, bu mücadele giderek hız kazanmaya başlamıştır. İklim değişikliği ile mücadele kapsamında iki önemli faktör bulunmaktadır. Bunlar; uyum ve azaltmadır. Azaltmada, insanların sebep olduğu iklim değişikliğine karşı önlemlerin alınması ve riskin azaltılmaya çalışılması durumu hakimdir. Uyumda ise; iklim değişikliğinin yıkıcı etkilerine karşı hem ekonominin hem de toplumun bu duruma hazırlıklı hale getirilerek uyum sağlaması önemli bir konudur. Genel olarak iklim değişikliğini azaltmaya çalışan yöntem, sorunun esas temeline inmektedir. Uyum yönteminde ise, potansiyel sonuçlar üzerinde durulmaktadır. Azaltma hedefinde, sera gazı salınımlarını azaltma düşüncesi hakimdir. Uyum hedefinde, kurak iklime karşı uyumlu bitkilerin yetiştirilmesi uygun görülmektedir (Doğan ve Tüzer, 2011:159-160). İklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin azaltılması ile bu krizin tehlikesi önenebilecektir.

İklim değişikliği konusu önceden çok fazla gündemde olmayan bir konuyken, sorunun sebep olduğu kuraklaşma, çölleşme, iklim göçü, doğal afetler gibi pek çok sorunun artmasıyla daha fazla gündeme gelmeye başlamış ve konuyla alakalı çözüm üretimine geçilmiştir. İklim değişikliğine karşı bir çözüm üretebilmek için; atmosferdeki karbon miktarını azaltmak ve küresel ısınmanın önlenmesini sağlamak en önemli hedeflerdendir. Bu durumun gerçekleşmesi için fosil yakıtlardan vazgeçmek büyük önem

taşımaktadır ve yenilenebilir enerjiye geçişin uygulanması gerekmektedir (Reyhan ve Reyhan, 2016:14-16). İklim değişikliğine karşı mücadele, uluslararası konferanslarda dünyadaki büyük sorunlardan biri olarak belirtilmiştir. Ülkelerin bu konudaki uygulamaları, bu krizin zararlarını azaltmak açısından büyük önem arz etmektedir.

1.2.1. Montreal Protokolü

Küresel iklim değişikliğinin negatif sonuçlarının bilhassa 1980’li yıllarda giderek daha belirginleşmesiyle beraber uluslararası toplum bu durum ile mücadele etmeye başlamıştır. Böylelikle tüm devletlerin yer aldığı küresel iklim değişikliğiyle mücadele için birçok konferans gerçekleştirilerek anlaşmalar imzalanmıştır. Günümüze kadar gerçekleşen küresel iklim değişikliğiyle mücadeledeki uluslararası rejim oluşturma çabaları, iki farklı boyutta ele alınabilir. Birinci boyutta, devletlerin teorik olarak anlaşma metinlerinde kararlaştırdıkları önlemler ve düzenlemeler yer almaktadır. İkinci boyut ise devletlerin pratikte küresel iklim değişikliğine karşı verdikleri mücadeledir.

Uluslararası düzeyde devletler küresel iklim değişikliğiyle mücadelelerini ilk etapta konferanslar ve bu konferanslar bağlamında oluşan sonuç belgeleri çerçevesinde gerçekleştirmişlerdir. Çevre konusunu merkeze alan ilk konferanstan günümüze kadar (1972 Stockholm Konferansı) küresel iklim değişikliğiyle mücadeleye ilişkin birçok resmi konferans gerçekleştirilerek belgeler hazırlanmıştır.

Montreal Protokolü, Viyana Sözleşmesi’nin kabulünden sonra ozon tabakasını delen maddelerle ilgili olarak hazırlanmıştır. Montreal Protokolü, insan yapımı kimyasalların kullanımını düzenleyen çok kapsamlı bir çevre anlaşması olmuştur. Bu protokol, kimyasalların kullanımını gelişmiş ülkeler ve gelişmekte olan ülkeler için ayrı çizelgelerle değerlendirir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin farklı sorumluluklara sahip olması ve farklı değerlendirilmesi, bu protokolün farklarından biri olmaktadır. Her taraf, kendi sorumluluğunu yerine getirme yükümlülüğündedir. Protokolün uygulanmasıyla, gelişmekte olan ülkeler, çevrenin korunması konusunda mücadelede etkin olacaklarını belirtmişlerdir. Ozon tabakasını incelten maddelerin azaltılması konusu bu protokolün en kritik noktasıdır ve pek çok gelişmekte olan ülke bu hedefe ulaşmıştır. Protokol kapsamında üzerinde durulan maddeler; “halonlar, metil kloroform, karbon tetraklorür, kloroflorokarbon gazları” olmuştur (Gündoğan vd., 2015:36).

1.2.2. BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS), 1994'te yürürlüğe girmiştir. İklim konusuna insanın müdahalesinin önlenmesini sağlamak BMİDÇS'nin en temel hedefidir. Sözleşmenin en önemli amaçlarından biri, sera gazı emisyonlarının insan kaynaklı etkisine müdahale ederek azaltmaya çalışmaktır. Ekosistemin iklim değişikliğine karşı doğal uyum sağlaması bu noktada önemlidir. Ekonomik kalkınmanın, sürdürülebilir gelişim çerçevesinde olmasının sağlanması gerektiği belirtilmektedir (UNFCC, 2022).

Ekonomik kalkınma sağlanmaya çalışılırken, sürdürülebilirlik göz ardı edilmemelidir. Sözleşmede, iklim krizi konusunda gelişmiş ülkelerin yol gösterme sorumluluğu bulunmaktadır. Bunun en temel sebeplerinden biri, gelişmiş ülkelerin sera gazı emisyonlarının birçoğunun kaynağı oldukları ve sanayileştikleri için bunu azaltmak amacıyla uğraşmaları istenmektedir. Bir diğer konu; gelişmiş ülkeler, gelişmekte olan ülkelere iklim kriziyle mücadele konusunda maddi yardım yapmalı ve desteklemeli, bu konuda sözleşme ile anlaşmalılardır. Ayrıca sanayileşmiş ülkelerin iklim değişikliği politikaları konusunda sürekli olarak rapor vermeleri gerekmektedir. Gelişmekte olan ülkelerin raporları daha az sıklıkta olmaktadır. Bu sözleşme ile gelişmekte olan ülkelere ilerleyen yıllarda sera gazı emisyonlarında artış olacağı beklenmekte ve bunun için emisyonları azaltma konusunda destek sağlanması amaçlanmıştır (UNFCC, 2022).

1.2.3. Kyoto Protokolü

1997'de kabul edilen Protokol, BMİDÇS'nin hüküm ve ilkelerine dayanmaktadır. BMİDÇS'nin kendisi, gelişmiş ülkelerin sera gazı emisyonlarını düşürmelerini, iklim değişikliğinin etkilerine karşı politikalar uygulama ve tedbirler almalarını ve düzenli olarak rapor vermelerini istemektedir. Atmosferdeki sera gazı emisyonlarından sanayileşmiş ülkelerin daha çok sorumlu olduğunu düşünerek o ülkelere daha fazla sorumluluk yüklemektedir. Protokol; sanayileşmiş ülkeler, geçiş sürecindeki ekonomiler ve AB için bağlayıcı emisyon azaltma hedefleri belirlemiştir. Genel anlamda bu hedefler sonucu, 2008-2012 beş yıllık dönemi (ilk taahhüt dönemi) boyunca 1990 seviyelerine kıyasla ortalama “%5'lik” azaltım hedefine ulaşılmıştır (UNFCC, 2022).

Kyoto Protokolü 2. maddede; *“ilgili sektörlerde “enerji verimliliğinin artırılması, sürdürülebilir orman yönetimi uygulamaları, ağaçlandırma, iklim değişikliğine karşı*

sürdürülebilir tarımın teşviki, yenilenebilir enerji formları, yenilikçi çevresel teknolojiler gibi alanlarda gelişmeler sağlanması” üzerinde durulmuştur (UN, 1998). 3. maddede; “sera gazı emisyonlarını 1990’ların seviyesine göre %5 azaltma hedefine” değinilmiştir. Tarafların bu azaltım hedefini gerçekleştirmesi beklenmektedir. İnsan kaynaklı arazi kullanımındaki değişiklikler, ormanların yok oluşu ve bu durumlara karşı harekete geçme ve sorumluluk alma konusu üzerinde durulmuştur. Protokolün 6. maddesinde; “antropolojik emisyonların azaltılması için emisyon azaltma ünitelerinin satın alınmasından” bahsedilmiştir. 10. maddeye bakıldığında; iklim değişikliğinin zararlarını azaltmaya yönelik eylemler için bölgesel programlar oluşturmak gerektiği, bunları uygulayarak iklim değişikliğine adaptasyonu sağlamanın mümkün olacağı belirtilmiştir (UNFCCC, 2022).

Kyoto Protokolü’nde ilk taahhüt dönemi için bazı hedefler belirlenmiştir. Bu hedeflere bakıldığında, altı temel sera gazı emisyonunun azaltılması istenmektedir. “Karbon dioksit, metan, azot oksit, hidroflorokarbonlar, perflorokarbonlar, sülfür heksaflorür” azaltılması gereken başlıca sera gazlarıdır (UNFCCC, 2022). Protokolde, ilk taahhüt dönemi için ülkelerin emisyon hedefleri incelendiğinde, listedeki ülkelerin hedeflerini belirlediği görülmektedir.

1.2.4. Paris Anlaşması

Paris Anlaşması, iklim değişikliği konusunda yasal anlamda bağlayıcı olan bir uluslararası anlaşmadır. 2015 yılında 196 ülke tarafından kabul edilmiştir. Anlaşmanın hedefi, küresel ısınmanın, “1,5 °C” ile sınırlı kalmasını sağlamaktır. Ülkeler, iklim nötr olma yolunda ilerlemektedir. Bu hedefe ulaşabilmek için sera gazı emisyonlarında ciddi bir azalmanın sağlanması gerekmektedir. Paris Anlaşması, iklim değişikliği krizine karşı yürütülen önemli bir adım olarak görülmektedir ve bir dönüm noktası niteliğindedir. Bu anlaşma ile devletlerin bu krize karşı mücadele etmesi, sorumluluk alması sağlanmaktadır. İklim krizi ile mücadelede mevcut durumda geçerli ve önem taşıyan anlaşma Paris Anlaşması’dır.

Anlaşmanın 2. maddesinde; *“küresel sıcaklık artışını 1,5 °C’de tutmak, iklim değişikliğinin risklerini önemli ölçüde azaltmak, iklimin olumsuz etkilerine uyum sağlama yeteneğinin artırılması, finans akışının düşük sera gazı emisyonları ile tutarlı olması”* konuları üzerinde durulmuştur. Anlaşmanın 5. maddesinde; *“tarafların ormanları koruması gerektiği, kararları uygulamak ve geliştirmek için harekete geçilmesi gerektiği,*

emisyonların azaltılmasına ilişkin faaliyetlerin hız kazanması, orman yönetiminin korunması, sürdürülebilirlik için alternatif politikalar geliştirilmesi” gerektiği konuları üzerinde durulmuştur.

Anlaşmada 8. maddeye bakıldığında; tarafların, iklim değişikliğinin olumsuz etkileriyle ilişkili kayıpları ve hasarları önlemenin, en aza indirmenin sağlanması konusunda sürdürülebilir gelişimin rolünün farkında olduğundan bahsedilmiştir. Taraflar, iklim değişikliği konusunda anlayışı ve eylemleri geliştirmelidir. Bu konuda anlayışı geliştirmek için destek sağlanmalıdır. Bu destekler; erken uyarı sistemleri, acil durum hazırlığı, kapsamlı risk yönetimi, risk sigortası gibi konular olabilir.

Paris Anlaşması’nda taraflar, sera gazı emisyonlarını azaltmak için izleyecekleri adımları bildirmektedir. İklim değişimine karşı direnç oluşturmak için eylemler belirlemede ve bunları iletmektedirler. Anlaşma kapsamında ihtiyacı olan ülkelere çeşitli destekler sağlanmaktadır. Bu destekler; mali, teknik anlamda olabilmektedir. İklim değişimine direnme ve emisyonları azaltma konusunda ciddi bir yatırım gerekmekte olduğu için, finansman sağlanması bu noktada son derece önemlidir. Teknoloji geliştirme konusu da anlaşmada önemli faktörlerden biridir. Gelişen teknoloji ile iklim değişikliğine karşı direncin artırılması sağlanmaya çalışılmaktadır (UNFCCC,2022).

İklim değişikliği ve küresel ısınma sorununu gündeme getirme ve çözüm bulma amaçlı yapılan konferanslarda AB’nin de etkin bir durumu bulunmaktadır. Çevre konularında uzun zamandır politikalar geliştiren AB, gezegen için büyük önem taşıyan bu toplantı ve konferanslarda etkin durumda bulunmuştur. Çevre alanında liderlik pozisyonunda olması AB’nin en önemli özelliklerinden biridir. Belirlenen politika hedeflerini başlıca uygulama isteğinde bulunması, AB’nin bu konferanslara verdiği önemin göstergesidir. Çevre alanında öncü olabilmesi için bazı özellikleri taşıması gerekmekte ve bu özellikleri genel olarak taşımaktadır. Örneğin AB, Paris Anlaşması’nda öncü bir rol oynamıştır. Ayrıca BM’nin 2030 için Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri’nde de öncülüğü bulunmaktadır (European Commission, 2017). Birlik, çevre alanında önder durumda olmasıyla bu konuya önem verdiğini de göstermektedir.

1.3. Havacılık ve İklim Değişikliği İle Mücadele

Hava taşımacılığı günlük yaşamda hayati bir role ulaşmıştır. Sivil havacılık istikrarlı bir büyüme yolu gösteren ulaşım modudur ve en çok büyüyen taşımacılık sektörlerinden biridir (Panahi vd., 2019:995-1024).

Hava taşımacılığındaki büyüme, sonuç olarak, özel dikkat gerektiren artan çevresel etkilere/konulara sahiptir. Havacılığın çevresel etkisi temel olarak şu bölümlere ayrılmıştır:

Uçak gürültüsü ve egzoz gazı emisyonları ile ilgili etkiler, uçak motorlarından yayılan farklı kirleticiler, yerel hava kalitesini ve küresel atmosferi etkiler. Bu kirleticiler atmosferin radyasyon dengesini de etkilemektedir. Atmosferde uzun bir ömre sahip olan karbondioksitin (CO₂) doğrudan emisyonları iklim değişikliğinde önemli rol oynamaktadır. Karbondioksit, iklim üzerindeki etkileri son zamanlarda hissedilen ve mevcut enerji politikaları değiştirilmediği takdirde dramatik boyutlara ulaşabilecek olan sözde sera etkisine neden olmaktadır (Kousoulidou ve Lonza, 2016:166-181).

Karbondioksit en önemli sera gazı olarak kabul edilmektedir. Havacılık, fosil yakıt tüketimi nedeniyle küresel CO₂ emisyonlarının %2,4'ünü oluşturmaktadır. 2018 yılında yolcu hareketi, kargo ve posta dahil olmak üzere tüm ticari operasyonlar göz önüne alındığında 918 milyon metrik ton CO₂ salınmıştır (Graver vd., 2019:1-13).

2008'de tüm küresel havacılık paydaşları, iklim değişikliğinin etkisini azaltabilmek için karşılamak için 2009 ve 2050 arasındaki dönem için üç önemli konsepti benimsemiştir:

- 2020'den itibaren net havacılık CO₂ emisyonlarında bir üst sınır (karbon-nötr büyüme);
- CO₂ emisyonlarında 2050 yılına kadar 2005 seviyelerine kıyasla %50 azalma;
- 2009'dan 2020'ye kadar yakıt verimliliğinde yıllık ortalama %1,5'lik bir iyileşme (EASA, 2019).

Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA), bu hedeflere ulaşılmasına yardımcı olacak olası bir stratejiyi tanıtmıştır. Tüm üyeler, gelişmiş teknoloji, daha verimli uçak operasyonları, altyapı iyileştirmeleri ve olumlu ekonomik önlemlerden oluşan “dört sütunlu stratejiyi” izlemeyi kabul etmiştir (EASA, 2019).

COVID-19 pandemisi, hava ulaşımında benzeri görülmemiş etki yaratmıştır. Havacılık, pandemi salgınının sonuçları nedeniyle en çok zarar gören sektörlerden biridir (Czerny vd., 2021). Küresel olarak uçuş sefer sayıları Nisan 2020 başı itibarıyla neredeyse %80 azalmıştır. Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü'ne (ICAO) göre verilerine göre (Aralık 2020), kargo uçuşlarının sayısında bir önceki yıldaki rakamlara göre %1,44 bir artış olmuştur (ICAO, 2020).

Havacılık pazarının sert darbe aldığı ilk ülke Çin pazarı olmuştur. Diğer büyük ekonomilerin çoğuyla karşılaştırıldığında, Çin'deki havacılık sektörü, ağırlıklı olarak yurt

içi hizmetlerde çok daha hızlı bir oranda toparlanmıştır. Temmuz 2020 sonunda iç pazarda pandemi öncesi seviyenin yaklaşık %70-80'ini toparlanmıştır. Daha önceki virüs salgınlarında havacılık sektörünün tamamen iyileşmesi en fazla 7 ay sürmüştür (Czerny vd., 2021:1).

Havacılık sektörü için çevresel etkilerin değerlendirilmesinde en önemli konulardan biri küresel CO₂ emisyonlarının hesaplanmasıdır. Bu sorunun üstesinden gelmek için son yıllarda farklı metodolojilere sahip birkaç model geliştirilmiştir (Morales vd., 2007:18-20). Havacılık ve çevre arasındaki etkileşimlerin yerel ve küresel düzeyde kapsamlı bir analizini sağlayan politika değerlendirme kabiliyetine dayanan Havacılık Entegre Modeli adlı bir model geliştirmiştir (Jimenez vd., 2012:13-30).

Benzer şekilde teknolojik, operasyonel katkıları ve biyoyakıt kullanımını dikkate alan farklı senaryolarda gelecekteki ulusal hava sahası sisteminin performansını değerlendiren entegre bir çerçeve önerilmiştir (Hassan vd., 2015: 418-427).

Hollingsworth vd., (2008) ve Schaefer, (2012) tarafından küresel hava taşımacılığı sisteminin teknolojilerinin ve araç konseptlerinin geliştirilmesinin neden olduğu hem emisyonları hem de yakıt tüketimini netleştirmek ve ölçmek için yöntemler sunulmuştur.

Alternatif olarak, Tetzloff ve Crossley (2014), bir rota ağında mevcut ve gelecekteki uçakların optimal tahsisini belirleyen optimizasyon için bir yazılım geliştirmiştir.

Owen vd., (2010), Randt vd., (2015) ve Terekhov vd., (2018) yeni uçak teknolojilerinin analizine odaklanmıştır. Bu çalışmaların, yeni nesil uçaklar üzerinde uygulanması göz önüne alındığında gelecekteki karbondioksit emisyon miktarını göstermektedir. Söz konusu çalışmaların ana sonuçları, uygulanan yeni teknolojilerin pazarda yavaş bir penetrasyona sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Daha fazla azalmanın diğer kısımlardan, özellikle sürdürülebilir alternatif yakıtların kullanılması ve operasyonel önlemlerin alınması gerekmektedir.

IATA stratejisine göre, bio-havacılık yakıtlarının geliştirilmesi, havacılık CO₂ emisyonlarını azaltmak için en yüksek potansiyele sahiptir (Hassan vd., 2017). Bu nedenle bio-havacılık yakıtları, uçak üreticilerinin, bio-yakıt şirketlerinin, araştırmacıların ve hükümetlerin odak noktası haline gelmiş ve bio-havacılık yakıtı ile ilgili yayınların sayısı son yıllarda önemli ölçüde artmıştır (Wang vd., 2019:31-49). Bu çalışmaların çoğu üretim teknolojileri, farklı hammaddeler ve çeşitli işleme teknolojileri üzerine odaklanmıştır.

Alternatif bir yakıt geliştirmenin önemi göz önüne alındığında, bunun neden olduğu çevresel etkinin de değerlendirilmesi gerekliliği bulunmaktadır.

ICAO, küresel iklimi etkileyen yakıt tüketimi ve uçak emisyonları eğilimlerini açıklamıştır. Bu eğilimler, uçak teknolojisinin katkısını, iyileştirilmiş hava trafik yönetimini, operasyonel iyileştirmeleri ve sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF) uygulamasını dikkate almaktadır. SAF üretimi ile ilgili olarak, ICAO, 2050 yılına kadar talebin %100'ünü SAF ile karşılamanın fiziksel olarak mümkün olacağını göstermiştir ve bu oran emisyonlarda %63'lük bir azalmaya tekabül etmektedir. Bu yakıt üretim düzeyi, ancak SAF üretim altyapılarına son derece yüksek sermaye yatırımları ve önemli siyasi destek ile elde edilebilecektir. Bununla birlikte, 2020'den sonra karbon nötr büyüme hedefine ulaşılması pek olası gözükmemektedir (ICAO, 2019b). Tamamen elektrikli uçak, açık rotorlu dikme destekli kanat, harmanlanmış kanat gövdesi, sıvı damlalı yakıt (fischer-tropsch kerosen) ve sıvı damlatmayan yakıt (sıvı doğal gaz) araştırmaları yapılmıştır (Schilling vd., 2016:1-12).

Benzer şekilde, Moolchandani vd., (2017) üç senaryoyu değerlendirmiştir. İlk senaryoda, tüp ve kanatlı uçak konfigürasyonları için ileri teknolojiler tanıtılmış; İkinci senaryoda, uçağın hibrit kanat gövdesinin konfigürasyonu incelenmiş olup, son senaryoda, düşük karbonlu yakıtların girişi incelenmiştir. Sonuç olarak havacılık CO₂ emisyonlarının çevre hedefleriyle ilişkili seviyelere ulaşmadığını göstermektedir.

1.3.1. Uluslararası Havacılık için Karbon Dengeleme ve Azaltma Programı (CORSA) kavramı

2016 yılında, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO), uluslararası havacılıktan kaynaklanan CO₂ emisyonlarını ele almak için küresel bir piyasa temelli mekanizma olan Uluslararası Havacılık için Karbon Dengeleme ve Azaltma Planı'nı (CORSA) benimsemiştir.

CORSA; hükümetler, sanayi ve uluslararası kuruluşlar için ilk küresel piyasa temelli önlemdir. CORSA'nın uygulanmasına ilişkin uluslararası standartlar, Chicago Sözleşmesi'nin bir Eki olarak kabul edilmiştir (<https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheetcorsia/> , e.t. 28.09.2022).

Havacılık sektörü, 2019 yılında net küresel CO₂ emisyonlarının %2,8'inden sorumlu olmakla birlikte küresel ekonomiye %4,1'lik katkı sağlamaktadır. 2018 yılında sadece ulaşım sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarının yaklaşık %12 olduğu tahmin edilmiştir. Uluslararası Havacılık için Karbon Dengeleme ve Azaltma Planı (CORSA), alternatif jet yakıtlarının entegre edilmesinin CORSA'nın denkleştirme gereklilikleriyle

ilişkili maliyeti azaltabileceği düşük karbonlu yakıtları teşvik etmek ve CO₂ emisyonlarını azaltmak için uygun maliyetli bir mekanizma olarak hizmet edebilir (Khalifa vd., 2022:1-14).

1.3.1.1. CO₂ emisyonlarının azaltılması

CORSIA, denkleştirme programları kullanarak uluslararası sivil havacılık net CO₂ emisyonlarını 2021'den itibaren 2019 seviyelerinde dengelemeyi hedeflemektedir.

Dengeleme, bir şirketin veya bireyin, emisyonlarda azalmayı finanse ederek emisyonlarını telafi etme eylemi olarak tanımlanabilir. Dengeleme programları onlarca yıldır uygulanmakta ve iklim değişikliğine karşı eylemi desteklemek için etkili bir mekanizma olmaya devam etmektedir.

CORSIA, sürdürülebilir havacılık yakıtı (SAF) gibi düşük emisyonlu teknolojiler büyütülene ve elektrik ve hidrojenle çalışan teknolojiye kadar uluslararası havacılıkta karbon nötr bir büyüme elde etmek için kısa ve orta vadeli bir strateji (2021-2035) olarak tasarlanmıştır. Dengeleme, yeni teknolojiye bir alternatif olarak değil, emisyonları dengelemek ve azaltmak için bir dizi önlemin parçası olarak tasarlanmıştır. SAF gibi yeni teknolojilerin yaygınlaşmasıyla ofset ihtiyacının azalacağı öngörülmektedir (<https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheetcorsia/>, e.t. 28.09.2022).

1.3.1.2. Çevresel bütünlük

Birçok denkleştirme projesi, sürdürülebilir kalkınmayla ilgili ek sosyal, çevresel veya ekonomik faydalar sağlar. Bu tür denkleştirmelere örnek olarak rüzgâr enerjisi, temiz ocaklar, ormancılık ve diğer emisyon azaltma veya önleme projeleri verilebilir.

CORSIA'nın çevresel bütünlüğünü sağlamak için ICAO Konseyi, uyumluluk için kullanılacak emisyon birimlerinin bir listesini onaylamıştır. Konseyin kararı, bir teknik danışma kurulunun tavsiyesiyle bilgilendirilir ve emisyon birimlerinin istenen CO₂ azaltımlarını sağlamasını garanti etmek için çevresel kriterler tarafından yönlendirilmektedir (<https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheetcorsia/>, e.t. 14.10.2022).

1.3.1.3. Dengeleme gereksinimleri

Dengeleme gereksinimleri 2021'den itibaren geçerli olmuştur. Her 3 yıllık uyum döneminin sonunda, operatörlerin uygun sayıda emisyon birimini iptal ederek denkleştirme gereksinimlerini karşıladıklarını kanıtlamaları gerekmektedir.

Devletlerin özel durumlarını ve ilgili yeteneklerini hesaba katmak için ICAO üye devletleri, denkleştirme gerekliliklerini aşağıda belirtilen iki aşama halinde uygulama kararı almışlardır:

- 2021'den 2026'ya kadar, yalnızca birinci aşamaya katılmaya gönüllü olan eyaletler arasındaki uçuşlar denkleştirme gerekliliklerine tabi olacaktır. Gönüllü olan ülkelerin tüm uluslararası havacılık faaliyetleri yaklaşık %77'yi kapsamaktadır.

- 2027'den itibaren, neredeyse tüm uluslararası uçuşlar, tüm uluslararası havacılık faaliyetlerinin %90'ından fazlasını temsil eden zorunlu denkleştirme gerekliliklerine tabi olacaktır. İstisnalar, En Az Gelişmiş Ülkeler (LDC'ler), Gelişmekte Olan Küçük Ada Devletleri (SIDS), Karayla çevrili Gelişmekte Olan Ülkeler (LLDC'ler) ve bu Devletler gönüllü olarak katılmadıkça, uluslararası RTK'ların %0,5'inden daha azını temsil eden eyaletlere yapılan ve bu ülkelerden yapılan uçuşlardır. Eylül 2021'e kadar 107 Devlet, 2022 için CORSIA'ya katılmak için gönüllü olmuştur (<https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheetcorsia/>, e.t. 14.10.2022).

1.3.2. Türkiye’de CORSIA Uygulanması

Türkiye’de CORSIA’nın uygulanmasında yetkili kurum Sivil Havacılık Genel Müdürlüğüdür. Uluslararası havacılık faaliyetlerinden kaynaklanan karbondioksit emisyonlarının izlenmesine, raporlanmasına ve doğrulanmasına dair usul ve esasların belirlenmesi amacıyla Uluslararası Havacılığa Yönelik Karbon Denkleştirme ve Azaltma Şeması Uygulama Talimatı (SHT-CORSIA) yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Talimatın uygulamasında yararlanılacak belgeler aşağıda yer almaktadır:

- Emisyon İzleme Planı Şablonu
- Emisyon Raporu Şablonu
- CORSIA'ya Uygun Yakıt Kullanımına İlişkin Ek Bilgiler Şablonu
- Kılavuz Belge (<https://web.shgm.gov.tr/tr/havaalanlari/6277cevre> ,e.t. 28.09.2022).

Talimatın amacı “Uluslararası havacılık faaliyetlerinden kaynaklanan karbondioksit emisyonlarının izlenmesine, raporlanmasına ve doğrulanmasına dair usul

ve esasları düzenlemek”, kapsamı ise “insani yardım, tıbbi ve yangın söndürme amaçlı uçuşlar hariç olmak üzere, dış hat uçuşları gerçekleştiren, sertifikalandırılmış azami kalkış ağırlığı 5.700 kg'dan fazla olan uçakların kullanılması nedeniyle yıllık 10.000 tondan fazla karbondioksit emisyonu üreten uçak işleticilerini ve doğrulama kuruluşlarını kapsar” olarak belirlenmiştir.

Talimat aşağıda belirtilen Ekleri içermektedir:

EK-01 - İdari Hususlar

EK-02 - Karbondioksit Emisyonlarının İzlenmesi, Raporlanması ve Doğrulaması (MRV)

EK-03 - Emisyon Azaltımları

EK-04- CORSIA İnternet Sitesinde Yer Alan Güncel Bilgileri İçeren ICAO Dokümanları ve Araçları

EK-05 - Uyum Dönemleri ve Zaman Çizelgesi

EK-06 - Yakıt Kullanımı İzleme Yöntemleri

EK-07 - Karbondioksit Tahmin ve Raporlama Aracı (CERT)

EK-08 - Emisyon İzleme Planları

EK-09 - Raporlama

EK-10 - Doğrulama

EK-11 - Belirleme Süreçleri

EK-12 - MRV Gerekliliklerinin Dış Hat Uçuşlarına Uygulanabilirliği

EK-13 - Yakıt Kullanımının İzlenmesine İlişkin Süreçler

(Uluslararası Havacılığa Yönelik Karbon Denkleştirme ve Azaltma Şeması Uygulama Talimatı, 08.01.2020, SHGM)

İKİNCİ BÖLÜM

HAVAYOLU SEKTÖRÜNDE KARBON SALINIMI

2018 yılında ulaştırma sektörü, toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %21'ini oluşturmakta iken havacılık sektörünün toplam sera gazı emisyonları içindeki payı %11,6'dır (OurWorld 2021a). Benzer şekilde, Avrupa Birliği için, 2017'de bölgesel havacılık endüstrisi, ulaştırma endüstrisindeki emisyonların %13,9'unu oluşturarak, karayolu taşımacılığından sonra ulaştırma kaynaklı sera gazı emisyonlarının ikinci en büyük kaynağı haline gelmiştir (EC, 2021). Bu nedenle, Avrupa'da (Emissions Trading System, ETS kapsamında) emisyonların azaltılmasına yönelik olarak taşımacılık endüstrisine yönelik düzenlemeler oluşturulmuş ve 2012 yılından itibaren havacılık sektörü tarafından da benimsenmiştir. Avrupa'daki bu düzenlemelere ilave olarak, havayollarının CO₂ emisyonuna yönelik küresel düzenlemeler de bulunmaktadır. Bunlardan biri, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından uygulanan Uluslararası Havacılık için Karbon Dengeleme ve Azaltma Planı (CORSIA)'dır. Ekim 2016'da ICAO, 2021'den başlayarak, uluslararası uçuşlar için 2020 seviyelerinin üzerindeki emisyonları karşılamak için operatörlerin karbon ofsetleri satın almalarını gerektiren 191 ülke için bir plan oluşturdu (Gill, 2017). En Az Gelişmiş Ülkeler, Gelişmekte Olan Küçük Ada Ülkeleri ve Karayla Çevrili Gelişmekte Olan Ülkeler gönüllü olarak CORSIA programına katılabilse de, bu onlar için zorunlu değildir. CORSIA programının uygulanması 4 aşamadan oluşmaktadır: Temel dönem: 2019–2020, Pilot aşama: 2021–2023 (gönüllü), Birinci aşama: 2024–2026 (gönüllü) ve İkinci aşama: 2027–2035. Mevcut emisyon büyüklüğü göz önüne alındığında, Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA), karbon emisyonunu 2050 yılına kadar %50 oranında azaltma hedefi koymaktadır (IATA 2017).

Bu düzenlemeler sonucunda havayollarının karbon emisyon verimlilikleri ile ilgili çalışmalar literatürde yer almaya başlamıştır (Wang vd., 2020; Liu vd., 2017). Bu

çalışmalarda, metodoloji olarak operasyonel değişkenlere (uçuş saatleri, filo büyüklüğü) ve veri analizine dayalı olarak emisyon verimliliği hesaplanmıştır. Öte yandan, kâr amacı gütmeyen bağımsız bir Alman kuruluş tarafından hesaplanan Atmosfair Havayolu Endeksi, dünyanın en büyük 200 havayolunun karbon verimliliğini karşılaştırmaktadır. Uygulama hem yolcu hem de yük için, yük faktörlerinin yanı sıra her uçuş için uçak tipini, motorları, koltukları ve yük kapasitesini içermektedir.

Bir havayolunun karbon emisyonu, yetkililerden ve resmi raporlardan alınan ayrıntılı veri kaynakları, uzman veri hizmeti sağlayıcıları ve uçak mühendisleri tarafından kullanılan bilgisayar simülasyonları kullanılarak %2'den az hata payı ile ölçülmektedir. (Atmosfair, 2021). Ayrıca bu endeks, belirli bir bölgenin değil, birçok ülkenin havayolu şirketlerini kapsamaktadır. Bu nedenle, karbon emisyon verimliliği açısından havayolları arasında karşılaştırma yapmak için bu endeksi kullanmak daha güvenilir sonuçlar sağlayacaktır.

Bölgeler arasındaki karbon emisyonlarının karşılaştırılması küresel karbon emisyonlarının Asya bölgesinde en yüksek olması gibi büyük farklılıklar göstermektedir (OurWorld 2021). Havayolu yolcu sayısı açısından Asya ve Amerikan havayolu şirketleri öne çıkmaktadır (Statista, 2021). Aynı zamanda gelişmekte olan ülkelerin son yıllarda gelişmiş ülkelere göre daha yüksek ekonomik büyüme oranları elde ettikleri de bilinen bir gerçektir. Bu nedenle gelişmekte olan ülkelere büyüme ile gelir eşişsizliklerinin azalması, alt gelir grubundan üst gelir grubuna gelir transferi yaratması ile birlikte kalite talebini artıracaktır. Dolayısıyla gelişmiş ve gelişmekte olan bölgeler arasındaki farkın azalması beklenmektedir. Öte yandan, bölgesel düzenlemelerdeki farklılıklar dikkate alındığında, havayollarının karbon emisyon verimliliği bölgesel performans açısından ayrı bir inceleme gerektirmektedir. Ayrıca, serbestleşmenin kısıtlandığı ülkelere, bayrak taşıyıcı havayolları kâr peşinde olmamasından dolayı emisyon kısıtlamaları bir öncelik olmayabilir veya tersine, havayollarında artan devlet mülkiyeti, düzenlemelere uymayı daha zorunlu hale getirebilecektir (Aydın ve Aydın, 2021:9).

Havacılık endüstrisinde kısa, orta ve uzun menzilli taşımacılık olarak bilinen üç menzil tipi vardır. Havacılık sektörünün büyümesiyle birlikte enerji tüketimi ve çevreye verdiği zararlı etkiler de her geçen gün artmaktadır. Enerji tüketiminin artmasını önlemek için, uçaklar için enerji verimliliği konusu, her türlü ulaşım için daha önemli hale gelmiştir. Ancak uzun mesafe taşımacılığı, daha yüksek yakıt tüketimi ve yakıt maliyeti nedeniyle diğer taşıma türlerine göre önceliğe sahiptir. Havacılıkta enerji verimliliği, yüksek yakıt fiyatları nedeniyle temel olarak yakıt verimliliği olarak bilinmektedir.

Dünya çapındaki toplam fosil yakıt kullanımının yaklaşık %3'ü havacılıktaki yakıt tüketimine karşılık gelmektedir. Sonuç olarak, uçak emisyonları toplam CO₂ emisyonlarının %3'üne neden olmaktadır (Khandelwal vd., 2013:45-59).

Bu miktarın düşürülmesi için sadece yakıtı daha verimli kullanan uçaklara yatırım yapılmamalı, aynı zamanda mevcut uçaklarda da modifikasyon yapılmalıdır. Bu kullanımın daha büyük bir yüzdesi, %80'i sivil havacılık faaliyetleri tarafından tüketilmektedir (Lee vd., 2013:29-38).

Havacılık endüstrisindeki artan sosyal baskı, hava taşıtlarının çevre üzerindeki etkisini, yani karbon ayak izi ile ilgili etkilerini azaltmak için daha verimli tasarım çözümlerinin geliştirilmesini motive etmektedir. Bu çözümler aerodinamik, yapılar/malzemeler, tahrik ve operasyon olmak üzere dört ana gruba ayrılabilir. Son on yılda, harmanlanmış kanat gövdesi (Okonkwo ve Smith, 2016) ve kafes destekli kanat ve birleşik kanat konfigürasyonları (Cavallaro ve Demasi, 2016) gibi, sürtünmeyi önemli ölçüde azaltarak uçak performansını iyileştirmek için çeşitli yenilikçi tasarımlar sunulmuştur. Bununla birlikte, kanat şeklini iyileştirmek için uyarlanan aerodinamik çözümlere yönelik laminer akış kontrolü ve geçiş çözümleri gibi çalışmalar uçak performanslarının geliştirilmesi için incelenmiştir (Barbarino vd., 2011; Li vd., 2018).

Yapılar ve malzemelerle ilgili olarak, daha fazla kompozit malzeme kullanılması (Calado vd., 2018) ve çok işlevli malzemelerde daha hafif yapıların geliştirilmesi ve inşa edilmesi ile (Sairajan vd., 2016) hem aerodinamik hem de yapısal alanda (uçak sürtünmesi ve ağırlık azaltmaları) ilerleme sağlanmış olurken, daha az yakıt ile çalışabilen motor sistemlerinin geliştirilmesiyle birlikte karbon emisyonunun azaltılmasına yönelik önemli ölçüde mesafe kat edilmesini sağlamıştır.

Araştırmalara göre önümüzdeki yıllarda fosil yakıtların tükenmesi kaçınılmazdır. Bu durum maliyetlerine, verimliliklerine ve tehlikelerine bakarak yeni alternatifler aramaya yol açmıştır. Uçak tasarımcıları ve mühendisler, uçak sistemlerini ve yakıt türlerini değiştirerek yakıt verimliliğini artırmak için çalışmalar yapmışlardır. Özellikle daha az yakıt kullanmak ticari uçaklar için vazgeçilmez bir amaç haline gelmiştir. Taşıma menzili ne kadar uzunsa, yakıt tüketim oranlarının yüksek olması nedeniyle uçağın verimliliğinin önemi o kadar fazla olmaktadır. Yakıt kullanımının azaltılması sadece ekonomik avantajlar sağlamakla kalmamakta aynı zamanda çevresel faydalar da sağlamaktadır (Zhang vd., 2008).

Avrupa Havacılık Araştırmaları Danışma Konseyi (ACARE), 2020 vizyonunun hedeflerine ulaşılmasına ilişkin Stratejik Araştırma Gündemini geliştirmek için kurulmuştur. 2020 hedeflerini şu şekilde açıklamıştır;

- Yakıt tüketimini ve CO₂ emisyonlarını %50 oranında azaltmak,
- NO_x emisyonlarını %80 oranında azaltmak,
- Algılanan gürültüyü %50 azaltmak.

Ayrıca, uçakların vergilendirilirken emisjonsuz hareket etmesi ve sürdürülebilir alternatif yakıtlara odaklanan bir merkez kurulması gibi bazı yeni hedefler eklenmiştir. Bu bağlamda, elektrikli uçaklar ve uçaklarda yakıt kaynağı olarak hidrojen kullanımı için seçeneklerden biri olan More Electric Aircraft (MEA) sistemi son yıllarda ön plana çıkmıştır. MEA ile, pnömatik, mekanik ve hidrolik sistemlerin yerini elektrikli olan sistemlerin alması amaçlanmaktadır (Soykan ve Baharozu ,2015:1-9).

MEA, geleneksel uçaklarla karşılaştırıldığında, faydaları geleneksel uaklarınkinden çok daha fazladır. Ayrıntılı değerlendirmeleri birçok çalışmada ortaya konmuştur (Abdelhafez ve Forsyth , 2009:1-13).

MEA konseptinin yanı sıra, tamamen elektrikli uçak (AEA), elektrikli uçak sistemleri için diğer ana seçenektir. Ancak yakıt hücreleri, piller ve güneş pili teknolojilerinde hayati gelişmelere ihtiyaç duyulacağından, AEA'nın gelecekteki uçak konseptini belirlemesi daha düşük olasılık oluşturmaktadır (Wheeler, 2016:1-5).

Geleneksel yakıt kaynaklarının tükenmesi ve çevresel kaygılar nedeniyle, hidrojen havacılık endüstrisinde alternatif bir yakıt olarak kabul edilmektedir (Contreras vd., 1997:1053-1060). Bir yakıt kaynağı olarak hidrojenin en önemli avantajı, özellikle uzun mesafeli uçuşlar için önemli olan hafifliğidir. Diğer bir deyişle, hidrojen ağırlığına göre yüksek enerji içeriğine sahiptir. Yakıt ağırlığı, bir uçağın maksimum kalkış ağırlığı (MTOW) üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Hidrojen, mevcut jet yakıtları ile karşılaştırıldığında geleceğin uçakları için en uygun yakıt olmasına rağmen bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi, uçakta hidrojen kullanımının dahiyane bir teknoloji ve tasarım gerektirmesidir (Godula-Jopek ve Westenberger, 2016:67-85).

Yeni uçak tasarımlarında güneş enerjili uçaklar, yakıt hücreli uçaklar ve biyoyakıtlı çalışan uçaklar olmak üzere üç farklı enerji kaynağı ana güç kaynağı olarak araştırılmaktadır. Güneş enerjisiyle çalışan bir uçak, uçak endüstrisindeki alternatif enerji kaynaklarını idare etmek için önemli bir uçak sistemidir (Rizzo ve Frediani 2008:57-78).

Güneş pili ve pil teknolojilerinin mevcut durumu nedeniyle yakın gelecekte uzun menzilli uçuşlar için kullanılması mümkün gözükmemektedir (Abbe ve Smith, 2016:770-783).

Yakıt hücresi teknolojileri ise 20. yüzyıldan sonra uçağa güç sağlamak amacı ile çalışılmaya başlanmıştır (Edelman vd., 2004). Şu anda yakıt hücreli uçak modellerinin tamamı kısa menzilli küçük uçaklardır. Uzun menzilli uçuşlarda yakıt hücresi teknolojisini ana enerji kaynağı olarak kullanmak için daha yoğun araştırma ve iyileştirmeler gerekmektedir. Bu nedenle hem güneş enerjili uçak hem de yakıt hücreli uçak kavramları, geleceğin uçak konsepti olarak kabul edilmektedir.

Bio-yakıtlar ise dünyadaki emisyonları azaltmak için bir diğer alternatif yakıt türüdür. Ancak bio-yakıt ile konvansiyonel jet yakıtı arasındaki fiyat farkının uçaklarda kullanılabilmesi için politikalarla azaltılması gerekmektedir. Bugüne kadar uçaklarda bio-yakıtın diğer yakıt türlerinden farkı, bio-yakıt kullanımının kerosen ile karıştırılmasını gerektirmesidir (Mazlan vd., 2017:859-865).

Literatürde yakıtlar ve çevresel faktörler dikkate alınarak geleceğin uçak konseptleri hakkında az sayıda çalışma bulunmaktadır. Konvansiyonel jet yakıtı ve sıvı hidrojenin sera gazı emisyonlarına ilişkin değerlendirmesi (Janic, 2008:428-435) ve (Nojoumi, 2009:1363-1369) tarafından yapılmıştır. Sonuçlar hidrojenin zararlı emisyonları azaltmak için iyi bir alternatif yakıt olduğunu göstermektedir.

Kirletici emisyonları ve gürültüyü azaltmak için, geleceğin uçak teknolojisi için önerilen farklı uçak tasarımları ve tahrikleri 2014 yılında değerlendirilmiştir (Graham vd., 2014:36-51). Bu çalışmanın sonucu, uçak yapılarının değiştirilmesinin 2050 Avrupa Havacılık Araştırmaları Danışma Konseyi (ACARE) hedeflerine ulaşmak için yeterli olmadığını göstermektedir. CO₂ ve NO_x emisyonlarının yaşam döngüsü dikkate alınarak 2017 yılında uçaklar için potansiyel yakıtların değerlendirilmesi yapılmıştır. Ayrıca alternatif yakıtların güncel maliyetlerinden bahsedilmektedir. Bu çalışmanın sonuçları, uçak yakıtı olarak sıvı hidrojenin en çok tercih edilen seçenek olduğunu göstermektedir (Bicer ve Dincer, 2017:22-38).

PtL (Güçten sıvıya) elde edilen sürdürülebilir havacılık yakıtları, mevcut altyapıların, araçların ve motorların daha fazla kullanılabilmesi avantajına sahiptir ve bu yakıtlara geçişin kademeli olarak gerçekleşmesine izin vermektedir, çünkü geleneksel jet yakıtı ile harmanlama en azından belirli seviyelerde düşüşe kadar mümkün olmaktadır (Schmidt vd., 2016).

Ayrıca mevcut yanmalı motorların iyileştirilmesi (Gohardani vd., 2011:369-391); aero itici entegrasyonun iyileştirilmesi ve dağıtılmış itiş gücü (Kirner vd., 2015:42-50); hafif uçaklar için yakıt (Fernandes vd., 2018:11-33); güneş pilleri gibi farklı enerji kaynakları kullanımı (Abbe ve Smith, 2016:770-783); yakıt kaynağı olarak hidrojen (Khandelwal vd., 2013:45-59) gibi farklı çalışmalar da mevcuttur.

Operasyon açısından, örneğin kalkışta (Koudis vd., 2017:15-28), inişte (Rodriguez-Díaz vd., 2019:46-56) ve alçalma esnasında (Zhu vd., 2019:869-882) yakıt tüketimini azaltmak için çeşitli çalışmalar mevcuttur.

2.1. Havacılıkta Pil Teknolojisi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Pil teknolojisinin bir uçak itici aracı olarak kullanılması, henüz araştırmaların ilk aşamalarında olan bir kavramdır. Li-iyon (Lityum-iyon) pil, taşınabilir elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak son teknoloji Li-iyon piller, binlerce hücre ve ağır piller gerektireceğinden, bu parçaların yönetimi ve soğutulması yeterli seviyede olmamaktadır. Dolayısıyla Lityum-iyon pil teknolojisinin henüz uygulanabilmesi mümkün gözükmemektedir (Brelje ve Martins, 2019:1-19).

Bilimsel araştırma ve geliştirmelerin hedefinin tamamen elektrikli bir tahrik sistemi geliştirerek emisyonları sıfıra indirmek amacıyla yaptığı araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Halihazırda Airbus E-Fan (Airbus, 2019) gibi genel havacılık için tamamen elektrikli uçakların bazı prototipleri mevcuttur, ancak bu çalışmalar sonucu mevcut pillerin önemli ölçüde daha düşük özgül enerji yoğunluğu nedeniyle fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında neredeyse yarı yarıya sayılabilecek daha küçük menzil (300 km.'den az) imkânı sundukları gözlemlenmiştir. Bu sorun, uçağın boyutları büyüdükçe daha da büyümektedir. Bu nedenle, özellikle hibrit elektrikli tahrik (Pornet ve Işıkveren, 2015; Brelje ve Martins, 2019) ve pil teknolojisi (Gnadt vd.,2019) ile ilgili olmak üzere, tahrikle ilgili çeşitli alanlarda çalışmalar yürütülmektedir.

Havacılık endüstrisinde yüksek performanslı uygulamalar için gelecek vaat eden teknolojiler olan LieS (Lityum-sülfür) ve Li-air (Lityum-air) pil türleri geliştirmenin ilk aşamalarında. LieS pili, aynı enerji gereksinimleri için ağırlık azaltımına veya aynı pil ağırlığı için enerji kapasitesi artışına izin vermektedir. Ek olarak, toplam hücre yoğunluğu yaklaşık 1 kg/L'dir ve Li-ion pillerden çok daha düşüktür (Lorenz vd., 2012). LieS hücreleri manganez, kobalt, nikel veya demir gibi ağır metallere oluşmadığından, bu, katotu yoğunlukla bu malzemelerden oluşan polimer bazlı Li-ion hücrelere kıyasla daha

küçük bir çevresel etki olarak yansıtacaktır. Alanda yürütülen araştırmaların niteliği ve niceliği, kimyadaki gelişmelerin nispeten kısa vadede gerçekleşeceğini göstermektedir, ancak daha fazla araştırmanın süresi ve bu uygulama için kullanımının avantajları belirsizliğini korumaktadır. LieS pilleri, geleneksel hava araçlarına benzer bir menzilde uçabilen daha çevre dostu tahrik sistemlerinin geliştirilmesi için önemli bir fırsat sunmaktadır (Gartenberg, 2017; Siemens, 2016).

Li-air (Lityum-air), henüz erken geliştirme aşamalarında olan yeni bir teknolojidir ve araştırmalar Li-air hücrelerinin uzun vadede Li-ion hücrelere göre 4 ila 9 kat daha az çevresel etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Masson ve Luongo, 2007:1-6).

Gelinen noktada pil teknolojisinin ana itici güç olarak kullanılması, çoğu uçak için gereksinimlerin altındadır ve şu an için sadece kısa menzilli bir görev için sınırlı taşıma kapasitesine sahip küçük hava araçlarına uygundur. Çünkü bu tür bir görevi gerçekleştirmek için gereken toplam enerji, ticari havacılık için gerekli olan enerjiden önemli ölçüde daha düşüktür (de Souza vd., 2018:444-468).

Elektrikli uçaklarla ilgili olarak, şu anda 60'tan fazla proje devam etmektedir (Gnadt vd., 2019:1-30). Siemens ve Pipistrel gibi şirketler, elektrikli uçakların test uçuşlarını gerçekleştirmede başarılı olmuştur. Bu uçakların çoğu nispeten küçük olsa da örneğin iki ila 20 yolcu koltuğuna sahip hafif uçaklar, en az 100 yolcu taşıyabilen daha büyük uçakların geliştirildiği açıklanmıştır; bu tür uçaklar, havacılık sektöründen kaynaklanan emisyonları önemli ölçüde azaltabilir. Örneğin Siemens, küçük bir elektrikli uçağı başarıyla test ettiklerini ve 2030 yılına kadar 100 yolcu koltuğuna sahip bir ticari uçak geliştireceklerini açıklamıştır (Siemens, 2017).

2.2. Hidrojen Teknolojisi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Hükümetlerin ve kurumların artan beklentilerine paralel olarak, bu teknolojilere odaklanan bir dizi geliştirme projesi üstlenilmiştir. Hidrojenli uçaklarla ilgili bir rapora göre (Roland Berger, 2020), hidrojenle çalışan yedi uçak projesi devam etmektedir. Bu yedi projeden birine liderlik eden ZeroAvia, Eylül 2020'de hidrojen yakıt hücreleriyle çalışan bir uçağın test uçuşunu başarıyla gerçekleştirdiklerini ve 2023'te ticari operasyonlara başlayacaklarını duyurmuştur (ZeroAvia, 2020). Buna ek olarak, Airbus'ın üç projesi, H2GEAR, FlyZero ve Project Fresson; AeroDelft'in Phoenix ve İsveç ulusal projesi H2JET gibi Birleşik Krallık hükümeti tarafından desteklenen üç proje de dahil olmak üzere hidrojenle çalışan uçaklar için birkaç proje devam etmektedir. Eylül 2020'de

Airbus, hidrojen tahrikine dayalı konsept uçağı üretmiştir. Airbus, bu uçaklardan gelecekteki uçaklar için en umut verici sıfır emisyon teknolojilerinden biri olarak söz etmiş ve ayrıca 2035 yılına kadar 120 ila 200 yolcu koltuğuna sahip daha büyük hidrojen uçaklarını ticarileştireceklerini duyurmuştur (Airbus, 2020).

Teknik, ekonomik fizibilite ve çevresel yönleri üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Clean Sky 2 Ortak Teşebbüsü (Clean Sky 2 JU) ve Yakıt Hücreleri ve Hidrojen 2 Ortak Teşebbüsü (FCH 2 JU) tarafından yayınlanan bir raporda, hidrojen uçağının iklim üzerindeki etkisini geleneksel jet uçakları ve sentetik yakıtlı uçaklarla azaltma potansiyeli karşılaştırılarak ve hidrojen tahrikinin gelecekteki tahrik teknolojisi karışımının önemli bir parçası olma potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ek olarak, hidrojenin kısa ila orta menzilli uçaklar için bir karbon giderme seçeneği olarak daha uygun olduğu, sentetik yakıtın ise uzun menzilli uçaklar için daha uygun olacağı öngörülmüştür. Raporlar ayrıca 2000 km menzilli hidrojen uçağının pazara giriş süresinin 15 yıl içinde olacağını belirtmektedir (Clean Sky 2 JU ve FCH 2 JU, 2020).

2.3. Ticari Havacılık İçin Küresel Yakıt Tüketiminin Modellenmesi

Ticari havacılığın mevcut ve gelecekteki iklim etkisini değerlendirmek için güvenilir uçak yakıt tüketimi ve emisyon modelleri büyük öneme sahiptir. Yakıt tüketimi modellemesinin en temel biçiminde, uçuşlarda seyir süresi, tek bir seyir aşamasıyla yaklaşık olarak hesaplanmaktadır (Lee vd., 2001:167-200). Bu durum, genellikle taksi, kalkış, tırmanış, seyir, yaklaşma ve iniş olarak ayrılan diğer kritik uçuş aşamalarını yetersiz bir şekilde açıklamaktadır. (Ahearn vd., 2017).

Genel olarak, karmaşık modellerin kullanımı, yüksek hesaplama maliyeti ve sınırlı veriden oluşmaktadır.

Yanto ve Liem (2018), üç farklı havayolundan alınan yakıt hacimlerini değerlendirildiğinde tahmin hatasını %6'dan az tutarken, yakıt yakma modellemesinin hesaplama maliyetini büyük ölçüde azaltmak için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemin ABD havayolları için uygulanması, ABD Ulaştırma Bakanlığı'nın (USDOT) Ulaştırma İstatistikleri Bürosu veri tabanı tarafından sağlanan yük verilerinin kullanılabilirliği sayesinde mümkün olmuştur. Bununla birlikte, ilgili verilere ABD dışında kolay şekilde erişilemediğinden, bu yöntemin küresel havacılığa uyarlanmasında zorluk yaşanmaktadır. Bu tür emisyon envanter araçlarından biri, Amerika Birleşik Devletleri Federal Havacılık İdaresi'nin (FAA) ticari havacılıktan kaynaklanan yakıt tüketimi ve

emisyonların yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlüklü tahminlerini sağlayan Havacılık Çevresel Tasarım Aracıdır (AEDT). Sistem, teknoloji ve operasyonel senaryoların uçak yakıtı kullanımı ve emisyonları üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bir yöntem sağlamak üzere geliştirilmiştir (Ahearn vd., 2017). AEDT, uçuş rotalarını modellemek için mevcut olduğunda radar uçuş izi verilerini kullanır ve mevcut olmadığında, mevcut uçuş rota verilerinin seyir irtifalarının ve yatay iz dağılımlarının (büyük daire yolu etrafında dağılmış) dağılımlarına dayalı olarak uçuş rotalarını tahmin etmektedir. AEDT yöntemi, yüksek derecede ayrıntı sağlar, ancak çoğu doğrudan Federal Havacılık Dairesinden gelen ve ücretsiz olarak elde edilemeyen geniş bir girdi verisi kümesine dayanmaktadır. Benzer şekilde karmaşık bir model de EUROCONTROL'un gelecekteki düzenleyici politika seçeneklerinin ve trendlerin uçak yakıtı yakma, emisyonlar ve gürültü üzerindeki etkisini değerlendirmek için tasarlanmış Gelişmiş Emisyon Modelidir (AEM). Yukarıda belirtilen yüksek doğruluklu modeller, EUROCONTROL'un Uçak Verileri Tabanından (BADA) alınan uçak performans verilerine dayanırken, Lissys Ltd. şirketi geliştirilmiş bir performans modeli de yaygın olarak kullanılmaktadır (Nuic vd., 2010:850-866).

2.3.1. Piano-X Uygulaması

Lissys'in ticari Piano-X modelinin çıktısı, uçuşa özgü emisyonları (ICAO, 2017) ve küresel karbon muhasebesini hesaplamak için kullanılmıştır (Graver vd., 2019:16; Winther ve Rypdal, 2019). Dray (2018), entegre bir değerlendirme modeli yolcular, havayolları, havaalanları ve diğer sistem aktörleri arasındaki etkileşimleri araştırmak için Piano-X'i kullanmıştır. AEDT modeli gibi Piano-X de yalnızca ücretli bir lisansla sunulmaktadır ve gelişmiş emisyon modelinin kullanımı için herhangi bir satın alma gerekli olmasa da yine de bir lisans gerekmektedir.

2.3.2. Atmosfair Havayolu Endeksi

Yakınsama terimi genellikle ekonomik literatürde düşük gelirli ekonomilerin sonunda yüksek gelirli ekonomileri yakalama eğiliminde olduğunu belirtmek için kullanılır (Salai-Martin, 1996:1019-1036). Havayollarının karbon emisyon verimliliğindeki yakınsamayı inceleyen çalışma sayısı sınırlıdır. Örneğin, Liu vd. (2017:99-109), küresel karbon emisyonu performans endeksini kullanarak 12 Çin

havayolunun karbon emisyon performansı üzerindeki yakınsama etkisini ölçmüştür. Bunun dışında havayollarına dayalı bazı çalışmalarda karbon emisyonu dikkate alınmadan genel verimlerin yakınsama değerleri analiz edilmiştir. Chen vd. (2018:77-86), Çin havayolları için Malmquist endeksini kullanarak, havayollarının teknolojik değişim seviyelerinde yakınsama araştırmaları yapmıştır. Bununla birlikte, bu etkinliklerin bölgesel farklılıklarını ayrıntılı olarak inceleyen çalışma sayısı azdır. Örneğin, Arjomandi vd. (2018:389-403), verimlilik açısından Asya ve Avrupa havayollarını devlet mülkiyeti açısından araştırmıştır. Backx vd. (2002:213-220), kamu sektörü havayollarının özel sektör havayollarına göre daha düşük performans gösterdiğini belirtmektedir. Benzer şekilde Chow (2010:320-324), devlete ait olmayan havayollarının devlete ait emsallerinden daha iyi performans gösterdiğini belirtmektedir.

Payán-Sánchez vd. (2019:1-17), charter havayollarının bölgesel ve net taşıyıcı havayollarından daha çevresel olarak verimli olduğunu bulmuşlardır. Tüm bu çıkarımlar, devlet mülkiyetinin havayollarındaki payının ve havayolu iş modelinin türünün, havayollarının çevresel performansı üzerindeki etkilerinin de araştırılması gerektiğini göstermektedir.

Atmosfair Havayolu Endeksi, karbon emisyonunu ölçmek için bağımsız Alman kuruluşu Atmosfair tarafından 2011'den beri hesaplanmaktadır (Atmosfair, 2021). Hesaplama her bir havayolu, uçuş süresine göre endekste 0 ile 100 arasında verimlilik puanı kazanmaktadır.

Karbon emisyon ölçümünü kilometre başına düşen emisyonlar, yolcu yükü faktörleri, koltuk konfigürasyonu, uçak tipi ve kargo kapasitesi gibi endeks tarafından dikkate alınan etkileyen faktörler değerlendirilmektedir (Mayer vd., 2015:82-89). Mevcut çeşitli çevresel performans ölçütleri olmasına rağmen, bunların tümü öznel ölçülere dayanırken, Atmosfair Havayolu İndeksi daha nicel istatistiklere dayalı bir performans ölçütü olarak kabul edilmektedir (De Grosbois, 2013). Literatürdeki birkaç çalışmada bu indeks farklı araştırma soruları ile birlikte kullanılmaktadır. Örneğin, Mayer vd. (2015), havayollarının çevresel performansı ile eko-pozitiflik arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Hagmann vd. (2015:37-45), havayollarının yeşil imajı ile yolcu algıları ve havayolu seçimi arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Payán-Sánchez vd. (2019), küresel ittifakların havayollarının çevresel performansına katkısını incelemiş; hepsi çalışmalarında Atmosfair Havayolu Endeksi'ni kullanmıştır.

Daha fazla göstergelyi kapsayarak hesaplanan Atmosfair Endeksi'ne göre karbon salınımı, havayolu şirketlerinin emisyon verimliliği, bölgeler arasındaki gelişmişlik

düzeıı ve teknolojik uyum farklılıkları nedeniyle farklılık göstermektedir. Bununla birlikte, nihayetinde değişen gelişim seviyeleri arasındaki boşluğu kapatmak, havayolu şirketlerinin karbon salınım emisyonları üzerinde olumlu bir etkiye sahip olabilecektir. Bu nedenlerle, literatürde, havayolu şirketlerinin karbon emisyonlarının Atmosfair Endeksi kullanılarak bölgesel anlamda araştırılması ve havayolunda devlet sahipliğinin etkisi ve iş modeli ile incelenmesi konusunda bir araştırma boşluğu bulunmaktadır. Havayolu şirketlerinin CO₂ emisyon verimliliklerindeki yakınsamanın zaman içinde incelenmesi gerekmektedir. Bu etkiler incelenirken havayollarının iş modeli göz önünde bulundurulmalıdır (Aydın ve Aydın, 2021:17811-17820).

2.3.3. GREET Havacılık Modülü

Amerika Birleşik Devletleri Argonne Ulusal Laboratuvarı tarafından geliştirilen GREET (Sera gazları, Düzenlenmiş Emisyonlar ve Teknolojilerde Enerji Kullanımı) havacılık yaşam döngüsü analizi (LCA) modülü, hem fosil hem de biyolojik türevli havacılık yakıtları dahil olmak üzere çeşitli havacılık yakıtı üretim yollarının çevresel etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Yaşam döngüsü analizi, genellikle sistemlerin çevresel ölçümlerinin bütünsel bir karşılaştırmasını sağlayan teknolojilerin çevresel etkilerini değerlendirmek için yapılmaktadır.

GREET modeli, ABD Enerji Bakanlığı'ndaki çeşitli programların desteğiyle yıllık olarak geliştirilmekte ve güncellenmektedir. Petrol bazlı ve sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF) dahil olmak üzere çok çeşitli ürünlerin enerji ve çevresel etkilerini sistematik olarak incelemek üzere yapılandırılmıştır. GREET modülü kullanılarak süreç düzeyinde yaşam döngüsü analiz sonuçları oluşturulabilmekte ve teknolojilerin tedarik zinciri boyunca emisyonlarının belirlenmesi sağlanabilmektedir.

GREET havacılık modülünde, kullanıcılar yaşam döngüsü analizi (LCA) simülasyonu için temel parametreleri değiştirebilmektedir. Havacılık modülünde, kullanıcılar yeni sürdürülebilir havacılık yakıtlarının üretim yollarını ekleyebilmekte ve ardından sonuçları oluşturabilmektedir. ABD Enerji Bakanlığı'na ek olarak, Amerikan Federal Havacılık Dairesi (FAA), GREET havacılık modülünün geliştirilmesini ve uygulanmasını desteklemiştir (Lee vd., 2022:1).

Argonne Ulusal Laboratuvarı, GREET 2019'da yerleşik olan ve CORSIA için kullanılan ICAO onaylı yollara ilişkin parametreleri içeren "GREET for ICAO CORSIA" (ICAO, GREET) sürümünü geliştirmiştir. Karbon dengeleme ve azaltma için

sürdürülebilir havacılık yakıtları üretim yollarının yaşam döngüsü ve sera gazı emisyonlarının (karbon yoğunlukları) hesaplanmasına katkıda bulunmak üzere Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü'nün (ICAO's) Yakıtlar Görev Grubuna (FTG) katılmıştır ve katılan diğer kurumlar tarafından kullanılmaktadır (ICAO 2019b).

Tarihsel olarak, GREET modelinin içinde yer alan bir GREET havacılık modülü ve ICAO-GREET, havacılık yakıtlarının ve uçakların çevresel etkilerini değerlendirmek için kullanılmıştır. GREET ve ICAO'nun sunduğu tüm mevcut yaşam döngüsü envanteri (LCI) ile havacılık modülünün bağımsız ve kullanıcı dostu bir versiyonuna olan ilgi, kullanıcıların havacılık yakıtları ve uçak operasyonları için kolayca sonuçlar üretmesini sağlamaktadır. Bu amaçla Argonne Ulusal Laboratuvarı, en güncel veri kümeleriyle tutarlı bir havacılık LCA platformuna sahip olmak için etkileşimli, bağımsız bir havacılık modülü geliştirmiştir. Kolay kullanım sağlamak amacıyla modül, etkileşimli bir kullanıcı arabirimini etkinleştirmek için Microsoft Excel programını kullanmaktadır. Kullanıcı dostu bir arayüz kullanarak güvenilir ve tutarlı veri kümelerine dayalı karşılaştırılabilir LCA sonuçları üretilmektedir. Hepsinden önemlisi, çeşitli süreçlerin/yolların girdi ve çıktılarının şeffaf bir şekilde karşılaştırılmasını sağlamak için tüm yollar için kullanılabilir bir veri yapısı oluşturulmaya çalışılmıştır. Veri setleri diğer kaynaklardan kolaylıkla içe aktarılabilen, veriler/sonuçlar başka amaçlar için dışa aktarılabilir. Ayrıca, modül, kullanıcıların parametreleri değiştirebileceği ve ilgili sonuçları etkileşimli olarak kontrol edebileceği bir gösterge panosuna sahiptir (Wang vd., 2021).

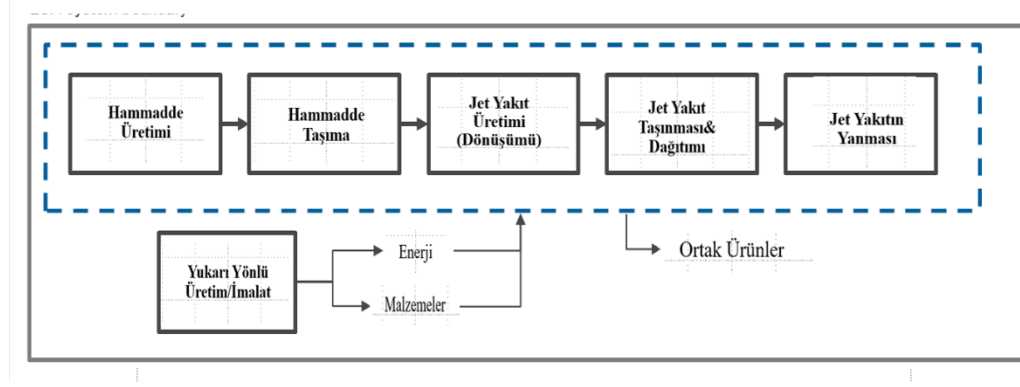
2.3.3.1. Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) Yöntemleri

Havacılık yakıtlarının LCA sistem sınırı Şekil 1'de gösterilmiştir. Sistem sınırı, hammadde üretimi, hammadde taşımacılığı, jet yakıtı üretimi, jet yakıtının nakliyesi ve dağıtımı ve jet yakıtının yanması dahil olmak üzere havacılık yakıtı üretim yollarının tedarik zincirinin tüm aşamalarını kapsamaktadır. Havacılık yakıtlarının yaşam döngüsü “well-to-wake” (WTWa) döngüsü olarak adlandırılmaktadır. Yaşam döngüsünde süreçten kaynaklanan tüm emisyonlar, girdi enerjisi ve malzemelerin üretiminden kaynaklanan emisyonlar hesaba katılmaktadır. WTWa sonuçları, jet yakıtı üretiminin MJ (Megajoule veya galon) cinsinden sunulmaktadır. Atık/artık hammaddeler için, ana ürün (örn. mısır tanesi) emisyon yüklerini üstleneceğinden, hammadde üretimi,

hammadelerin toplanmasından itibaren başlamaktadır (Wang vd., 2021). Öte yandan, ICAO tüm yan ürünleri işlemek için enerji tahsisini kullanmaktadır (ICAO 2019b).

Şekil 2. 1 Taşıma Girdileri Örneği.

Kaynak: GREET Aviation Module Instruction Manual, 2022:3.



Havacılık modülünün kapsadığı çevresel metrikler, GREET modelindekilerle aynıdır. Yaşam Döngüsü Analizi sonuçları, türüne (yani toplam enerji, fosil enerji, petrol, doğal gaz ve kömür), su tüketimine, hava kriteri kirletici emisyonlara CO, SO_x, NO_x ve GHG emisyonlarına (CO₂, CH₄ ve N₂O) göre enerji kullanımı için oluşturulabilir. Sera gazı emisyonları için modül, Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) Beşinci Değerlendirme Raporu'ndaki küresel ısınma potansiyeli (GWP) değerlerini kullanmaktadır ve sonuçları gram cinsinden üretmektedir.

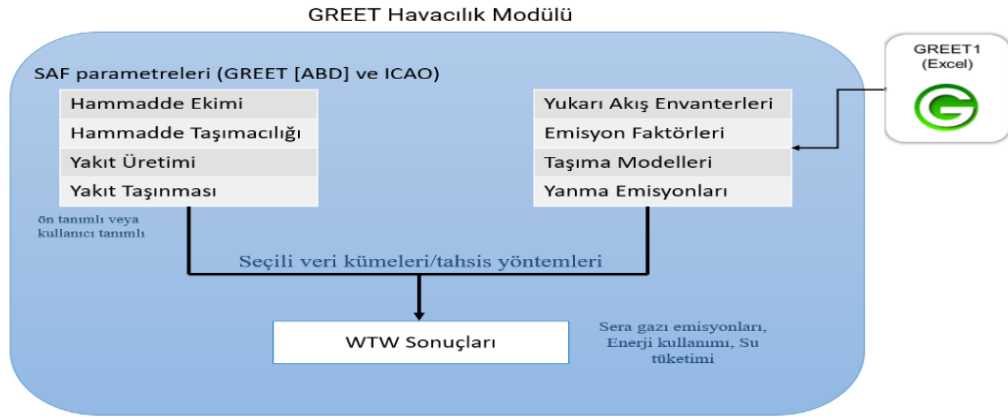
Hammadde üretimi (örneğin gübre kullanımı) veya jet yakıtı üretimi (örneğin enerji veya kimyasal girdiler) ile ilişkili ana parametreler veri bölümünde listelenmektedir, GREET ve ICAO olmak üzere iki ana veri setinden faydalanılmaktadır. GREET veri kümeleri, kapsamlı araştırma faaliyetlerinden elde edilen GREET içindeki havacılık modülündeki yollarını içermektedir. ICAO veri kümeleri, ICAO Yakıt Görev Grubu (FTG) uzmanları (ICAO 2019b) tarafından karbon yoğunlukları (CI) değerlerini hesaplamak için kullanılan ayrıntılı parametrelerle birlikte CORSIA belgesinde (ICAO 2019a) listelenen tüm ICAO onaylı yollardaki verileri içermektedir.

2.3.3.2. Havacılık Modül Yapısı

Bu modülde GREET veri kümeleri kullanılmaktadır (Şekil 2.1). Havacılık modülü, GREET'ten ithal edilen hammadde ve yakıt üretimi için kullanılan enerji ve malzeme girdileri için yukarı akış envanterlerini içermektedir (Wang vd., 2021).

Çeşitli uçak tiplerindeki emisyon faktörleri, ulaşım türleri ve jet yakıtı yanma emisyonları GREET modelinden alınmıştır. Ayrıca, proses giriş ve çıkışlarına ilişkin veri

setlerini de içermektedir. GREET ve ICAO'dan (ICAO, 2019b) toplanan ham madde yetiştirme, ham madde nakliyesi, yakıt üretimi ve yakıt nakliyesi bilgileri için parametreler uygulanmıştır. Jet yakıtı üretim parametreleri ile GREET emisyon envanterlerini birleştirerek, yaşam döngüsü aşamalarına göre sera gazı, türe göre enerji kullanımı, su tüketimi ve önemli hava kirletici emisyonları dahil olmak üzere WTWa sonuçları üretilebilmektedir.

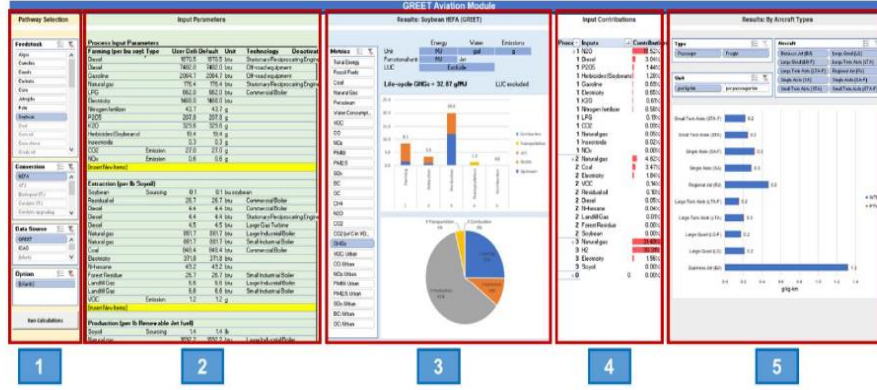


Şekil 2. 2 GREET Havacılık Modülünün Yapısı ve Veri Etkileşimi.
Kaynak: GREET Aviation Module Instruction Manual, 2022:3

Gösterge paneli sekmesi, kullanıcıların havacılık modülünün her sekmesine gitmeden seçenekleri seçebileceği, parametreleri değiştirebileceği ve ilgili sonuçları kontrol edebileceği bölümdür. Sarı renkli giriş sekmeleri (Süreçler, LCI, Taşıma, Yakma) tüm ana veri kümelerinin listelendiği bölümdür. Gri renkli (LCProfile, EF'ler ve Yük) destekleyici bilgi sekmeleri, GREET'ten içe aktarılan bilgilerin sunulduğu bölümü oluşturmaktadır. Bu destekleyici sekmeler, girişler sekmesindeki işlem giriş /çıkış bilgileriyle birlikte WTW sonuçlarını hesaplamak için kullanılmaktadır.

2.3.3.3. Gösterge Paneli

Gösterge paneli, Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Birinci bölüm yol seçimi, ikinci bölüm girdi parametreleri, üçüncü bölüm üretilen ve kullanılan yakıt sonuçlarını, dördüncü bölüm girdi katkısını ve beşinci bölüm uçak tiplerine göre sonuçları göstermektedir.



Şekil 2. 3 GREET Havacılık Modülü Göstergesi.

Kaynak: GREET Aviation Module Instruction Manual, 2022:5.

2.3.3.3.1. Yol seçimi

Bu panelde kullanıcılar hammadde, dönüştürme teknolojisi, veri kaynağını seçebilmektedir.

Öge listesi, LCI sekmesindeki veri kümeleri temelinde güncellenmektedir. Hammadde, fosil (örneğin, ham petrol, kömür ve fosil doğalgaz), biyokütle (örneğin, mısır, soya fasulyesi ve şeker kamışı) ve atık/artık (örneğin, orman artığı) hammaddelerini içermektedir. Her simülasyon için yalnızca bir besleme stoğu seçeneği seçilebilmektedir. Bu özellik seçim esnasında mavi renkle vurgulanmaktadır.

Ek seçimin gerekmesi durumunda, Seçenek paneli mevcut seçenekleri artırmak için kullanılabilir. Örneğin, birden fazla kurum tarafından değerlendirilen farklı parametre setleri olabilir. Palm yağı HEFA (Hidro işlenmiş esterler ve yağ asitleri) yolları veya etanolden jete (ETJ) dönüşüm yollarının, etanol ve jet yakıtı üretimi arasındaki ısıtma entegrasyon seçeneklerine bağlı olarak farklı sonuçları olabilmektedir.

Modülde gömülü çeşitli dönüştürme teknolojileri de bulunmaktadır. Fosil hammaddeler için, ham petrol rafine işlemi veya doğalgaz/kömürün Fischer-Tropsch (FT) metodu ile gazlaştırma işlemi bulunmaktadır. Biyokütle besleme stoklarını sürdürülebilir havacılık yakıtlarına dönüştürmek için gazlaştırma FT, hidro işlenmiş esterler ve yağ asitleri (HEFA), alkolden jete (ATJ), etanolden jete (ETJ), şekerden jete (STJ), ve sentezlenmiş izo-parafinler (SIP) şeklinde seçenekler sunulmaktadır.

Hammadde/veri kaynağı seçimlerine bağlı olarak, kullanılmayan seçenekler gri renkte gösterilmektedir. Bunlar hala seçilebilirken, sonuçları sunmak için ilgili besleme stoğu ve veri kaynaklarının seçilmesi gerekmektedir.

Tüm öğeler seçildikten sonra, kullanıcılar daha sonra giriş parametresi panelini ve sonuç bölümlerini güncelleyen "Hesaplamaları Çalıştır" düğmesini seçmelidir. Seçimlerden biri eksikse, kullanıcıdan seçimi tamamlamasını isteyen bir mesaj kutusu açılacaktır.

2.3.3.3.2. Girdi parametreleri

'Hesaplamaları Çalıştır' butonuna tıklandığında, 'Girdi Parametreleri' paneli güncellenmektedir. Sayfa üç ana tablo içermektedir: (1) Proses Girdi Parametreleri, (2) Tahsis ve (3) Taşıma.

(1) Proses Girdi Parametreleri

Proses Girdi Parametreleri tablosu üretim seviyesindeki tüm girdileri ve çıktıları göstermektedir. Bu tablo, LCI sekmesinden seçilen bilgilerin verilerinden oluşmaktadır. Bu tablo etkileşimlidir; yani kullanıcılar, LCI veri kümelerine eklenecek değerleri güncelleyebilmekte veya yeni öğeler ekleyebilmektedir. Sonuçlar buna göre güncellenecektir. İşlem adı ve her işlemin işlevsel birimi, her işlemin başlığında sunulmaktadır. Bu tabloda; Girdiler, Tür, Kullanıcı tanımlı, Varsayılan, Birim, Teknoloji ve Devre Dışı Bırakma olmak üzere altı sütun bulunmaktadır. Girdiler, kullanıcıların giriş enerjisini/materyallerini seçebileceği yerdir. Modül, yukarı akış emisyonlarını hesaplayacaktır (örneğin, girdi kalemlerinin üretimi ve nakliyesi). Teknoloji sütununda, kullanıcılar ilişkili teknolojileri seçebilir. Örneğin, Girdiler sütununda dizel yakıt seçilirse, Teknoloji sütununun açılır menüsünde mevcut dizel yanma teknolojileri sunulur. Belirli bir teknoloji seçilirse, enerji girdisini kullanmanın etkisi hesaba katılır (örneğin dizel yanması). Tip sütununda 'Emission' seçilirse, Girişler sütununa yanmayan emisyonları da eklenebilmektedir. Bir sürecin çıktısı bir sonraki süreç için girdi olarak kullanıldığında, kaynak oluşturabilir. Bu durumda, önceki işlemin etkisi devam edecektir.

Değerlere sahip iki sütun (Kullanıcı Tanımlı ve Varsayılan), sırasıyla hesaplamada kullanılan değerleri ve varsayılan değerleri sunmaktadır. Eğer Kullanıcı Tanımlı değerler değiştirilirse, değişiklikler LCI sekmesinde yapılacak ve gösterge tablosundaki sonuçlar güncellenecektir. Birim sütunu, her satırın değerlerinin birimini temsil etmektedir.

Kullanıcılar, seçenekleri belirleyerek ve sarı renkli satırlardaki değerleri girerek yeni bir öğe ekleyebileceklerdir. Yeni satır LCI'ye eklenecek ve sonuçlar güncellenecektir. Bir kullanıcının belirli bir girdinin etkisini ortadan kaldırması durumunda, Devre Dışı Bırakma sütunu kullanılabilir. Herhangi satıra "1" seçildiğinde veya yazıldığında satır hesaplamadan kaldırılacaktır.

(2) Tahsis

Bu tablo, İşlemler sekmesinden okunan her işlemin ortak ürün tahsis yöntemini sunar. Tahsis yöntemi kütle, enerji ve piyasa arasından seçilebilir. İşlemler sekmesinde tanımlanan seçime bağlı olarak, karşılık gelen tahsis faktörleri sunulacaktır. Kullanıcılar tahsis yöntemini değiştirebilmekte veya tahsis faktörlerini değiştirebilmektedir.

Yer değiştirme etkisini hesaba katmak için kullanıcılar Proses Girdi Parametreleri tablosunu kullanabilmektedir. Kullanıcılar, diğer girdiler gibi, Kullanıcı Tanımlı sütununda negatif bir değere sahip, yeri değiştirilmiş bir öge ekleyebilmektedir. Bu, yan ürünlerin kredilerini negatif girdi olarak kabul etmek gibi varsayılabilir.

(3) Taşıma

Bu tablo, Taşıma sekmesinden okunan hammaddeler, ara ürünler ve yakıtlar için tüm taşıma çeşitlerini sunmaktadır. Kullanıcılar taşınacak öğeleri, ulaşım modunu, paylaşımı, mesafeyi ve şehir paylaşımını seçebilmektedirler.

2.3.3.3.3. Sonuçlar (MJ veya üretilen Galon yakıtla)

Bu bölüm, seçilen yolların yaşam döngüsü analizi sonuçlarını MJ (Mega joule) veya üretilen galon yakıt cinsinden göstermektedir. Tablonun sol tarafında bulunan tüm çevresel metriklerin (enerji kullanımı, su tüketimi, hava kirletici emisyonları ve GHG emisyonları) bulunduğu bir bölüme sahiptir. Ayrıca, kullanıcılar ölçüm birimlerini tercih edebileceklerdir. İlk şekil, seçilen yakıt üretim yolunun seçilen ölçümlerinin LCA sonuçlarını gösterir. Ayrıca tablonun alt bölümünde süreçteki toplu katkıyı gösteren pasta grafiği bulunmaktadır.

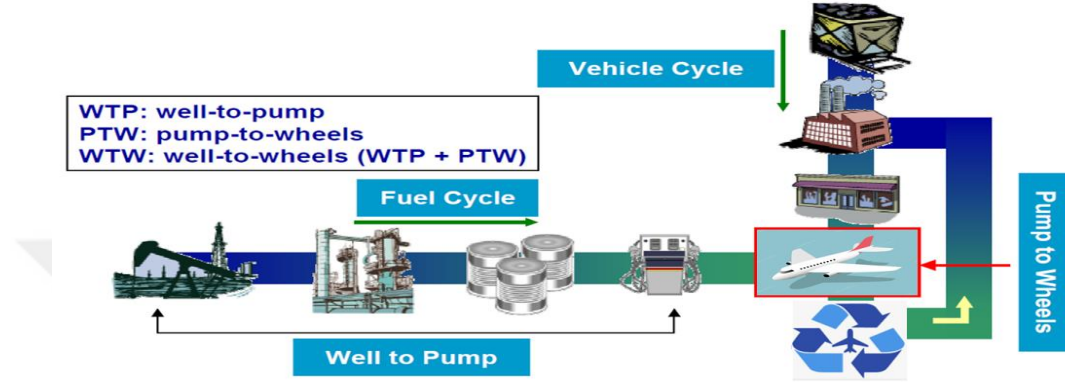
2.3.3.3.4. Girdi Etkileri

Bu tablo, Girdi Parametreleri sekmesinde tanımlanan giriş parametrelerinin etkilerini göstermektedir.

2.3.3.3.5. Uçak Tiplerine Göre Sonuçlar

Farklı uçak tipleri, farklı yakıt tüketim oranları ve seyahat türleri nedeniyle hizmet fonksiyonel birimleri (yük için kg-km ve yolcular için yolcu-km) açısından farklı LCA sonuçlarına neden olabilmektedir. Bu bölüm, 6 farklı yolcu uçağı tipi (Tek Koridor [SA], Küçük İkiz Koridor [STA], Büyük İkiz Koridor [LTA], Büyük Dörtlü [LQ], Regional Jet [RJ] ve Business Jet [BJ]) ve 4 farklı kargo uçağı tipi (Tek Koridor [SA-F], Küçük İkiz Koridor [STA-F], Büyük İkiz Koridor [LTA-F] ve Büyük Dörtlü [LQ-F]) için seçilen

işlevsel birimlere (kg-km başına veya yolcu-km başına) ilişkin LCA sonuçlarını gösterir. Sonuçlar Well-To-Pump (WTP) ve Pump-To-Wheels (PTW) değerleri olarak ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Well-To-Pump yakıt olarak kullanılacak hammaddenin yaşam döngüsü sürecini, Pump-To-Wheels ise kullanılacak uçağın yaşam döngüsünü ifade etmektedir. Bu ikisinin bileşimi Well-To-Wheels (WTW) yaşam döngüsü sürecini oluşturmaktadır. Veri kümeleri yalnızca ABD iç ve dış hat uçuşlarını kapsamaktadır.



Şekil 2. 4 Yaşam Döngüsü Çevrimi.

Kaynak: GREET Aviation Module Instruction Manual, 2022:4.

2.3.3.4. Giriş verileri

Giriş verileri Süreçler, LCI, Taşıma, Yanma ve LUC bölümlerinden oluşmaktadır.

2.3.3.4.1. Süreçler

Bu sekme, diğer sekmeler gibi dört paylaşılan sütuna sahiptir: Hammadde, Dönüştürme, Veri kaynağı ve Seçenekler. Bunların kombinasyonu bir yolu tanımlamaktadır. Taşıma ve yanma farklı sekmelerde tanımlandığından, prosesler kurulurken bunlar hariç tutulmaktadır. Her işlem için işlem numarasını (İşlem No.), İşlem Adını, Çıktı ögesini ve İşlevsel birimi sağlanmaktadır. İşlem numarası 1'den başlamakta ve işlem sayısı 1 artmaktadır. İşlem adı, her bir işlemi (örneğin tarım, petrol çıkarma ve jet yakıtı üretimi) belirtir. Sürecin işlevsel birimi, sürecin girdi ve çıktıları LCI sekmesinde oluşturduğumuzda kullanılmaktadır. Fonksiyonel birim kütle, enerji ve hacim birimleri olabilmektedir.

Modül, seçilen tahsis yöntemi için tahsis faktörünü kullanmaktadır. Tanımlanmadığı takdirde modül, ana ürüne %100'lük bir tahsis faktörüne sebep olan ortak ürün olmadığını düşünecektir.

2.3.3.4.2. LCI

İşlemler sekmesinde tanımlanan her işlem için tüm enerji ve malzeme girdileri tanımlanmaktadır. İşlem No. sütunu, LCI sekmesindeki bilgileri diğer sekmelerle (örneğin işlemler sekmesi) bağlamak için kullanılmaktadır. Kentsel pay sütunu, kentsel alanlarda (ABD’de metropol alanları olarak tanımlanan) salınan emisyonların oranını tanımlamak için oluşturulmuştur. Giriş parametreleri, LCI sekmesindeki diğer parametrelere bağlı olabilir (örneğin, N₂O emisyonları azotlu gübre girişlerine bağlıdır). Bu durumda, bağımlı değişkeni hesaplamak için tipik Excel formülleri kullanılabilir. Kontrol panelindeki bağımlı parametreyi doğrudan değiştirmekten kaçınmak için, kullanıcılar 'Gizli' sütunundaki öge için '1' işaretleyebilir; böylelikle seçilen girdi, yaşam döngüsü sonuçlarını hesaplamak için hala kullanılırken gösterge tablosu tablosunda sunulmayabilecektir.

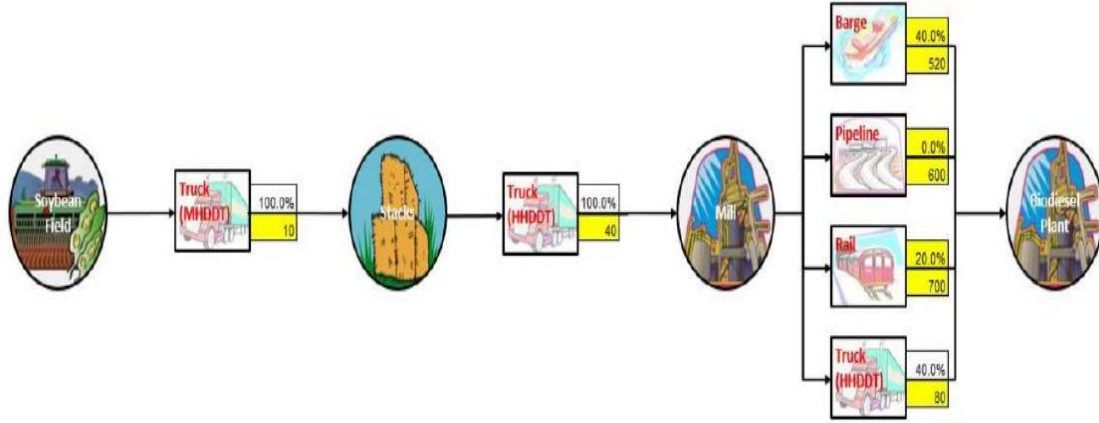
2.3.3.4.3. Taşıma

Taşıma sekmesi, malzemelerin taşınmasıyla ilgili bilgilerin listelendiği bölümdür. Taşıma sekmesinde ayrıca belirtilen kategori için dört paylaşılan sütun (Hammadde, Dönüştürme, Veri Kaynağı ve Seçenek) bulunmaktadır. Payload sekmesinde belirlenen faydalı yüke sahip olanlar için nakliye seçenekleri seçilebilmektedir. Yüklerin tanımlanmasını gerektiren dört mod (okyanus tankeri, mavna, ağır-ağır kamyon ve orta-ağır kamyon) vardır. Ayrıca ilave olarak iki mod (boru hattı ve ray) seçilebilir. Taşınacak malzeme seçildiğinde, açılır menülerde mevcut taşıma modları sunulmaktadır. Kullanılacak yük mevcut değilse, kullanıcılar Yük sekmesinde öge için kendi yük bilgilerini ekleyebilir ve ardından Taşıma sekmesinde seçeneği seçebilirler. Her bir ulaşım modu için pay (%), mesafe (mil) ve şehir içi payı (%) tanımlanmalıdır. Tablo 1 ve Şekil 4 için bir örnek göstermektedir. Soya fasulyesi orta-ağır kamyonlarla 10 mil ve ağır kamyonlarla 40 mil daha taşıyorsa, pay her biri için %100 olmalıdır. Öte yandan, soya yağı üç moda (mavna, ağır kamyon ve demiryolu) ayrılırsa, pay her mod için soyanın kütle payını temsil etmektedir.

Tablo 2. 1 Taşıma Usulleri Örneği.

Taşınan Malzemeler	Mod	Pay (%)	Mesafe (mil)
Soya fasulyesi	Orta-Ağır Kamyon	100%	10
Soya fasulyesi	Ağır-Ağır Kamyon	100%	40
Soya yağı	Mavna	40%	520
Soya yağı	Ağır-Ağır Kamyon	40%	80
Soya yağı	Demiryolu	20%	700

Kaynak: GREET Aviation Module Instruction Manual, 2022:8.



Şekil 2.5 Örnek Taşıma Modeli Gösterimi*

*Soya fasulyesinden türetilen biyodizel üretimi

Kaynak: GREET Aviation Module Instruction Manual, 2022:9.

LCI, kalemleri tedarik etmek için kütle birimlerini kullandığında, ıslak veya kuru baz olarak tanımlanabilmektedir. LCI sekmesindeki girdiler kuru kütle olarak sunuluyorsa, nakliye için malzemelerin nem içeriği dikkate alınmalıdır. Aksi takdirde, sadece malzemelerin kuru kısmını dikkate alarak nakliye etkisi tam olarak hesaplanamayabilecektir. Bu nedenle, LCI'deki tedarik kalemi kuru kütle bazında belirtilmişse, Kuru/Islak sütununda ürünün nem içeriği ile birlikte 'kuru' seçeneği seçilmelidir. Bu durumda modül, nem içeriğini dikkate alarak taşınan madde miktarını ayarlayacaktır. Kuru/Islak sütununda belirtilmemişse, modül herhangi bir ayar gerekmediğini varsayacaktır.

Bu sekmede tanımlanan yolculuk bilgileri ve faydalı yük sekmesinde tanımlanan enerji yoğunluğu ve emisyon faktörleri ile modül, taşınan ton malzeme başına tüm çevresel metrikleri (enerji kullanımı, su tüketimi ve emisyonlar) hesaplamaktadır. Modül, bunu süreç için malzeme girdisiyle birleştirerek nakliye etkisini hesaplamaktadır.

2.3.3.4.4. Yanma

Bu sekme, farklı uçak türleri için farklı yakıt türlerinin (petrol veya sürdürülebilir havacılık yakıtı) yanma özelliklerini tanımlamak için oluşturulmuştur. Yük yakıt enerji yoğunlukları (PFEI'ler) ve emisyon faktörleri, Ulaştırma İstatistikleri Bürosu (BTS) T-2 veri tabanından (<https://www.transtats.bts.gov/> , e.t. 30 Kasım 2021) alınan son veri kümelerinden alınmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, veri setleri yalnızca ABD iç ve dış hat uçuşlarını içerdiğinden, kg-km ve yolcu-km sonuçları ABD seyahatleri için geçerli olmaktadır.

2.3.3.4.5. LUC (Land of Use Change)

Bu sekme, dünya bölgesine göre gCO₂e/MJ jet yakıtı cinsinden mevcut LUC değerlerinin listesini sunmaktadır. Kontrol panelinde LUC seçeneği seçilmiş ise ve seçilen yol için karşılık gelen LUC değeri mevcutsa, LUC etkisi kontrol panelinde sunulur. LUC sekmesinde ayrıca belirtilen yollar için dört paylaşılan sütun (Hammadde, Dönüştürme, Veri Kaynağı ve Seçenek) bulunur.

GREET LUC değerleri esas olarak GREET'in içindeki havacılık sekmesinden alınmaktadır. GREET, soya fasulyesinden biyodizel ve mısır, mısır sobası, şalgam ve miscanthus bitkisinden üretilen etanol için LUC değerlerine sahiptir. Bu nedenle, bu hammaddeleri kullanarak jet yakıtlarına özgü LUC değerlerinin olmadığı durumda, bu LUC değerleri kullanılarak bir jet için MJ cinsinden LUC değerleri hesaplanabilir. ICAO LUC değerleri, CORSIA belgesinden alınmaktadır (ICAO 2019a; 2019b).

2.3.3.5. Destek Bilgisi

Bu bölüm, GREET'ten alınan destekleyici bilgilerin listelendiği yerdir ve modüldeki hesaplama işlemlerini sağlamaktadır. Kullanıcılar dilerlerse, LCI sekmesinde ek öğeleri etkinleştirmek için buraya yeni bilgiler ekleyebileceklerdir.

2.3.3.5.1. LC Profili

LC Profile sekmesi, LCI sekmesinde kullanılan enerji/malzemelerin tümünün GREET'ten gelen tüm yukarı akış etkilerini içermektedir. Örneğin, Tablo 2.2'de 1 mmBtu dizel yakıtlar için yaşam döngüsü enerji kullanımını, su tüketimini ve emisyonları sunulmaktadır. Bununla modül, dizel LCI'de bir prosesin girdisi olarak listelendiğinde dizel kullanımının yukarı yönlü etkisini hesaplayacaktır. Örneğin, 1 mmBtu jet yakıtı üretimi için 0,5 mmBtu dizel kullanılıyorsa, dizel üretimi/taşıma ile ilişkili sera gazı emisyonlarının 8.165 gCO₂e/mmBtu jet (16.330 gCO₂e/mmBtu dizel × 0,5 mmBtu dizel/mmBtu/jet) olduğu tahmin edilmektedir.

Tablo 2. 2 LC Profil Sekmesinin Veri Yapısı.

Ham Malzeme	Girdi Türü	LC Metrik	Metrik Birim	Fonksiyonel Birim	Yaşam Döngüsü Profili
Dizel	Enerji	Toplam Enerji	Btu	mmBtu	182,677
Dizel	Enerji	Fosil Yakıtlar	Btu	mmBtu	176,795
Dizel	Enerji	Kömür	Btu	mmBtu	7,940
Dizel	Enerji	Doğal gaz	Btu	mmBtu	122,277
Dizel	Enerji	Petrol	Btu	mmBtu	46,578
Dizel	Enerji	Su Tüketimi	Gal	mmBtu	22.78
Dizel	Enerji	VOC	g	mmBtu	7.37
Dizel	Enerji	CO	g	mmBtu	11.75
Dizel	Enerji	NOx	g	mmBtu	17.86
Dizel	Enerji	PM10	g	mmBtu	1.30
Dizel	Enerji	PM2.5	g	mmBtu	1.11
Dizel	Enerji	SOx	g	mmBtu	4.75
Dizel	Enerji	BC	g	mmBtu	0.17
Dizel	Enerji	OC	g	mmBtu	0.30
Dizel	Enerji	CH4	g	mmBtu	109.50
Dizel	Enerji	N2O	g	mmBtu	0.22
Dizel	Enerji	CO2	g	mmBtu	12,944
Dizel	Enerji	CO2 (w/ C in VOC & CO)	g	mmBtu	12,986
Dizel	Enerji	Sera Gazları(GHGs)	g	mmBtu	16,330
Dizel	Enerji	VOC: Kentsel	g	mmBtu	2.77
Dizel	Enerji	CO: Kentsel	g	mmBtu	1.86
Dizel	Enerji	NOx: Kentsel	g	mmBtu	2.85
Dizel	Enerji	PM10: Kentsel	g	mmBtu	0.50
Dizel	Enerji	PM2.5: Kentsel	g	mmBtu	0.43
Dizel	Enerji	SOx: Kentsel	g	mmBtu	1.02
Dizel	Enerji	BC: Kentsel	g	mmBtu	0.05
Dizel	Enerji	OC: Kentsel	g	mmBtu	0.08

Kaynak: GREET Aviation Module Instruction Manual, 2022:10.

2.3.3.5.2. EF (Emisyon Faktörleri)

Emisyon faktörleri sekmesi, LCI sekmesinde kullanılan enerji girdilerinin yanma özelliklerini tanımlamaktadır (Tablo 2.3). Farklı teknolojiler farklı emisyonlara yol açacağından, emisyon faktörleri sekmesi her bir teknoloji için emisyon faktörlerini belirtmektedir. Örneğin, 1 mmBtu jet yakıtı üretmek için büyük bir gaz türbininde 0,5 mmBtu dizel yakıt yakılırsa, yerinde CO₂ emisyonlarınının 39.093 gCO₂/mmBtu jet yakıtı (78.187 gCO₂/mmBtu dizel × 0,5 mmBtu dizel/mmBtu) olduğu varsayılacaktır.

Tablo 2.3 EF Sekmesinin Veri Yapısı.

Enerji	Teknoloji	Metrik	Değer(mmBtu)
Dizel	Büyük Gaz Türbini	Toplam Enerji	1,000,000
Dizel	Büyük Gaz Türbini	Fosil Yakıtlar	1,000,000
Dizel	Büyük Gaz Türbini	Kömür	0
Dizel	Büyük Gaz Türbini	Doğal gaz	0
Dizel	Büyük Gaz Türbini	Petrol	1,000,000
Dizel	Büyük Gaz Türbini	VOC	0.26
Dizel	Büyük Gaz Türbini	CO	1.56
Dizel	Büyük Gaz Türbini	NOx	256.41
Dizel	Büyük Gaz Türbini	PM10	25.94
Dizel	Büyük Gaz Türbini	PM2.5	6.57
Dizel	Büyük Gaz Türbini	SOx	0.54
Dizel	Büyük Gaz Türbini	BC	0.66
Dizel	Büyük Gaz Türbini	OC	1.64
Dizel	Büyük Gaz Türbini	CH4	3.02
Dizel	Büyük Gaz Türbini	N2O	0.60
Dizel	Büyük Gaz Türbini	CO2	78,187

Kaynak: GREET Aviation Module Instruction Manual, 2022:11.

2.3.3.5.3. Yük

Yük sekmesi, taşıma emisyonlarının hesaplanmasını desteklemektedir (Tablo 2.4). Tablo malzemeyi, taşıma modunu ve taşıma kapasitesini (kısa ton) içerir. GREET'ten gelen faydalı yük değerleri ve diğer bilgiler ile enerji yoğunluğu değerleri hesaplanmaktadır.

Tablo 2. 4 EF Sekmesinin Veri Yapısı.

Malzeme	Mod	Yük (Kısa ton)
Ham Petrol	Okyanus Tankeri	133,526
Ham Petrol	Mavna	22,5
Soya fasulyesi	Mavna	20
Soya yağı	Mavna	22,5
Ham Petrol	Ağır-Ağır Kamyon	25
Soya fasulyesi	Ağır-Ağır Kamyon	15
Soya yağı	Ağır-Ağır Kamyon	25
Soya fasulyesi	Orta-Ağır Kamyon	8

Kaynak: GREET Aviation Module Instruction Manual, 2022:11.

2.3.3.5.4. Sonuçlar

Sonuçlar sekmesi, tüm sonuçları süreç düzeyinde derlemek için kullanılmaktadır. LCI'de tanımlanan girdi enerjisi/malzemelerinden kaynaklanan tüm etkiler, burada bulunmaktadır. Modül, birimleri dönüştürerek süreçler arasındaki bağlantıları hesaplamaktadır ve bu süreçte tahsis faktörlerini dikkate almaktadır. Taşıma bölümü de, esas olarak ulaşım sekmesinden ve taşıma yükünden veri toplamaktadır. Yanma aşaması, yanma sonuçlarını hesaplamaktadır. Sürdürülebilir havacılık yakıtları için modül, yaklaşık olarak sıfır yanma emisyonuna yol açan biyojenik karbon kredilerini dikkate almaktadır.

2.3.3.5.5. Dışa Aktarma

Birden fazla yolun LCA sonuçlarını dışa aktarmak için Dışa Aktar sekmesi kullanılabilir. "Sonuçları Dışa Aktar" düğmesine tıkladığında, seçilen yol için birleştirilmiş LCA sonuçları tabloya eklenmektedir. Kullanıcılar farklı bir yol seçebilir veya panodaki bazı parametreleri değiştirebilir ve ardından "Sonuçları Dışa Aktar" düğmesini tıklatarak sonuçları tabloya ekleyebilir. "Sıfırla" düğmesi tablodaki tüm oğeleri kaldıracaktır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

HAVACILIK YAKITLARININ KARBON EMİSYONU VE MALİYET AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

3.1. Araştırmanın Amacı

Bu çalışma havacılık için farklı alternatif yakıt türlerini yaşam döngüsü ve maliyet açısından analiz etmeyi ve değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Sürdürülebilir dönüşüme doğru uygun bir geçiş çözümü olma potansiyelleri ile ilgili olarak havacılık sektörünün bu amaçla farklı alternatif yakıtlar ve bunların uçaklarda kullanımı analiz edilmesi hedeflenmektedir.

Karbondiyoksit (CO₂), iklim üzerindeki etkileri son zamanlarda hissedilen ve mevcut enerji politikaları değiştirilmediği takdirde dramatik boyutlara ulaşabilecek olan sera gazı etkisine neden olacaktır. Bu nedenle fosil yakıttan sürdürülebilir havacılık yakıtlarına geçiş, iklim değişikliği ile mücadele açısından, uçak üreticilerinin, enerji şirketlerinin, araştırmacıların ve hükümetlerin odak noktası haline gelmiştir. Çalışmada fosil yakıt ve sürdürülebilir yakıtların karbondiyoksit salınımı ve maliyet karşılaştırmaları yapılarak politika yapıcılara, havayolu şirketlerine ve araştırmacılara katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

3.2. Araştırma Kapsamı ve Kısıtları

Araştırmada kullanılan farklı üretim teknikleri üretilen sürdürülebilir havacılık yakıt verileri, ABD Federal Havacılık Dairesi tarafından sağlanabildiğinden sürdürülebilir havacılık yakıtlarına ait hesaplamalar bu verilere dayanılarak yapılmıştır.

Zaman vb kısıtlar nedeniyle petrol ve altı adet bio-yakıtta ait yaşam döngüsü ve fiyat incelemesi yapılmış; uzun, orta ve kısa mesafeli uçuşlarda kerosen ve sürdürülebilir havacılık yakıtlarının maliyet ve karbondioksit emisyonu açısından çevreye etkisi incelenmiştir. Çalışmanın bütün havacılık yakıt ürünlerine genellenebilmesi için daha geniş bir evren üzerinde çalışılması gerekmektedir.

3.3. Araştırmanın Yöntemi

Araştırmada veri toplamak için iki farklı teknik kullanılmıştır. Literatür taraması yapmak amacıyla ikincil kaynakların kullanılması yöntemi tercih edilmiş, birinci bölümde mevcut yayın, akademik çalışma ve makaleler incelenmiştir.

Araştırmanın ikinci bölümünde ABD Ulusal Araştırma Laboratuvarı (Argonne) tarafından geliştirilen Excel program tabanlı GREET havacılık (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies) yaşam döngüsü analiz (LCA) modülü incelenmiştir. Yaşam döngüsü analizi (LCA), genellikle çeşitli sistemlerin çevresel ölçümlerinin bütünsel bir karşılaştırmasına olanak sağlamakta ve çeşitli teknolojilerin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi için kullanılmaktadır.

Üçüncü bölümde ise GREET havacılık modülü ile petrol ve altı farklı sürdürülebilir havacılık yakıt üretim yöntemleri yaşam döngüleri hesaplanmıştır. İkincil kaynaklar kullanılarak fiyat analiz değerlendirmesi yapılmıştır.

3.4. Örneklem Seçimi

Araştırmanın örneklemine havacılıkta bio-yakıt üretmek için en çok tercih edilen mısır, soya ve canola ürünlerinin hidro-işlenmiş esterler ve yağ asitleri (HEFA), alkolden jete (ATJ), ethanolden jete (ETJ) yöntemleri ile elde edilmesi sonucunda oluşan karbondioksitin yaşam döngüsü değerleri hesaplanmıştır. Petrol ve altı adet bio-yakıt yaşam döngüsünün incelenmesi çalışmanın kısıtını oluşturmaktadır.

3.5. Verilerin Toplanması ve Analizi

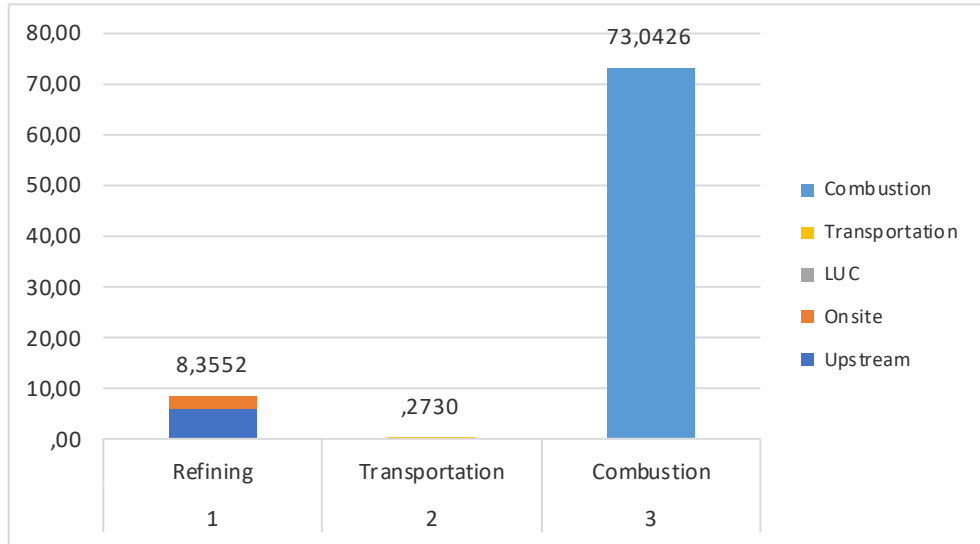
Araştırmada, sürdürülebilir havacılık yakıtlarına ait veriler ABD Federal Havacılık Dairesinin sağladığı veriler kullanılarak yapılmıştır. Yakıtların fiyat verileri için ikincil veri toplama yöntemi kullanılmıştır. Fosil ve sürdürülebilir havacılık yakıtlarının, değişkenler olan karbondioksit salınım miktarı, toplam enerji ve maliyetlerinin güncel olarak hesaplanması yazar tarafından yapılmıştır.

3.6. Araştırmanın Analizi

Bu bölümde ham petrol, mısır, soya fasülyesi ve canolaya ait hesaplanan analiz verileri sunulmuştur.

3.6.1. Ham Petrolün Yaşam Döngüsü Analizi

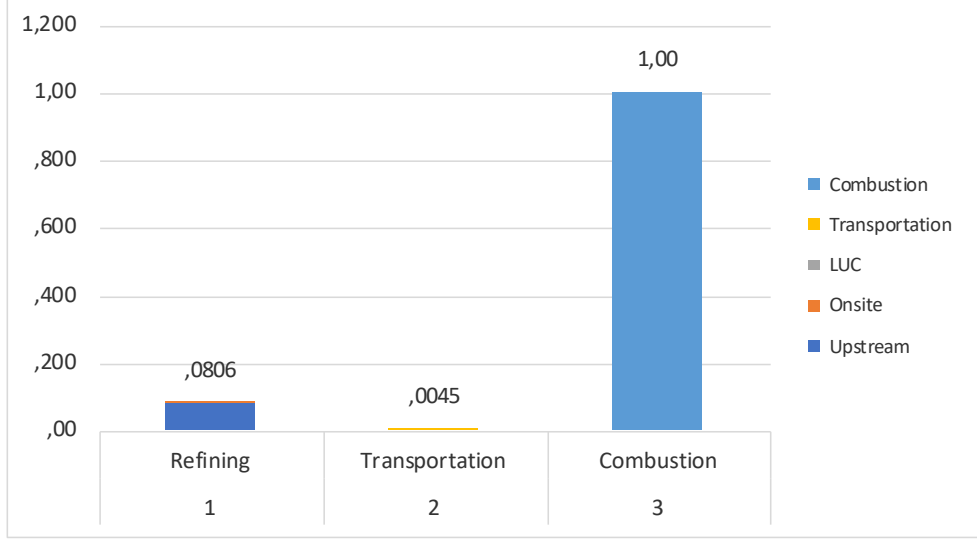
GREET havacılık modülü kullanılarak ham petrolün rafine edilmesi yolu ile elde edilmiş olan havacılık yakıtının karbondioksit (CO₂) salınımı yaşam döngüsü **81,67085 g/MJ** olarak hesaplanmış olup analiz bilgileri Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3. 1 Ham Petrole Ait CO₂ Yaşam Döngüsü.

Kaynak: Yazar.

Toplam enerji yaşam döngüsü **1,08513 MJ** olarak hesaplanmış olup analiz bilgileri Şekil 3.2’de sunulmuştur.



Şekil 3. 2 Toplam Enerji Yaşam Döngüsü.

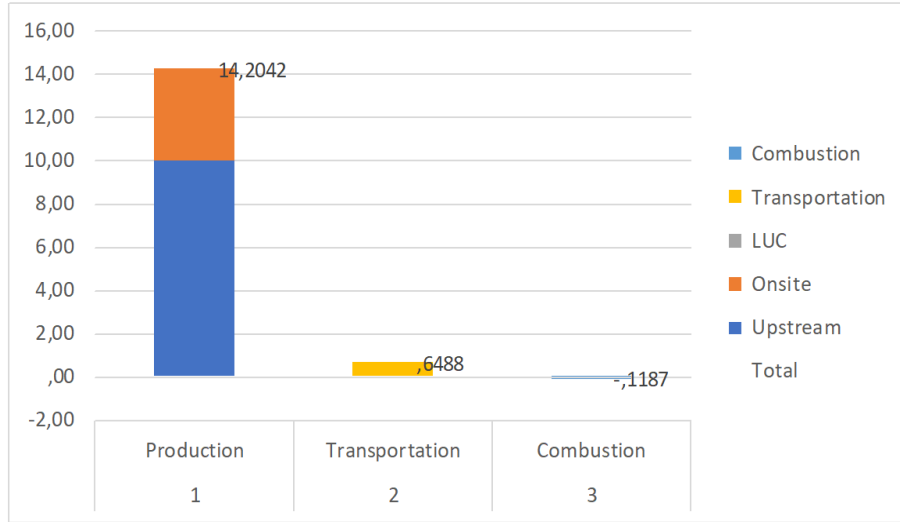
Kaynak: Yazar.

Jet yakıtı fiyatları Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bilgilendirme Yönetimi 2022 yılı aylık verilerinin ortalaması alınarak ABD Galonu başına jet yakıtı fiyatı 3,45 Amerikan doları , 1 galon 3,7854 kg'a eşit olduğundan dolayı jet yakıtının kilogram fiyatı **1,09** amerikan doları olarak hesaplanmıştır.

(https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=pet&s=eer_epjk_pf4_rgc_dpg&f=m , et 26.02.2023).

3.6.2. HEFA Yöntemi İle Dönüştürülen Mısır Ürününün Yaşam Döngüsü Analizi

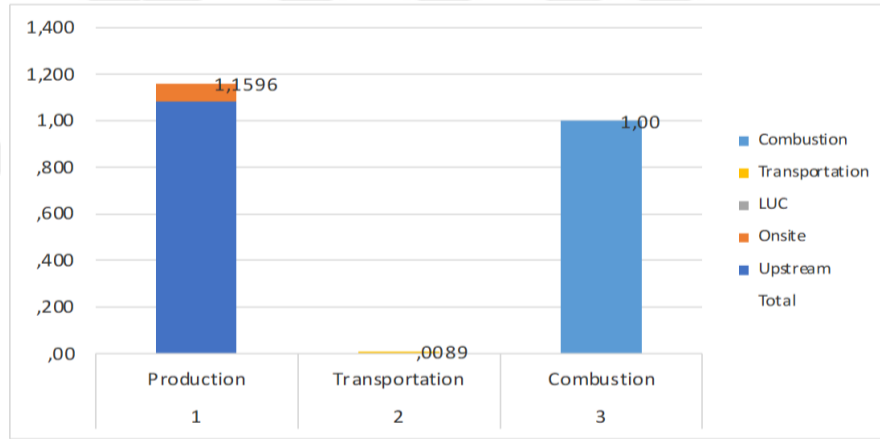
Hidro-işlenmiş esterler ve yağ asitleri (HEFA) yöntemi kullanılarak elde edilen mısırın havacılık yakıtının karbondioksit (CO₂) salınımı yaşam döngüsü **14,73431 g/MJ** olarak hesaplanmış olup analiz bilgileri Şekil 3.3'de sunulmuştur.



Şekil 3. 3 Mısır Ürünü CO₂ Yaşam Döngüsü.

Kaynak: Yazar.

Toplam enerji yaşam döngüsü **2,16851 MJ** olarak hesaplanmış olup analiz bilgileri Şekil 3.4’de sunulmuştur.



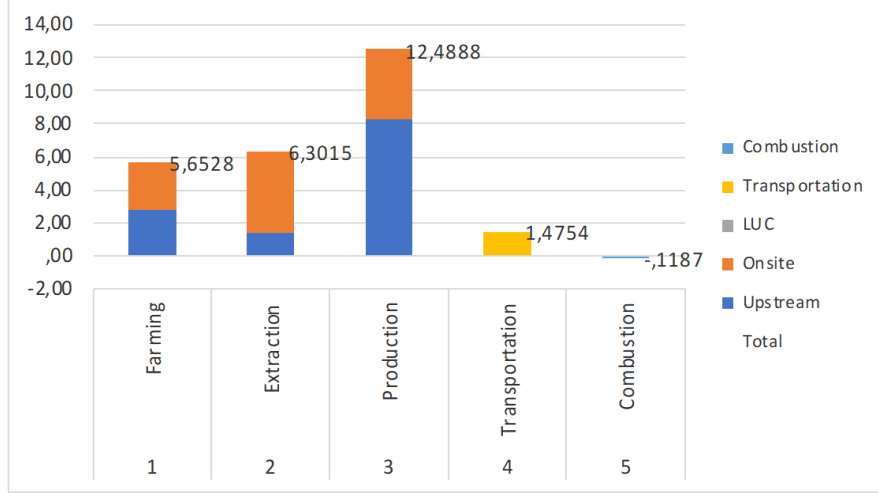
Şekil 3. 4 Mısır Ürünü Toplam Enerji Yaşam Döngüsü.

Kaynak: Yazar.

Mısır fiyatları Amerikan Dow Jones indeksi emtia piyasasında yer alan Gerçek Zamanlı Emtia Fiyatları kullanılarak, 01.01.2022 tarihinden 01.01.2023 tarihine kadar 1 yıllık dönemde, aylık veriler üzerinden Investing.com veri tabanından elde edilen verilerin ortalaması alınarak 1 Bushel (25.4 kg) mısır fiyatı 694,46 ABD doları ,1 kg mısır **27,3** ABD doları olarak alınmıştır. (<https://www.investing.com/commodities/us-corn-historical-data>, e.t. 26.02.2023)

3.6.3. HEFA Yöntemi İle Dönüştürülen Soya Fasüyesi Ürününün Yaşam Döngüsü Analizi

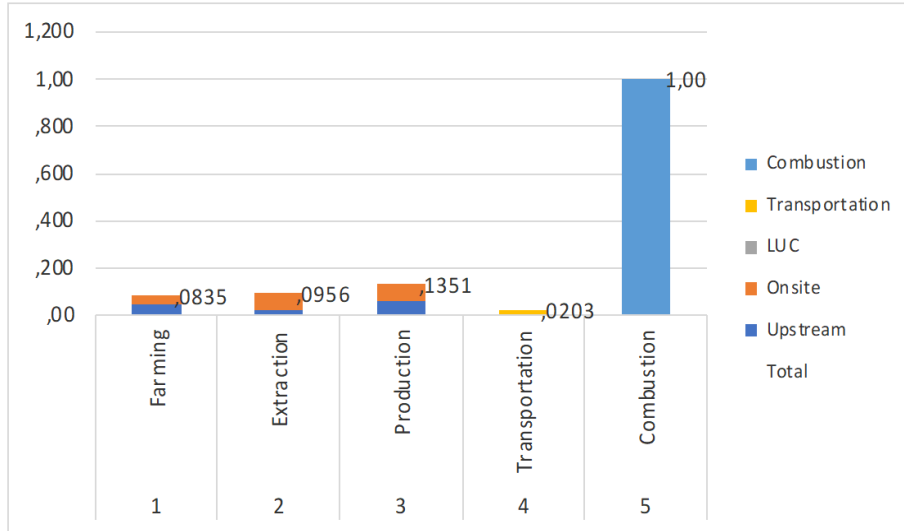
Hidro-işlenmiş esterler ve yağ asitleri (HEFA) yöntemi kullanılarak elde edilen soya fasüyesinin havacılık yakıtının karbondioksit (CO₂) salınımı yaşam döngüsü **25,79986 g/MJ** olarak hesaplanmış olup analiz bilgileri Şekil 3.5’de sunulmuştur.



Şekil 3. 5 Soya fasüyesi Ürünü CO₂ Yaşam Döngüsü.

Kaynak: Yazar.

Toplam enerji yaşam döngüsü **1,33447 MJ** olarak hesaplanmış olup analiz bilgileri Şekil 3.6’da sunulmuştur.



Şekil 3. 6 Soya Fasüyesi Toplam Enerji Yaşam Döngüsü.

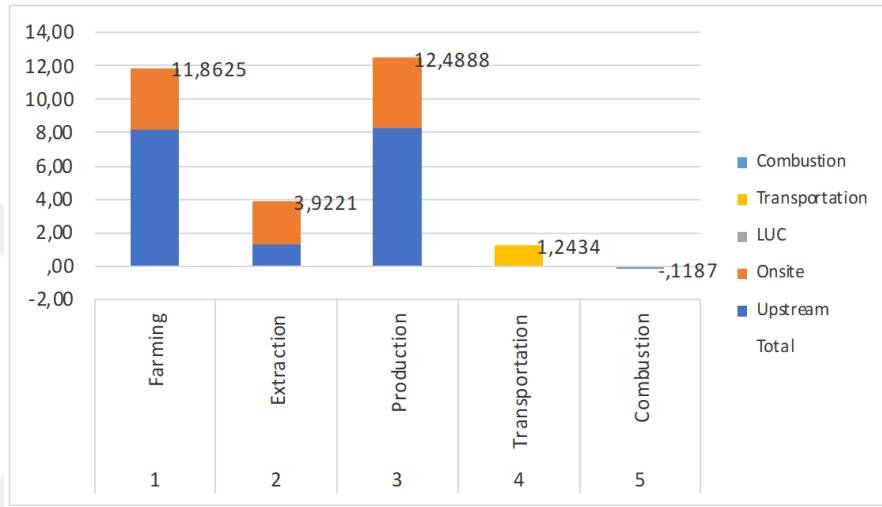
Kaynak: Yazar.

Soya fasüyesi fiyatları Amerikan Dow Jones indeksi emtia piyasasında yer alan Gerçek Zamanlı Emtia Fiyatları kullanılarak, 01.01.2022 tarihinden 01.01.2023 tarihine kadar 1 yıllık dönemde, aylık veriler üzerinden Investing.com veri tabanından elde edilen

verilerin ortalaması alınarak 1 Bushel (27,21 kg) soya fasüyesi fiyatı 1521,48 ABD doları, 1 kg soya fasüyesi **55,91** ABD doları olarak alınmıştır. (<https://www.investing.com/commodities/us-soybeans>, e.t. 26.02.2023)

3.6.4. HEFA Yöntemi İle Dönüştürülen Canola Ürününün Yaşam Döngüsü Analizi

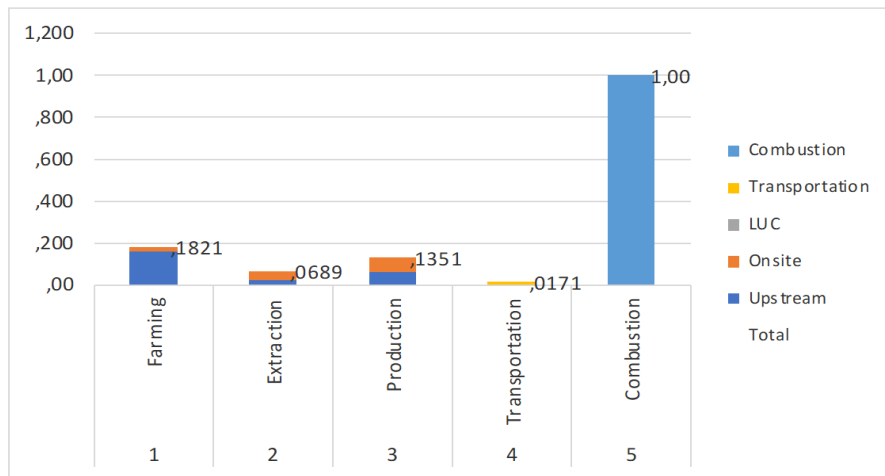
Hidro-işlenmiş esterler ve yağ asitleri (HEFA) yöntemi kullanılarak elde edilen canola ürününün havacılık yakıtının karbondioksit (CO₂) salınımı yaşam döngüsü **29,39803 g/MJ** olarak hesaplanmış olup analiz bilgileri Şekil 3.7’de sunulmuştur.



Şekil 3. 7 Canola Ürünü CO₂ Yaşam Döngüsü.

Kaynak: Yazar.

Toplam enerji yaşam döngüsü **1,40311 MJ** olarak hesaplanmış olup analiz bilgileri Şekil 3.8’de sunulmuştur.



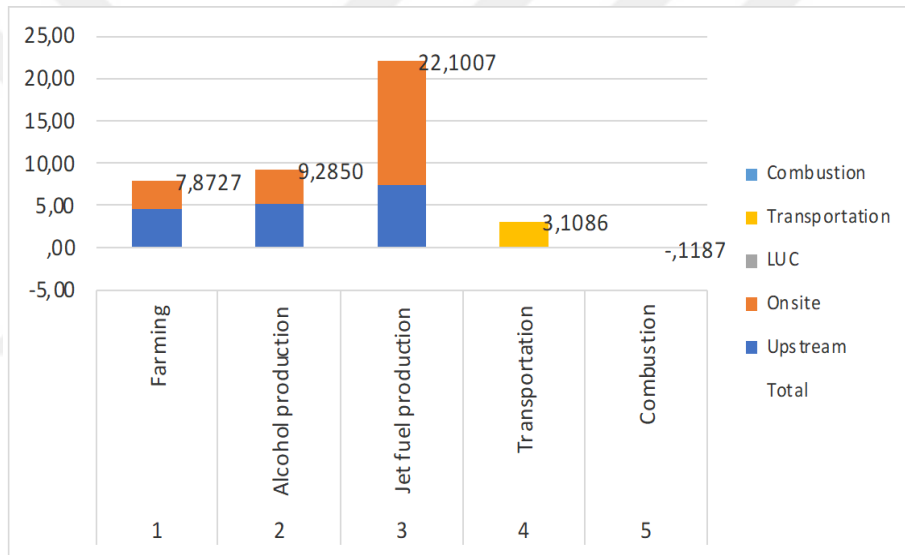
Şekil 3. 8 Canola Ürünü Toplam Enerji Yaşam Döngüsü.

Kaynak: Yazar.

Canola fiyatları Amerikan Dow Jones indeksi emtia piyasasında yer alan Gerçek Zamanlı Emtia Fiyatları kullanılarak, 01.01.2022 tarihinden 01.01.2023 tarihine kadar 1 yıllık dönemde, aylık veriler üzerinden tradingeconomics.com veri tabanından elde edilen verilerin ortalaması alınarak 1 Bushel (22 kg) canola fiyatı 858,40 ABD doları ,1 kg canola **71,53** ABD doları olarak alınmıştır. (<https://tradingeconomics.com/commodity/canola>, e.t. 26.02.2023)

3.6.5. ATJ Yöntemi İle Dönüştürülen Mısır Ürününün Yaşam Döngüsü Analizi

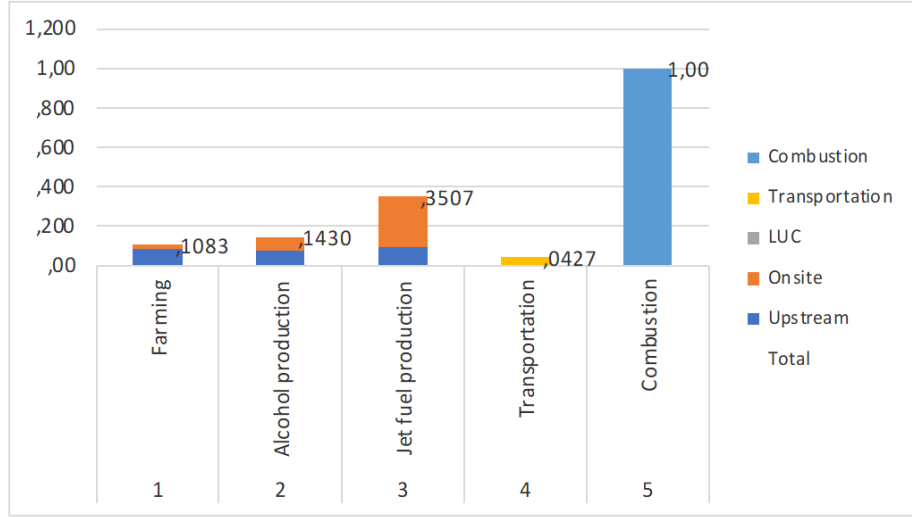
Alkolden jete (ATJ) yöntemi kullanılarak elde edilen mısırın havacılık yakıtının karbondioksit (CO₂) salınımı yaşam döngüsü **42,24828 g/MJ** olarak hesaplanmış olup analiz bilgileri Şekil 3.9’da sunulmuştur.



Şekil 3. 9 ATJ Mısır Ürünü CO₂ Yaşam Döngüsü.

Kaynak: Yazar.

Toplam enerji yaşam döngüsü **1,64473 MJ** olarak hesaplanmış olup analiz bilgileri Şekil 3.10’da sunulmuştur.



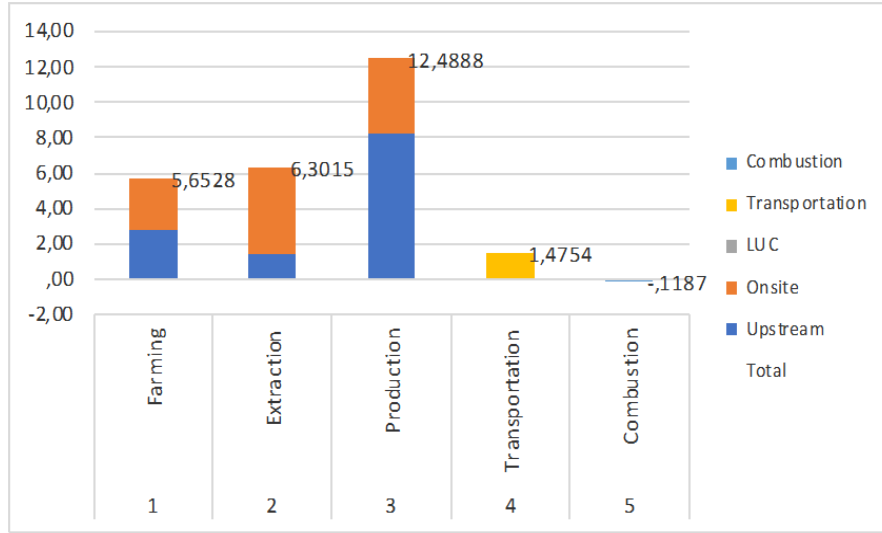
Şekil 3. 10 ATJ Mısır Ürünü Toplam Enerji Yaşam Döngüsü.

Kaynak: Yazar.

Mısır fiyatları Amerikan Dow Jones indeksi emtia piyasasında yer alan Gerçek Zamanlı Emtia Fiyatları kullanılarak, 01.01.2022 tarihinden 01.01.2023 tarihine kadar 1 yıllık dönemde, aylık veriler üzerinden Investing.com veri tabanından elde edilen verilerin ortalaması alınarak 1 Bushel (25.4 kg) mısır fiyatı 694,46 ABD doları ,1 kg mısır **27,3** ABD doları olarak alınmıştır. (<https://www.investing.com/commodities/us-corn-historical-data>, e.t. 26.02.2023)

3.6.6. ATJ Yöntemi İle Dönüştürülen Soya Fasulyesi Ürününün Yaşam Döngüsü Analizi

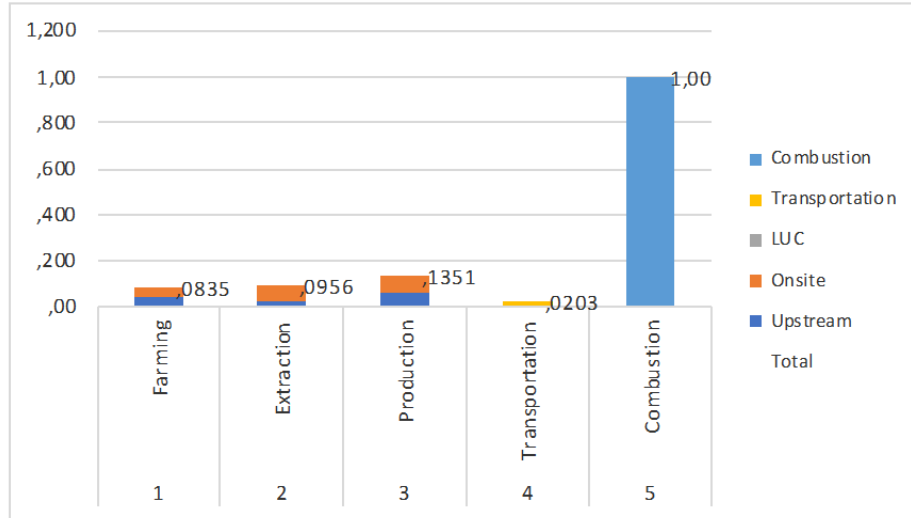
Alkolden jete (ATJ) yöntemi kullanılarak elde edilen soya fasulyesinin havacılık yakıtının karbondioksit (CO₂) salınımı yaşam döngüsü **25,79986 g/MJ** olarak hesaplanmış olup analiz bilgileri Şekil 3.11’de sunulmuştur.



Şekil 3. 11 Soya fasülyesi Ürünü CO₂ Yaşam Döngüsü.

Kaynak: Yazar.

Toplam enerji yaşam döngüsü **1,33447 MJ** olarak hesaplanmış olup analiz bilgileri Şekil 3.12’de sunulmuştur.



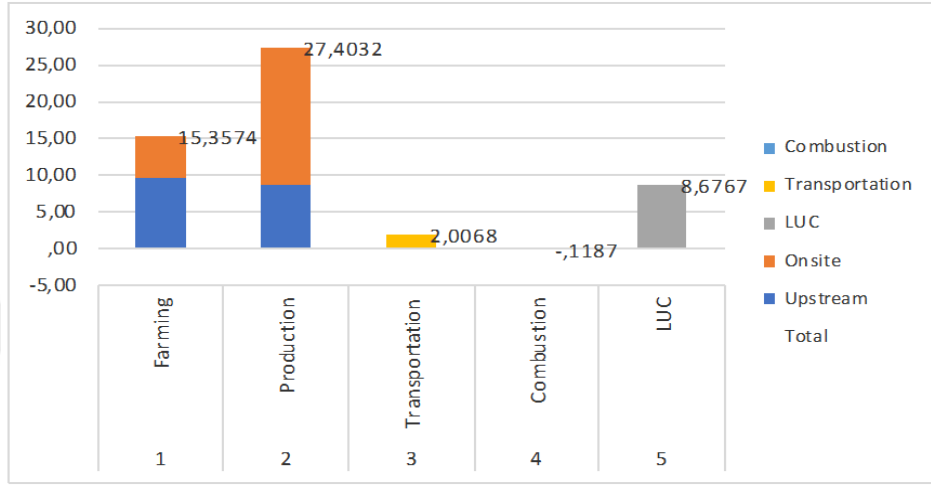
Şekil 3. 12 Soya Fasülyesi Ürünü Toplam Enerji Yaşam Döngüsü.

Kaynak: Yazar.

Soya fasülyesi fiyatları Amerikan Dow Jones indeksi emtia piyasasında yer alan Gerçek Zamanlı Emtia Fiyatları kullanılarak, 01.01.2022 tarihinden 01.01.2023 tarihine kadar 1 yıllık dönemde, aylık veriler üzerinden Investing.com veri tabanından elde edilen verilerin ortalaması alınarak 1 Bushel (27,21 kg) soya fasülyesi fiyatı 1521,48 ABD doları, 1 kg soya fasülyesi **55,91** ABD doları olarak alınmıştır. (<https://www.investing.com/commodities/us-soybeans>, e.t. 26.02.2023)

3.6.7. ETJ Yöntemi İle Dönüştürülen Mısır Ürününün Yaşam Döngüsü Analizi

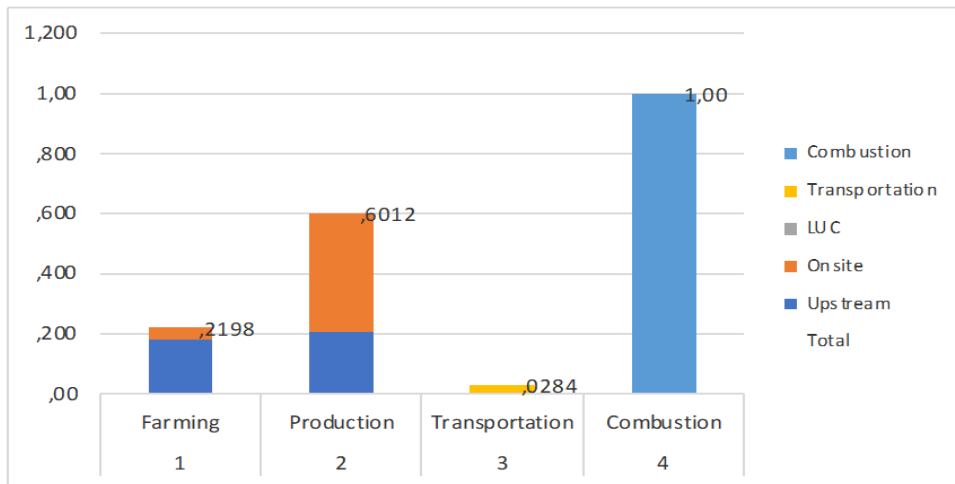
Ethanolden jete (ETJ) yöntemi kullanılarak elde edilen mısırın havacılık yakıtının karbondioksit (CO₂) salınımı yaşam döngüsü **53,32535 g/MJ** olarak hesaplanmış olup analiz bilgileri Şekil 3.13’de sunulmuştur.



Şekil 3. 13 ETJ Mısır Ürünü CO₂ Yaşam Döngüsü.

Kaynak: Yazar.

Toplam enerji yaşam döngüsü **1,84929 MJ** olarak hesaplanmış olup analiz bilgileri Şekil 3.14’de sunulmuştur.



Şekil 3. 14 ETJ Mısır Ürünü Toplam Enerji Yaşam Döngüsü.

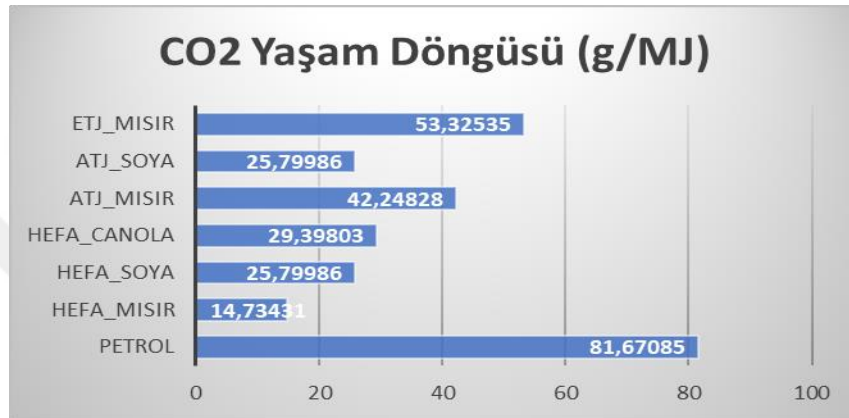
Kaynak: Yazar.

BULGULAR

Tablo 3. 1 Yaşam/Enerji Döngüsü ve Maliyet Tablosu.

Ürün Adı	CO ₂ Yaşam Döngüsü (g/MJ)	Toplam Enerji Yaşam Döngüsü (MJ)	Güncel Fiyat (kg/US Dolar)
Jet_A1	81,67085	1,08513	1,09
HEFA_Mısır	14,73431	2,16851	27,3
HEFA_Soya	25,79986	1,33447	55,91
HEFA_Canola	29,39803	1,40311	71,53
ATJ_Mısır	42,24828	1,64473	27,3
ATJ_Soya	25,79986	1,33447	55,91
ETJ_Mısır	53,32535	1,84929	27,3

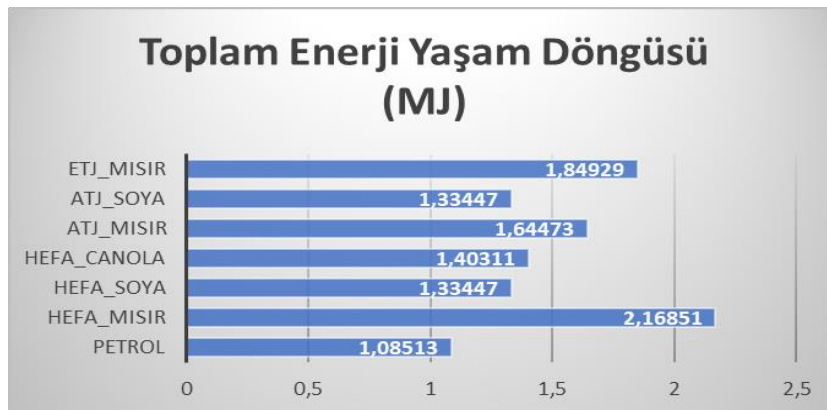
Kaynak: Yazar.



Şekil 3. 15 Karbondioksit Yaşam Döngüsü Grafiği.

Kaynak: Yazar.

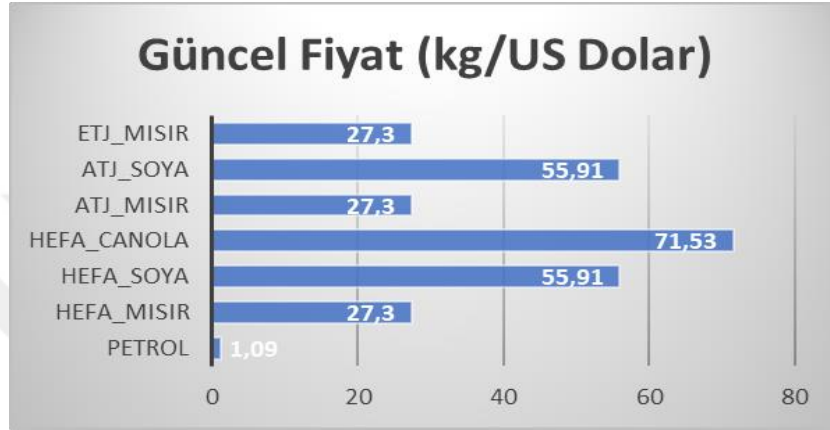
Şekil 3.16 incelendiğinde petrolün megajoule başına 81,67085 gram karbondioksit salınım miktarı ile kendisine en yakın karbondioksit salınım miktarı 53,32535 g/MJ değerine sahip olan etanolden jete (ETJ) yöntemi kullanılarak elde edilen mısırdan fazlasıyla yüksek değere sahip olduğu gözlenmiştir. Hidro işlenmiş esterler ve yağ asitleri (HEFA) yöntemi kullanılarak elde edilen mısırdan 14,73431 g/MJ değeri ile karbondioksit salınımı açısından en faydalı çevresel etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3. 16 Toplam Enerji Yaşam Döngüsü Grafiği.

Kaynak: Yazar.

Şekil 3.17 incelendiğinde Hidro işlenmiş esterler ve yağ asitleri (HEFA) yöntemi kullanılarak elde edilen mısırın 2,16851 megajoule ile en yüksek değere sahip olduğu, alkolden jete (ATJ) yöntemi kullanılarak elde edilen soya fasüyesinin 1,33447 MJ olarak hesaplanan toplam enerji yaşam döngüsü değerlerinin Hidro işlenmiş esterler ve yağ asitleri (HEFA) yöntemi kullanılarak elde edilen soya fasüyesi değeri ile aynı sonuçlara sahip olduğu, petrolün 1,08513 değeri ile toplam enerji yaşam döngüsünün en küçük değer sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3. 17 Maliyet Grafiği.

Kaynak: Yazar.

Şekil 3.18 incelendiğinde 1,09 Amerikan doları olan petrolün maliyetinin kendisine en yakın maliyet olan diğer yöntemleri kullanılarak elde edilen mısır maliyeti olan 27,3 dolar değerinden **25** kat daha düşük değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek maliyetin 71,53 Amerikan doları ile petrolden **65,6** kat daha maliyetli olan Hidro işlenmiş esterler ve yağ asitleri (HEFA) yöntemi ile elde edilen canolaya ait olduğu gözlemlenmiştir.

Avrupa Komisyonu'nun iklim paketinin bir parçası olarak yayınlanan, ReFuelEU teklifi, yakıt tedarikçilerine sürdürülebilir havacılık yakıtını (SAF) Avrupa Birliği havaalanlarında sağlanan havacılık yakıtına dahil etme zorunluluğu getirmektedir. (https://www3.weforum.org/docs/WEF_CST_EU_Policy_2021.pdf) et 01.03.2023)

Yükümlülüğün 2025'ten itibaren %2-5 sürdürülebilir havacılık yakıtı ile başlayarak ve 2050 yılına kadar kademeli olarak %63'e çıkması öngörülmektedir. Çalışmamızda jet yakıtı ve jet yakıtına %5 oranında sürdürülebilir havacılık yakıtı ilave edilmiş, en düşük fiyatlı ürünlerden olan ve ülkemiz bayrak taşıyıcı havayolu şirketi olan Türk Hava Yolları tarafından da 2021 yılı sürdürülebilirlik raporunda da kullanım metodu olarak belirtilen

Hidro işlenmiş esterler ve yağ asitleri (HEFA) yöntemi kullanılarak elde edilen mısırın fiyatı baz alınmıştır.

(<https://investor.turkishairlines.com/documents/sustainability/turkish-airlines-sustainability-report-2021.pdf>, e.t. 29.12.2022)

Çalışmada 800 km 'ye kadar olan uçuşlar kısa mesafe, 800 ile 3000 km arasındaki uçuşlar orta mesafe, 3000 km üzeri mesafe uçuşlar uzun mesafe uçuşlar olarak kabul edilmiştir. (<https://www.lufthansagroup.com/en/responsibility> , e.t. 01.03.2023)

Tablo 3. 2 İstanbul- Ankara Uçuşu.

İstanbul- Ankara			
	Jet A1 yakıtı	%5 Bio yakıt katkısı	Fark
Fiyat (Amerikan Doları)	1471	3253	1782
CO2 Emisyonu (Kg)	83,9	79,7	4,19

Kaynak: Yazar.

Tablo 3.2.'de İstanbul Havalimanından (LTFM), Ankara Esenboğa Havalimanına (LTAC) olan yaklaşık 500 kilometrelik mesafe için hesaplanan veriler sunulmaktadır. Uçuş süresi 50 dk, harcanan yakıt 1350 litre olarak hesaplanmıştır. Lufthansa Havayolları 2021 verilerine göre böyle bir kısa mesafeli uçuşta yaklaşık yakıt tüketim değeri 100 yolcu kilometrede 6,67 litre, karbondioksit salınımı ise 16,78 kg olarak belirtilmiştir. Jet yakıtı ile %5 oranında bio yakıt ilave edilen yakıt arasında 1782 dolar fiyat artışı olurken, karbondioksit emisyonunda 4,19 kg'lık düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 3. 3 Münih- Ankara Uçuşu.

Münih - Ankara			
	Jet A1 yakıtı	%5 Bio yakıt katkısı	Fark
Fiyat (Amerikan Doları)	3815	8400	4585
CO2 Emisyonu (Kg)	191,4	181,3	10,1

Kaynak: Yazar.

Tablo 3.3.'de Almanya Münih Havalimanından (EDDM), Ankara Esenboğa Havalimanına (LTAC) olan yaklaşık 2000 kilometrelik mesafe için hesaplanan veriler sunulmaktadır. Uçuş süresi 180 dk, harcanan yakıt 3500 litre olarak hesaplanmıştır. Lufthansa Havayolları 2021 verilerine göre böyle bir orta mesafeli uçuşta yaklaşık yakıt tüketim değeri 100 yolcu kilometrede 3,80 litre, karbondioksit salınımı ise 9,57 kg olarak belirtilmiştir. Jet yakıtı ile %5 oranında bio yakıt ilave edilen yakıt arasında 4585 dolar fiyat artışı olurken, karbondioksit emisyonunda 10,1 kg'lık düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

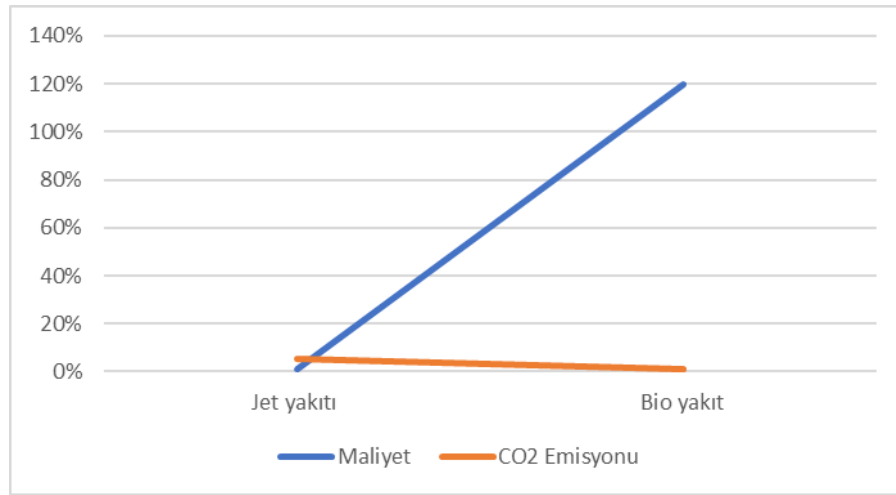
Tablo 3. 4 New York- Ankara Uçuşu.

New York- Ankara			
	Jet A1 yakıtı	%5 Bio yakıt katkısı	Fark
Fiyat (Amerikan Doları)	16132	35527	19395
CO2 Emisyonu (Kg)	1392,6	1323	69,5

Kaynak: Yazar.

Tablo 3.4’de Amerika Birleşik Devletleri New York Havalimanından (KJFK), Ankara Esenboğa Havalimanına (LTAC) olan yaklaşık 9100 kilometrelik mesafe için hesaplanan veriler sunulmaktadır. Uçuş süresi 600 dk, harcanan yakıt 14800 litre olarak hesaplanmıştır. Lufthansa Havayolları 2021 verilerine göre böyle bir uzun mesafeli uçuşta yaklaşık yakıt tüketim değeri 100 yolcu kilometrede 3,75 litre, karbondioksit salınımı ise 9,41 kg olarak belirtilmiştir. Jet yakıtı ile %5 oranında bio yakıt ilave edilen yakıt arasında 19395 dolar fiyat artışı olurken, karbondioksit emisyonunda 69,5 kg’lık düşüş olduğu gözlemlenmiştir. (<https://www.lufthansagroup.com/en/responsibility>) et 01.03.2023

Üç farklı mesafe için çıkan değerler incelendiğinde, mesafe arttıkça uçakların harcayacağı yakıtın daha fazla olduğu; fiyat artışı yükselirken, karbondioksit salınım miktarının azaldığı gözlemlenmektedir. Fiyatlar yüzdesel olarak aynı oranda artış göstermiş, karbon salınım miktarı yüzdesel olarak yine aynı oranda azalma göstermiştir.



Şekil 3. 18 Yüzdesel Fark Grafiği.

Kaynak: Yazar.

Şekil 3.18’de gösterildiği gibi sürdürülebilir %5 bio yakıt ilave edilen havacılık yakıtının kullanımı ile karbondioksit emisyonunda %5,2 azalma sağlandığı, ancak maliyetin %120 artış yaptığı görülmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sürdürülebilir havacılık yakıtı şu anda kullanılan geleneksel fosil jet yakıtından daha pahalıdır. Sürdürülebilir hammaddelerin ulaşılabilirliği ve yeni üretim teknolojilerinin sürekli gelişimi fosil yakıtından sürdürülebilir havacılık yakıtlarına geçişi kolaylaştıracaktır. Teknoloji olgunlaştıkça daha sürdürülebilir havacılık yakıtları verimli ve daha az maliyetli olacaktır.

Havacılıkta, karbondioksit emisyonları Avrupa Emisyon Ticaret Programı (EU-ETS) aracılığıyla fiyatlandırılmaktadır. Fiyat farkını azaltmak için kullanıcıları sürdürülebilir havacılık yakıtlarından gelen yakıt tüketimi kısmından herhangi bir vergi, harç veya emisyon ödeneğinden muaf tutarken, geleneksel yakıtların kullanımından kaynaklanan karbondioksit emisyon maliyetlerini artırmak bir seçenek olabilir.

Diğer bir etkili politika önlemi, havacılık yakıtları için zorunlu bir harmanlama kotasının getirilmesi olacaktır. Bu önlem, halihazırda karayolu taşımacılığı yakıtları için uygulanan harmanlama kotasına benzer şekilde çalışacaktır. Hava taşımacılığı için, harmanlama kotası muhtemelen karayolu taşımacılığı için yaşananlardan daha az soruna neden olacaktır. Karayolu taşımacılığında, araçların küçük bir yüzdesinin daha yüksek etanol içeriğine (E10) sahip yakıtlarla çalıştırılmaları onaylanmamıştır, bu nedenle benzin istasyonlarının iki farklı kalitede benzin (E5 ve E10) sunması öngörülmüştür. Havacılıkta, sürdürülebilir havacılık yakıtı %50'ye kadar karıştırılabilmektedir. Sürdürülebilir havacılık yakıtı içeriğinin ICAO tarafından yayınlanan jet yakıtı spesifikasyonlarına tam olarak uygun olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle, tüm ticari uçakların bu sürdürülebilir havacılık yakıtı karışımlarını kullanmak üzere onaylandığı varsayılabilir.

Önceden belirlenecek zorunlu bir kota ile sürdürülebilir havacılık yakıtı piyasasına giren tüm yatırımcılara uygun maliyetli üretim süreçleri geliştirmenin verimli olduğuna dair bir sinyal verilebilecektir. Ayrıca, harmanlama kotasının karbondioksit emisyonunun azaltılmasına yönelik hedef odaklı olması ve bu amaca ulaşmak için en iyi rotayı ve üretim sürecini geliştirmeyi piyasaya bırakması durumunda, en uygun maliyetli üretim süreci için bir rekabet tetiklenebilir.

Diğer bir olası politika önlemi, yeşil sertifikaların getirilmesidir. Sertifikalar, bio-yakıtların havacılık sisteminde bir yerlerde kullanıldığını kanıtlamanın araçlarıdır. Yeşil sertifika sistemi, harmanlama kotası ve ek ücret arasında hibrit bir çözüm olarak kabul edilebilir. Karıştırma kotasının bir unsuru olarak, toplam sertifika miktarı sistemdeki ortalama bio-yakıt payını belirler. Ek ücretin bir unsuru olarak, yeşil sertifikalarla toplanan para, bio-yakıtların üreticilerine veya kullanıcılarına yeniden dağıtılabilir.

Yeşil sertifika sistemi, işlem maliyetleri ve farklı araçlar arasındaki etkileşim açısından sorunlu olabilecek paralel üçüncü bir sistem olacaktır. Ayrıca, düzenlemeye tabi kuruluşların sayısı ile ilgili olarak, yalnızca çok az sayıda yakıt tedarikçisi ve çok daha fazla sayıda uçak operatörü olduğundan, yukarı yönde bir yaklaşım tercih edilecektir. Bu sonuçta işlem maliyetlerinde bir azalmaya yol açabilir.

Özetlemek gerekirse, yeşil bir sertifika sistemi, örneğin paranın bio-yakıt kullanıcılarına/üreticilerine yeniden dağıtılması, tek tip harmanlama kotasının lojistik sorunlarının üstesinden gelinmesi ve kademeli bir uygulama için verilen olasılık gibi bir dizi konu için tercihli görünmektedir.

Sürdürülebilir havacılık yakıtı jet yakıtı havaalanlarında, aynı tanklarda depolanmamaktadır. Bu nedenle havalimanlarının bu alternatifi destekleyecek alternatif tesislere ihtiyacı olacaktır. Doğal olarak, bu havaalanına ek yatırım gerektirmektedir.

Daha geniş kapsamlı stratejik konseptler havacılık sektörü ve sürdürülebilir havacılığın bağımsızlığını geliştirmek için son derece önemlidir. Havacılık teknolojilerinin sürekli olarak iyileştirildiği varsayılmakla birlikte, mevcut teknolojilerin artırılması zararlı çevresel etkileri azaltmak için yeterli olmayacaktır. Bu amaçla havacılık sektörü uçak filolarında yakıt hücre tabanlı ve pil tabanlı konseptler gibi alternatif güç aktarım teknolojilerinin kullanımını geliştirmeye odaklanmasının çevrenin korunmasında çok daha etkili olabileceği değerlendirilmektedir.

Sürdürülebilir havacılık yakıtının daha fazla kabul görmesinin ve konuşlandırılmasının anahtarı, maliyetlerin düşürülmesidir. Uzun vadede, bu, hammaddeleri daha büyük ölçekte daha verimli bir şekilde işlemek için ileri teknolojilere ve sürdürülebilir ve ölçeklenebilir hammadde seçeneklerinin geliştirilmesine yatırım

yapılmasını gerektirecektir. Ancak, kısa vadede, hükümetlerden ve diğer paydaşlardan politika teşvikleri yoluyla geçici destek alınması gerekmektedir.

Havacılık sektöründe yoğun rekabet ortamında maliyetlerin düşürülmesinin gerekliliği ve küresel çevre regülasyonlara uyum zorunluluğu hem maliyet düşük hem de çevreye duyarlı karbon emisyonunun minimize eden, havayolu şirketlerinin maliyet ve regülasyon bazlı en uygun stratejileri geliştirmelerini ve uygulamalarını sağlayacaktır.

Bu anlamda yapılan bu çalışmanın ülkemiz ve küresel havayolu şirketlerinin yöneticileri, sektörde çalışanlar ve ilgili akademik çevre için bir uygulama rehberi olabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- Abbe, G. ve Smith, H. (2016). Technological development trends in solar-powered aircraft systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 60, 770-783. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.053>.
- Abdelhafez, A.A. ve Forsyth, A.J. (2009). A review of more-electric aircraft. *13th international conference on aerospace sciences & aviation technology*.
- Abrentes, I., Ferreira, A., Silva, A. ve Costa, M. (2021). Sustainable Aviation Fuels and Imminent Technologies - CO2 Emissions Evolution Towards 2050. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127937>
- Ahearn, M., Boeker, E., Gorshkov, S., Hansen, A., Hwang, S., Koopmann, J., Malwitz, A., Noel, G., Reheman, C., Senzig, D., Solman, G.B., Tosa, Y., Wilson, A., Zubrow, A., Dipardo, J., Majeed, M., Bernal, J., Biederman, A., Dinges, E., Rickel, D. ve Yaworski, M. (2017). Aviation Environmental Design Tool (AEDT) Technical Manual, Version 2d (Report no: DOT-VNTSC-FAA-17-16). U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. URL <https://aedt.faa.gov/>.
- Airbus, (2019). “Electric flight.” <https://www.airbus.com/innovation/future-technology/electric-flight.html> (Erişim Tarihi: 1 Temmuz 2021).
- Airbus, (2020). “Zero Emission.” <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission.html>. (Erişim Tarihi: 26 Nisan 2021).
- Akdemir, T. (2020). Avrupa Birliği’nde İklim Değişikliği ile Mücadelede Havacılık Vergileri. *Ankara Avrupa Çalışmaları Dergisi*, Cilt 19, Sayı 1, ss. 1-24.
- Algan, N. (2008). İklim Etiği. *Mülkiye Dergisi*, cilt: 32, sayı: 259, s.193.
- Alherbawi, M., McKay, G., Mackey, H. R. ve Al-Ansari, T.(2021). Jatropha Curcas for Jet Biofuel Production: Current Status and Future Prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135. p. 110396.
- Ankaya, F.Ü., Aslan, B.G. ve Yazıcı, K. (2018). Havaalanlarının Çevreye Olan Etkilerinde Çevre Yönetim Sisteminin Önemi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(4),162-169.
- Arjomandi, A., Dakpo, K.H. ve Seufert, J.H (2018). Have Asian airlines caught up with European Airlines? A by-production efficiency analysis. *Trans Research Part A: Policy Practice* 116, 389–403.

- Atmosfair, (2021). "Atmosfair airline index". [https:// www. atmos fair. de/en/ air_ travel_ and_ climate/ atmosfair_ airline_ index/](https://www.atmosfair.de/en/air_travel_and_climate/atmosfair_airline_index/). (Erişim Tarihi: 1 şubat 2021).
- Aydın, A., Öztürk, E. ve Akgül, G., (2021). Hava Kargo Yük Trafiğinin Sera Gazı Emisyonları Üzerindeki Etkisi: Türkiye Uygulaması. *Pearson Journal of Social Sciences & Humanities, Volume 6, Issue 13*. DOI: <http://dx.doi.org/10.46872/pj.277>
- Aydın, K. ve Aydın, U. (2021). Is there any convergence in the CO2 emission efficiency of airlines?. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17121-1>
- Backx, M., Carney, M. Ve Gedajlovic, E (2002). Public, private and mixed ownership and the performance of international airlines. . *Journal of Air Transport Management* 8(4),213–220.
- Bann, S.J., Malina, R., Staples, M.D. , Suresh, P., Pearlson, M., Tyner, W.E., Hileman, J.I. ve Barrett ,S.,(2017).The costs of production of alternative jet fuel: A harmonized stochastic assessment, *Bioresour. Technology*.179–187. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.032>.
- Barbarino, S., Bilgen, O., Ajaj, R.M., Friswell, M.I. ve Inman, D.J. (2011). A review of morphing aircraft. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 22 (9), 823-877. <https://doi.org/10.1177/1045389X11414084>.
- Bassiony, M.A., Ibrahim , A. ve El-Kassaby, M.M (2016). An Experimental Study on the Effect of Using Gas-to-Liquid (GTL) Fuel on Diesel Engine Performance and Emissions. *Alexandria Engineering Journal*.Volume 55(3):2115–2124. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.06.026>.
- Bicer,Y. ve Dincer I.,(2017). Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. *International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42(16):10722–10738*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.119>.
- Brelje, B.J. ve Martins, J.R.R.A. (2019). Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: a review of concepts, models, and design approaches. *Prog. Aerosp. Sci.* 104, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.06.004>.
- Calado, E.A., Leite M. ve Silva A. (2018). Selecting composite materials considering cost and environmental impact in the early phases of aircraft structure design. *J. Clean. Prod.* 186, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.048>.
- Cavallaro, R. ve Demasi, L., (2016). Challenges, ideas, and innovations of joined-wing configurations: a concept from the past, an opportunity for the future. *Progress in Aerospace Sciences* 87, 1-93. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.07.002>.

- Chen, Z., Tzeremes, P. ve Tzeremes, N.G (2018). Convergence in the Chinese airline industry: a Malmquist productivity analysis. *Journal of Air Transport Management* 73,77–86.
- Chiaromonti, D. (2019). Sustainable aviation fuels: The Challenge of Decarbonization. *Energy Procedia Feb. 2019;158:1202–1207*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.308>.
- Chow, C.K.W (2010). Measuring the productivity changes of Chinese airlines: the impact of the entries of non-state-owned carriers. . *Journal of Air Transport Management* 16(6),320–324
- Clean Sky 2 JU & FCH 2 JU, (2020). “Hydrogen-powered aviation, a fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050”. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200720_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report_FINAL%20web.pdf. (Erişim Tarihi: 26 Nisan 2021).
- Contreras, A.S., Özay, Y.K. ve Veziro T.N.(1997). Hydrogen as aviation fuel: a comparison with hydrocarbon fuels. *Int J Hydrogen Energy* 22,1053-1060.
- Czerny, A.I., Fu, X., Lei, Z. ve Oum, T.H., (2021). Post Pandemic Aviation Market Recovery: Experience and Lessons from China. *Journal of Air Transport Management. Volume 90*. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101971>.
- De Souza, L.L.P., Lora, E.E.S., Palacio, J.C.E., Rocha, M.H. ve Reno, M.L.G., Venturini O.J.(2018). Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. *J. Clean. Prod.* 203, 444-468. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.236>.
- Doğan, S. ve Tüzer, M., (2011). Küresel İklim Değişikliği ile Mücadele: Genel Yaklaşımlar ve Uluslararası Çabalar. *Istanbul Journal of Sociological Studies*, *cilt: 0*, *sayı: 44*,s.159-160.
- Doğan, M. (2018). Küresel Kamusal Mal Kapsamındaki Hava Kirliliğine Neden Olan Etkenlerin Havacılık Sektörü Odaklı İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(13), 142-156.
- Dray, L.M. (2018). Aviation Integrated Model 2015: Documentation. Air Transportation Systems Lab, *UCL Energy Institute*. <http://www.atslab.org/aim-2015-documentation-v9-270120/>.
- EASA, (2019). European Aviation Environmental Report. European Union Aviation Safety Agency, Brussels, Belgium.

- Edelman, S., Poza, D.P.I. ve Krieg, T. (2004). Fuel cell APU's in commercial aircraft an assessment of SOFC and PEMFC concepts. *24th international congress of the aeronautical sciences*.
- European Commission Aviation, (2021).” Havacılıktan kaynaklanan emisyonların azaltılması”.https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation_en. (Erişim Tarihi 29 Ocak 2021).
- European Commission, (2017). White Paper on the Future of Europe, Reflections and scenarios for the EU27 by 2025. 2017, s.8
- Fernandes, M.D., Andrade, S.T.P., Bistrizki, V.N., Fonseca, R.M., Zacarias, L.G., Gonçalves, H.N.C., de Castro, A.F., Domingues, R.Z. ve Matencio, T.(2018). SOFC-APU systems for aircraft: a review. *Int. J. Hydrogen Energy* 43 (33), 16311-16333. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.004>.
- Gartenberg, L., (2017). Battery Centric Serial Hybrid Aircraft Performance and Design Space. *Master thesis*. Embry-Riddle Aeronautical University.
- Gerste, R. D., (2017). *Hava Nasıl Tarih Yazar- Antikçağdan Günümüze İklim Değişiklikleri ve Felaketler*, (M. Karaismailoğlu, Çev), Kolektif Kitap.
- Gill, M., (2017). Preparing for CORSIA take-Off. IETA insights. https://www.ieta.org/resources/Resources/GHG_Report/2017/Preparing%20for%20CORSIA%20Take-off-%20Gill.pdf. (Erişim Tarihi: 29 Ocak 2021).
- Graver, B., Zhang, K. ve Rutherford, D., (2019). CO2 Emissions From Commercial Aviation. *International Council on Clean Transportation*. 1–13.
- Gnadt, A.R., Speth, R.L., Sabnis, J.S. ve Barrett, S.R.H., (2019). Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft. *Prog. Aerosp. Sci.* 105, 1-30. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.11.002>.
- Godula-Jopek, A. ve Westenberger, A., (2016). Hydrogen-fuelled aeroplanes. *Compend Hydrogen Energy* ,67-85.
- Gohardani, A.S., Doulgeris, G. ve Singh, R., (2011). Challenges of future aircraftpropulsion: a review of distributed propulsion technology and its potential application for the all electric commercial aircraft. *Prog. Aerosp. Sci.* 47 (5), 369-391. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2010.09.001>.

- Graham, W.R., Hall, C.A. ve Vera Morales, M., (2014). The potential of future aircraft technology for noise and pollutant emissions reduction. *Transp Policy* 34, 36-51.
- Gündoğan, A., Baş, D., Sayman, R., Arıkan, Y. ve Özsoy, G., (2015). A'dan Z'ye İklim Değişikliği Başucu Rehberi. *Bölgesel Çevre Merkezi REC Türkiye*, s.4.
- Hagmann, C., Semeijn, J. ve Vellenga, D.B., (2015). Exploring the green image of airlines: passenger perceptions and airline choice. *Journal of Air Transport Management* 43,37–45.
- Hassan, M., Pfaender, H. ve Mavris, D.N., (2017). Feasibility Analysis of Aviation CO2 Emission Goals Under Uncertainty. In: 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, p. 3267.
- Hollingsworth, P., Pfaender, H. ve Jimenez, H., (2008). A Method for Assessing the Environmental Benefit of Future Aviation Technologies. In: ICAS Secretariat - 26th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences 2008, ICAS 2008, 1, pp. 3708–3719.
- IATA, (2017). World air traffic statistics. Report of IATA, Canada.
- IATA,(2022). “CORSA Bilgi Sayfası” <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---corsia> / (Erişim Tarihi 14.10.2022)
- ICAO, (2019a). “CORSA Default Life Cycle Emissions Values for CORSA Eligible Fuels.”<https://www.icao.int/environmentalprotection/CORSA/Documents/ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions.pdf>.
- ICAO, (2019b). “CORSA Supporting Document: CORSA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology.”https://www.icao.int/environmentalprotection/CORSA/Documents/CORSA%20Supporting%20Document_CORSA%20Eligible%20Fuels_LCA%20Methodology.pdf.
- ICAO, (2020). Operational Impact on Air Transport. <https://data.icao.int/coVID-19/operational.htm>. (Erişim Tarihi: 12.01.2020)
- ICAO, (2021). CORSA Default Life Cycle Emissions Values for CORSA Eligible Fuels.

- Investing.com, (2023a).” ABD Mısır Endeks Verileri”.
<https://www.investing.com/commodities/us-corn-historical-data> (Erişim Tarihi: 26 Şubat 2023).
- Investing.com, (2023b).” ABD Soya Fasülyesi Endeks Verileri”.
<https://www.investing.com/commodities/us-soybeans> (Erişim Tarihi: 26 Şubat 2023).
- IPCC, (2013). “IPCC Fifth Assessment Report.”
- Janic, M., (2008). The potential of liquid hydrogen for the future ‘carbon-neutral’ air transport system. *Transp Res Part D Transp Environ* 13(7), 428-435.
- Jimenez, H., Pfaender, H. ve Mavris, D., (2012). Fuel Burn and CO2 System-Wide Assessment of Environmentally Responsible Aviation Technologies. *Journal of Aircraft. Volume 49*, 1913–1930. <https://doi.org/10.2514/1.C031755>.
- Karakaya, E., (2016). Paris İklim Anlaşması: İçeriği ve Türkiye Üzerine Bir Değerlendirme. *Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 3(1), 1-12. DOI: 10.30803/adusobed.188842
- Kaya, H.E., (2020). Kyoto’dan Paris’e Küresel İklim Politikaları. *Meriç Uluslararası Sosyal ve Stratejik Araştırmalar Dergisi*, 10(4). 165-191.
- Khalifa, R., Alherbawi, M., Elomri, A. ve Al-Ansari, T., (2022). Alternative Fuels’ Blending Model to Facilitate the Implementation of Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation. *Fuel. Volume 326*, 124974
- Khandelwal, B., Karakurt, A., Sekaran, P.R., Sethi, V. ve Singh, R., (2013). Hydrogen powered aircraft: The future of air transport. *Progress in Aerospace Sciences* 60, 45-59.
- Kirner, R., Raffaelli, L., Rolt, A., Laskaridis, P., Doulgeris, G. ve Singh, R., (2015). An assessment of distributed propulsion: advanced propulsion system architectures for conventional aircraft configurations. *Aero. Sci. Technol.* 46, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.06.022>.
- Koistinen, K., Upham, P. ve Bogel, P., (2019). Stakeholder signalling and strategic niche management: The case of aviation biokerosene. *J. Clean. Prod.* 225 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.283>.
- Koudis, G.S., Hu, S.J., Majumdar, A., Jones, R. ve Stettler, M.E.J., (2017). Airport emissions reductions from reduced thrust takeoff operations. *Transp. Res. D Transp. Environ.* 52, 15-28. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.02.004>.
- Kousoulidou, M. ve Lonza, L., (2016). Biofuels in aviation: Fuel demand and CO2 emissions evolution in Europe toward 2030. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 46166–46181. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.018>.

- Kumaş, K., İnan, O., Akyüz, A. ve Güngör, A., (2019). Muğla Dalaman Havalimanı Uçaklardan Kaynaklanan Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(2), 291-297. DOI: 10.21541/apjes.466338
- Kumbaroğlu, G., Or, İ. ve Işık, M., (2017). Karbon Vergisi ile Sera Gazı Emisyonlarının Azaltımı: Türkiye Vakası. *Uluslararası İlişkiler Dergisi, Special Issue: The Paris Climate Summit and its Repercussions*, 14(54), 149-174. DOI:10.33458/uidergisi.513239
- Lee, J.J., Lukachko, S.P., Waitz, I.A. ve Schafer, A., (2001). Historical and future trends in aircraft performance, cost, and emissions. *Annu. Rev. Energy Env.* 26, 167–200. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.167>.
<http://web.mit.edu/aeroastro/sites/waitz/publications/Ann.Rev.reprint.pdf>.
- Lee, J.J., Lukachko, P.S. ve Waitz, I.A., (2004). Aircraft and energy use. *Encycl Energy*, 29-38.
- Li, D., Zhao, S., Ronch, A.D., Xiang, J., Drofelnik, J., Li, Y., Zhang, L., Wu, Y., Kintscher, M., Monner, H.P., Rudenko, A., Guo, S., Yin, W., Kirn, J., Storm, S. ve De Breuker, R., (2018). A review of modelling and analysis of morphing wings. *Prog. Aerosp. Sci.* 100, 46-62. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.06.002>.
- Lim, M., Luckert, M.K. ve Qui, F., (2023). Economic Opportunities and Challenges in Biojet Production: A literature Review and Analysis. *Biomass and Bioenergy*. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106727>
- Liu, X., Zhou, D., Zhou, P. ve Wang, Q., (2017). Dynamic carbon emission performance of Chinese airlines: a global Malmquist index analysis. *Journal of Air Transport Management* 65:99–109.
- Lorenz, L., Isikveren, A.T. ve Sizmann, A., (2012). Progress and perspectives of electric air transport. *28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, Brisbane, Australia.
- Lufthansa Airlines, (2021).” 2021 Yılı Sürdürülebilirlik Raporu”. <https://www.lufthansagroup.com/en/responsibility> (Erişim Tarihi: 1 Mart 2023)
- Masson, P.J. ve Luongo, C.A., (2007). HTS machines for applications in all-electric aircraft. *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA*, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/PES.2007.385622>.
- Mayer, R., Ryley, T. ve Gillingwater, D., (2015). Eco-positioning of airlines: perception versus actual performance. *Journal of Air Transport Management* 44,82–89.

- Mazlan, N.M., Savill, M. ve Kipouros, T., (2017). Evaluating NO_x and CO emissions of bio-SPK fuel using a simplified engine combustion model: a preliminary study towards sustainable environment. *Kournal Aerosp Eng* 231(5), 859-865.
- Moolchandani, K., Govindaraju, P., Roy, S., Crossley, W.A. ve De Laurentis, D.A., (2017). Assessing Effects of Aircraft and Fuel Technology Advancement on Select Aviation Environmental Impacts. *Journal of Aircraft*. Volume 54, 857–869. <https://doi.org/10.2514/1. C033861>.
- Nojoumi, H., Dincer, I. ve Naterer, G.F., (2009). Greenhouse gas emissions assessment of hydrogen and kerosene-fueled aircraft propulsion. *Hydrogen Energy* 34(3), 1363-1369.
- Nuic, A., Poles, D. ve Mouillet, V., (2010). BADA: An advanced aircraft performance model for present and future ATM systems. *Int. J. Adapt. Control Signal Process.* 24, 850–866. <https://doi.org/10.1002/acs.1176>. <http://doi.wiley.com/10.1002/acs.1176>.
- Okonkwo, P. ve Smith, H., (2016). Review of evolving trends in blended wing body aircraft design. *Progress in Aerospace Sciences* 82, 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.12.002>.
- OurWorld, (2021) Annual total CO₂ emissions, by world region <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co-emissions-by-region?country=Asia~Africa~North+America~South+America~Oceania~Europe>.
- OurWorld, (2021a). Cars, planes, trains: where do CO₂ emissions from. <https://ourworldindata.org/co2-emissions-sport>. (Erişim Tarihi 29 Ocak 2021).
- Owen, B., Lee, D.S. ve Lim, L., (2010). Flying Into the Future: Aviation Emissions Scenarios to 2050. *Environmental Science and Technology*. Volume 44, 2255–2260. <https://doi.org/10.1021/es902530z>.
- Öztürk, M. ve Öztürk, A. (2019). BMİDÇS'den Paris Anlaşması'na: Birleşmiş Milletler'in İklim Değişikliğiyle Mücadele Çabaları. *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 12(4), 527-541. DOI: 10.25287/ohuiibf.494667
- Panahi, H.K.S., Dehghani, M., Kinder, J.E. ve Ezeji, T.C., (2019). A Review on Green Liquid Fuels for the Transportation Sector: A Prospect of Microbial Solutions to Climate Change. *Biofuel Research Journal*. Volume 6, 995–1024.
- Payan-Sanchez, B., Perez-Valls, M. ve Plaza-Ubeda, J.A., (2019). The contribution of global alliances to airlines' environmental performance. *Sustainability* 11(17), 4606.
- Pearce, B., (2020). Air travel slows in September, but cargo speeding up, IATA.

- Pereira, S.R., Fontes, T. ve Coelho, M.C., (2014). Can hydrogen or natural gas be alternatives for aviation? – A life cycle assessment. *International Journal of Hydrogen Energy* 2014;39(25):13266–13275. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.146>.
- Pornet, C. ve Isikveren, A.T., (2015). Conceptual design of hybrid-electric transport aircraft. *Prog. Aerosp. Sci.* 79, 114-135. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.09.002>.
- Prussi, Matteo, Lee, U., Wang, M., Malina, R., Valin, H., Taheripour, F., Velarde, C., Staples, M.D, Lonza, L. ve Hileman, J.I., (2021). “CORISIA: The First Internationally Adopted Approach to Calculate Life-Cycle GHG Emissions for Aviation Fuels.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 150 111398. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111398>.
- Prussi, M., (2021). CORISIA: The First Internationally Adopted Approach to Calculate Life-Cycle GHG Emissions for Aviation Fuels. *Renewable Sustainable Energy Volume* 150:111398. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111398>.
- Sairajan, K.K., Aglietti, G.S. ve Mani, K.M., (2016). A review of multifunctional structure technology for aerospace applications. *Acta Astronaut.* 120, 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.11.024>.
- Sala-i-Martin, X.X, (1996). The classical approach to convergence analysis. *Econ J*, 1019-1036.
- Schaefer, M., (2012). Development of a Forecast Model for Global Air Traffic Emissions. Yüksek Lisans Tezi. DLR.
- Schilling, T., Rötger, T. ve Wicke, K., (2016). Assessment of the Impact of Radically Climate-Friendly Aviation Technologies. *Greener Aviation*. 1–12.
- Schmidt, P., Weindorf, W., Roth, A., Batteiger, V. ve Riegel, F., (2016): Power-to-Liquids, Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel. *Study on behalf of the German Environmental Agency, Dessau-Roßlau*.
- Sharma, A., Jakhar, S.K. ve Choi, T.M., (2021). Would CORISIA Implementation Bring Carbon Neutral Growth in Aviation? A Case of US Full Service Carriers. *Transportation Research Part D: Transport and Environment Aug. 2021;97:102839*. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.102839>.
- SHGM, (2019).” Uluslararası Havacılığa Yönelik Karbon Denkleştirme ve Azaltma Şeması Uygulama Talimatı (SHT-CORSIA)” <https://web.shgm.gov.tr/tr/mevzuat/6203-uluslararasi-havaciliga-yonelik-karbon-denklestirme-ve-azaltma-semasi-uygulama-talimati-sht-corsia>. (Erişim Tarihi 25.05.2022).

- SHGM, (2022). “ CORSIA Uluslararası Havacılığa Yönelik Karbon Denkleştirme ve Azaltma Şeması”. <https://web.shgm.gov.tr/tr/havaalanlari/6277-cevre> (Erişim Tarihi 28.09.2022).
- Siemens, (2017). Electric motor sets two speed records. <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/electric-motor-sets-two-speed-records>. (Erişim Tarihi: 26 Nisan 2021).
- Soykan, G. ve Baharozu, E. (2015). Power flow application on an air vehicle electrical power systems. *1th international symposium on sustainable aviation*.
- Staples, M. D., Malina, R., Suresh, P., Hileman, J. I. ve Barrett, S. R. H. (2017). Aviation CO2 emissions reductions from the use of alternative jet fuels. *Energy Policy*, vol. 114.pp. 342–354.
- Statista, (2021). Leading airline groups worldwide in 2019, based on passengers. <https://www.statista.com/statistics/269617/top-10-airlines-worldwide-by-number-of-passengers/>. (Erişim Tarihi: 29 Ağustos 2021).
- Stratton, R. W. , Wong, H. M. ve Hileman, J. I., (2010). Life Cycle Greenhouse Gass Emission from Alternative Fuel. <http://www.partner.aero>.
- Terekhov, I., Schilling, T., Niklaß, M. ve Ghosh, R., (2018). Assessing the Impact of New Technologies in Aviation Using a Global Aircraft Fleet Forecasting Model. *AEGATS 1-12*.
- Tetzloff, I.J. ve Crossley, W.A., (2014). Measuring Systemwide Impacts of New Aircraft on the Environment. *Journal of Aircraft. Volume 51*, 1483–1489. <https://doi.org/10.2514/1.C032359>.
- Tradingeconomics.com, (2023). ”ABD Canola Endeks Verileri”. <https://tradingeconomics.com/commodity/canola> (Erişim Tarihi: 26 Şubat 2023).
- Türk Hava Yolları, (2021). ”2021 Yılı Sürdürülebilirlik Raporu”. <https://investor.turkishairlines.com/documents/sustainability/turkish-airlines-sustainability-report-2021.pdf> (Erişim Tarihi: 29.12.2022).
- Türkeş, M., Sümer, U.M. ve Çetiner, G., (2000). Küresel iklim değişikliği ve olası etkileri. Çevre Bakanlığı, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Seminer Notları (İstanbul Sanayi Odası).
- Türkeş, M., (2008). Küresel iklim değişikliği nedir? Temel kavramlar, nedenleri, gözlenen ve öngörülen değişiklikler. *İklim Değişikliği ve Çevre, sayı: 1*, s.27.
- Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı, (2021).” İklim Değişikliği ile Mücadelenin Önemi”.<https://www.mfa.gov.tr/iklim-degisikligiyle-mucadelenin-onemi.tr.mfa> (Erişim Tarihi: 12 Ekim 2022)

- UN, (1998). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA), (2020). Global greenhouse gas emissions. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>.
- UNFCCC, Kyoto Protocol -Targets for the first commitment period. <https://unfccc.int/process-andmeetings/the-kyoto-protocol/what-is-the-kyoto-protocol/kyoto-protocol-targets-for-the-firstcommitment-period> (Erişim Tarihi: 04.08.2021).
- US Energy Information Administration, (2023).” ABD Körfez Kıyısı Kerosen Tipi Jet Yakıtı Spot Fiyat Verileri”. https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=p&s=eer_epjk_pf4_rgc_dpg&f=m (Erişim Tarihi: 26 Şubat 2023).
- US Environmental Protection Agency, (2016).Greenhouse Gas Inventory Guidance Direct Emissions from Mobile Combustion Sources. www.epa.gov/climateleadership.
- Wang, W. C, (2016). Review of Biojet Fuel Conversion Technologies. *National Renewable Energy Laboratory*. p. 98. <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66291.pdf>.
- Wang, W.C. ve Tao L.(2016). Bio-jet fuel conversion technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016; Volume 53*:801–822. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.016>.
- Wang, M., Dewil, R., Maniatis, K., Wheeldon, J., Tan, T., Baeyens, J. ve Fang, Y., (2019). Biomass-Derived Aviation Fuels: Challenges and Perspective. *Progress in Energy and Combustion Science. Volume 74*, pages 31–49.
- Wang, M., Amgad, E., Lee, U., Bafana, A., Banerjee, S., Thathiana, P., Bobba, P., Burnham, A., Cai, H. ve Gracida-Alvarez, U.R. (2021). “Summary of Expansions and Updates in GREET® 2021.” *Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States)*.
- Wang, Z., Xu, X., Zhu, Y. ve Gan, T., (2020). Evaluation of carbon emission efficiency in China’s airlines. *Journal of Cleaner Product 243*,118500.
- Wei, H., Liu, W., Chen, X., Yang, Q., Li, J. ve Chen, H., (2019). Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review. *Fuel. 254* 115599. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.007>.
- Wheeler P., (2016). Technology for the more and all electric aircraft of the future. *IEEE international conference on automatica (ICA-ACCA)*.

- Winther, M. ve Rypdal, K., (2019). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. European Environment Agency (EEA). URL <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>.
- World Economic Forum, (2021).” Avrupa’da Sürdürülebilir Havacılık Yakıtlarının Karışım Yönetmeliği”. https://www3.weforum.org/docs/WEF_CST_EU_Policy_2021.pdf (Erişim Tarihi: 1 Mart 2023)
- Yanto, J. ve Liem, R., (2018). Aircraft fuel burn performance study: A data-enhanced modeling approach. *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.* 65, 574–595. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.014>.
- ZeroAvia, (2020). ZeroAvia Completes World First Hydrogen-Electric Passenger Plane Flight. <https://www.zeroavia.com/press-release-25-09-2020> (Erişim Tarihi: 26 Nisan 2021).
- Zhang, H., Saudemont, C., Robyns, B. ve Petit, M., (2008). Comparison of technical features between a more electric aircraft and a hybrid electric vehicle. *IEEE vehicle power and propulsion conference* .
- Zhu, Q., Pei, J., Liu, X. ve Zhou, Z., (2019). Analyzing commercial aircraft fuel consumption during descent: a case study using an improved k-means clustering algorithm. *J. Clean. Prod.* 223, 869-882. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.235>.