



Alınma
15 Şubat 2024
Kabul
04 Mart 2024

* Sorumlu yazar.
e-mail: ozturkoz@mu.edu.tr

Anahtar Kelimeler:

- Sürdürülebilir Havacılık
- Havacılık Yakıtları
- Sentetik Kerosen

Modern Havacılık Sektöründe Alternatif Enerji Kaynakları: Sürdürülebilirlik Hedeflerine Doğru Adımlar

Ozan Öztürk^{1,2,*} Hülya Göktepe³

¹ Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümü, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye

² Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivil Havacılık ABD, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

³ İşletme Bölümü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

ÖZET

21. yüzyılın modern havacılık sektörü, sürdürülebilirlikle ilgili önemli zorluklarla karşı karşıyadır, özellikle aşırı güç ve enerji gereksinimleriyle tanımlanan uçakların kullanımıyla. Bu çalışma, havacılık sektörünün sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına yardımcı olabilecek alternatif enerji kaynaklarını incelemektedir. Sentetik kerosen için biyoyakıt yolları, likit hidrojen, amonyak, sıvı doğal gaz, etanol, metanol ve elektrik sistemleri gibi enerji kaynakları, geleneksel fosil kökenli havacılık yakıtlarıyla karşılaştırılmaktadır. Ancak, bu alternatif enerji kaynaklarıyla ilgili teknik ve ekonomik konuların çözülmesi gerekmektedir. Uçak performansı, malzeme özellikleri, emisyonlar, maliyet ve ölçeklenebilirlik, kaynak ve arazi gereksinimleri, sosyal etkiler gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Bu inceleme, biyo-jet yakıtları, sentetik kerosen üretim yolları, sıvı doğal gaz ve likit hidrojenin teknik açıdan uygulanabilir olduğunu ve çevresel açıdan katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Ancak, yenilenebilir olmayan üretim yollarıyla ilgili sorunlar, tamamen sürdürülebilir bir havacılık ekosistemi için kalıcı çözüm oluşturmamaktadır. Sonuç olarak, sentetik kerosenin fosil kökenli türbin yakıtlarından geçiş senaryoları, likit hidrojen ve pil elektrik sistemlerinin eş zamanlı benimsenmesini önermektedir.

Alternative Energy Sources in the Modern Aviation Sector: Steps Toward Sustainability Goal

Ozan Öztürk^{1,2,*} Hülya Göktepe³

¹ Department of Airframes and Powerplants, Muğla Sıtkı Koçman University, Muğla, Turkey

² Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Aviation, Erciyes University, Kayseri, Turkey,

³ Faculty of Business Administration, Anadolu University, Eskişehir, Turkey

Received
15 February 2024
Accepted
04 Mart 2024

* Corresponding author.
e-mail: ozturkoz@mu.edu.tr

ABSTRACT

Keywords:

- Sustainable Aviation
- Aviation Fuels
- Synthetic Kerosene

The aviation sector in the 21st century faces a significant challenge in sustainability, particularly with the use of aircraft characterized by excessive power and energy requirements. This study examines alternative energy sources that could assist the aviation sector in achieving its sustainability goals. Energy sources such as biofuel pathways for synthetic kerosene, liquid hydrogen, ammonia, liquid natural gas, ethanol, methanol, and electric systems are compared with traditional fossil-origin aviation fuels. However, resolving technical and economic issues associated with these alternative energy sources is imperative. Factors such as aircraft performance, material properties affecting fuel processing, emissions, cost and scalability, resource and land requirements, and social impacts must be considered. This review indicates that bio-jet fuels, synthetic kerosene production pathways, liquid natural gas, and liquid hydrogen are technically feasible and can contribute environmentally. However, issues related to non-renewable production pathways pose challenges, offering no permanent solution for a fully sustainable aviation ecosystem. Consequently, transition scenarios from fossil-origin turbine fuels to synthetic kerosene propose the simultaneous adoption of liquid hydrogen and battery electric systems.

1. Giriş (Introduction)

2018 yılında, küresel havacılık endüstrisinin doğrudan sorumluluğundaki karbon dioksit (CO₂) emisyonları, yılda 1 milyar metrik tonu aşarak tarihsel bir zirveye ulaşmıştır (IATA, 2019). CO₂ konsantrasyonundaki artış, küresel yüzey sıcaklık değişiklikleriyle güçlü bir ilişki içinde olduğunu göstermiş ve antropojenik faaliyetlerin küresel iklim değişiklikleriyle bağlantılı olduğunu vurgulamıştır (Stips vd., 2016).

Havacılık, küresel CO₂ emisyonlarının %2-3'ünü oluştururken, CO₂ dışı emisyonlar atmosferde etkili bir radyatif zorlamaya (ERF) önemli katkılarda bulunabilir; ancak bu katkının kesin nicelendirmesi zordur (Lee et al., 2021). Hava taşımacılığının sürekli büyümesi, teknolojik gelişmeleri aşmış ve sera gazı emisyonlarını artırmıştır. Öngörüler, hava trafiğinin hızla artacağını ve bu durumun çevresel etkilerini daha da artırabileceğini göstermektedir (Hulst, 2006; Grimley, 2006).

Sürdürülebilir havacılık, sektör için temel bir zorluk olarak kabul edilmektedir. Havacılığın çevresel etkilerini azaltma çabaları, alternatif yakıtlarına yönelik araştırmalarda önemli bir büyümeye neden olmuştur. Ancak, tamamen sürdürülebilir bir yakıt geliştirilmesi, teknik, ekonomik ve diğer çeşitli zorlukları içermektedir. Alternatif yakıtların fosil kökenli havacılık türbinli motor yakıtlarının (ATF) yerini alması büyük bir çaba gerektirmektedir (Bejan vd., 1996; Aydın vd., 2015).

Sürdürülebilir havacılık, iklim etkisini azaltmak için havacılık endüstrisinde alternatif yakıtların ve teknolojilerin kullanımını ifade eder (Wolfgang, 2023). Bu çalışma, sürdürülebilir havacılığa giriş yapmakta ve havacılıkta enerji kullanımının durumunu analiz etmektedir. Alternatif yakıtları ve bu yakıtların uygunluğunu etkileyen temel faktörler konusunda bir genel bakış sunmaktadır. Sürdürülebilir havacılığın geleceği için enerjiye dair olası yaklaşımları karşılaştırmalı bir analizle özetlemektedir.

Kılış ve Kılış (2016), büyük havaalanlarını sürdürülebilirlik açısından karşılaştırabilmek amacıyla bir havaalanları için genel sürdürülebilirlik indeksi geliştirmiş ve aynı indeksleri hava yolları için elde ettikleri indekslerle birleştirerek sürdürülebilir havacılık indeksi tanımlamışlardır. Liu (2014), bir yenilenebilir enerji sisteminin sürdürülebilirliğinin belirlenmesi üzerine yaptığı çalışmada üç temel sürdürülebilirliği vurgulamış ve karmaşık bir sistem için bulanık mantık uygulamasını açıklamıştır.

Ekserji, termodinamik bir sistemin barındırdığı potansiyel enerjinin, herhangi bir referans haline göre kullanılabilirliğinin bir göstergesi şeklinde tanımlanır (Becattini, 2023). Romero ve Linares (2014), ekserji verimliliğini arttırmanın her zaman sürdürülebilirlik açısından yeterli olamayabileceğini savunmuş ve ek olarak tersinirlik derecesi ve ekserjik yıkım katsayısı gibi ekstra göstergelerin kullanılabileceğini belirtmiştir. Yazarların belirttiği gibi, ekserji verimliliğini arttırmanın maliyeti artırması durumunda, bu durumun eksergoekonomik sürdürülebilirlik için olumlu olmayabileceği vurgulanmıştır. Bu nedenle, ekserji analizlerine ek olarak yapılacak eksergoekonomik analizlerin gerekliliği vurgulanmıştır.

Aydın vd. (2013, 2015), bir turboprop ve bir turbofan motorunun kısımlarının ekserji analizini yapmış ve motorun çeşitli kısımlarındaki kayıpları ve en verimsiz bölgeleri tespit etmiştir. Ancak, motorların egzoz gazlarının direkt olarak atmosfere atıldığından dolayı, bu egzoz gazlarının içerdikleri ekserjinin geri kazanılmasının mümkün olmadığı ifade edilmiştir.

Analizlerin güvenilir sonuçlar verebilmesi bakımından referans çevrenin doğru bir şekilde belirlenmesi önemlidir, özellikle analizler kimyasal ekserji içeriyorsa daha da önemlidir (Tona vd., 2010). Gadreau vd. (2012), uçak motorlarının farklı çevre şartları içerisinde bulunacağı göz önüne alındığında, analizlerin sabit çevre şartları yerine zamanla değişen şartlarda yapılmasının sonuçları daha güvenilir hale getirebileceğini belirtmiştir. Ancak, Gadreau vd.'ye göre çevrenin sonsuz olduğu ve sistemden etkilenmediği varsayımı, atık ekserjinin çevreye etkisini değerlendirmede ve özel durumlarda hatalı sonuçlara neden olabilecektir.

Sewalt vd.'nin (2001) belirttiği gibi, yenilenebilir kaynaklardan gelen ekserji girdisinin kaybının çevreye zararı olmadığı düşünüldüğünde, sistemden çıkan ekserjinin bir kısmının geri kazanılabilmesi önemlidir. Midilli ve Dinçer (2009) tarafından tanımlanan geri kazanılabilir ekserji oranı, terminal binaları için önemli bir göstergedir. Ayrıca, Rocco vd. (2014), atıkların belirlenen çevre şartlarına göre pozitif ekserjiye sahip olmasının, atıkların çevrede değişiklik yapma potansiyelini gösterdiğini ve böylece atık ekserji miktarının çevresel etki için kullanılabileceğini belirtmiştir.

Bu çalışmada literatür taraması yapılarak sürdürülebilir havacılık yakıtlarının tanımları ve emisyon özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca, enerji kullanımının analizi ve alternatif yakıtların uygunluğunu etkileyen faktörler üzerine genel bir bakış sunulmuştur.

1.1. Sürdürülebilirlik Kavramı ve Sürdürülebilir Havacılık (Sustainability Concept and Sustainable Aviation)

"Sürdürülebilirlik" kelimesi, Latince "sustenere" kökünden türemiş olup, başlangıçta ormancılık, balıkçılık ve toprak bilimleri gibi alanlarla ilişkilendirilmiştir. Kavramsal olarak, sürdürülebilirlik, engellere rağmen verimliliği koruyabilme anlamında kullanılmıştır. 19. yüzyılda, özellikle gelişmiş ülkelerdeki çevresel sorunların etkisiyle, çevre hareketi sürdürülebilirlik kavramını daha geniş bir bağlamda ele almıştır. Birleşmiş Milletler İnsani Çevre Konferansı'nın 1972'deki toplantısı, kaynak kullanımındaki eşitlik, ekonomik ve sosyal gelişmenin çevreyle ilişkisi konusunda sürdürülebilirlik kavramının gelişimine öncülük etmiştir (Brundtland, 1987).

"Sürdürülebilir kalkınma" terimi, Kentbilim Terimleri Sözlüğü'nde, çevre değerlerinin ve doğal kaynakların akılcı yöntemlerle kullanılması ilkesine dayanarak ekonomik gelişmenin sağlanmasını amaçlayan çevreci bir dünya görüşünü tanımlar. Aynı şekilde, Macmillan Çevre Sözlüğü'nde sürdürülebilir kalkınma, yenilenebilir kaynakların tüketilmesine dayanan ve çevreye sınırlı zarar veren ekonomik büyümeyi ifade eder (Gülsün Nakıboğlu, 2017).

Havacılık sektöründeki sürdürülebilirlik ilgili resmi bir tanımlamadan önce, Birleşmiş Milletler'in Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'ni belirlemek için kullanılan Brundtland Raporu'nun tanımı benimsenmiştir. Bu rapora göre, sürdürülebilir kalkınma, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılamayı tehlikeye atmadan mevcut neslin ihtiyaçlarını karşılayan bir kalkınma biçimidir. Sürdürülebilirlik, çevre, toplum ve ekonomi arasında içsel bir bağlantı içerir (Brundtland, 1987).

Havacılık endüstrisi açısından, sürdürülebilirliğin çevresel etkileri, ekonomik uygunluk ve topluma yüklenen etkileri içermesi gerektiği önerilmektedir. Bu bağlamda, sürdürülebilir bir yakıtın sınırlı çevresel etkisi olmalı, geniş bir benimsenme için uygun maliyetli olmalı ve gelecekte hava taşımacılığında doğrudan veya dolaylı olarak etkilenen bireylerin refahını öncelikli olarak gözetmelidir. Bu anlayışa göre, çevresel, ekonomik ve sosyal faktörler arasındaki dengeyi sağlamak, havacılık sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerini belirlemek için temel bir ilkedir (Gülsün Nakıboğlu, 2017; Brundtland, 1987).

1.2. Kyoto Protokolü (Kyoto Protocol)

2005 yılında Japonya'nın Kyoto şehrinde yürürlüğe giren bir iklim değişikliği uluslararası anlaşmasıdır. "Kyoto Protokolü, endüstrileşmiş ülkelerin sera gazı emisyonlarını kolektif olarak %5 azaltacaklarına dair hukuki bağlayıcı bir anlaşmadır." (UNEP, 2008). Protokolün amacı, 2008 ile 2012 arasındaki beş yıllık bir dönemde altı farklı sera gazının toplam emisyonunu düşürmektir ve bu emisyon azaltımının iklim sistemine "tehlikeli antropojenik müdahaleyi önleyecek bir düzeyde" olması gerekmektedir (madde 2). Protokolde yer alan altı farklı sera gazı şunlardır:

- Karbon dioksit (CO₂)
- Metan (CH₄)
- Azot oksit (N₂O)
- Sülfür heksaflorür (SF₆)
- Hidroflorokarbonlar (HFK'ler)- özellikle HFC-23, HFC-134a ve HFC152a
- Perflorokarbonlar (PFK'ler)

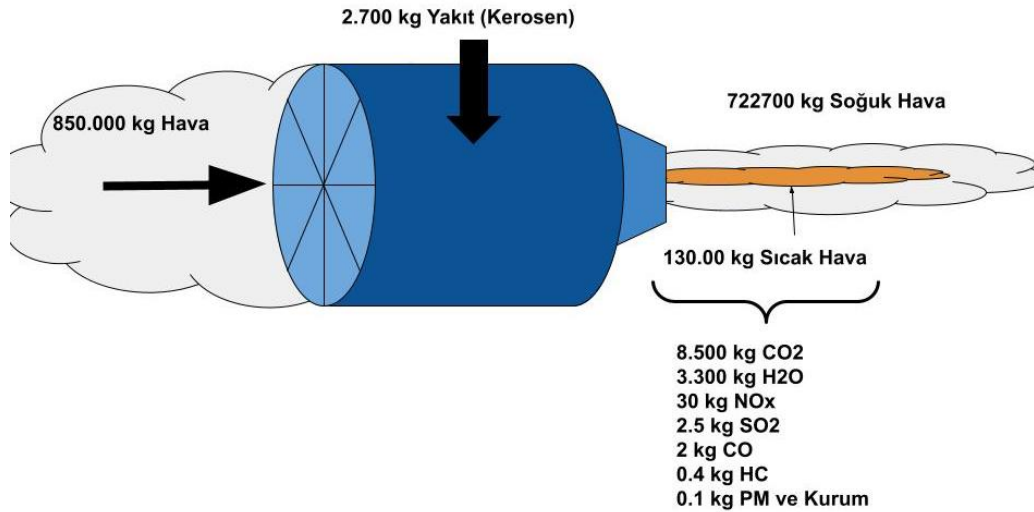
Kyoto Protokolü'nü oluştururken liderler, "endüstrileşmiş ülkelerin, 150 yıldan fazla bir süredir sanayi faaliyeti sonucunda atmosferdeki sera gazı emisyonlarının mevcut yüksek seviyelerinden başlıca sorumlu olduklarını" belirlediler (UNFCCC 1998).

Kyoto Protokolü, "ortak ancak farklılaştırılmış sorumluluklar" ilkesi altında bu gelişmiş ülkeler üzerinde ağır bir yük getirir. Kyoto Protokolü, küresel olarak CO₂ emisyonlarına bir sınır koyma yolunda bir başlangıçtır. Özellikle havacılığı hariç tutarak, "sera gazlarının havacılık kaynaklı emisyonlarını

sınırlamak veya azaltmak üzere Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü aracılığıyla çalışma" kararı almıştır (UNFCCC 1998).

1.3. Havacılık Kaynaklı Sera Gazları (Greenhouse Gases from Aviation)

Havacılık faaliyetleri, insan sağlığına ve çevreye etki edebilen çeşitli hava kirleticilerini içerir (ICAO, 2011). Uçakların havaya saldığı emisyonlar, yer seviyesine yakın veya yüksek irtifalarda olmalarına bağlı olarak, öncelikle yerel hava kalitesini etkileyen kirleticiler veya sera gazları olarak adlandırılır (FAA, 2005). Ticari uçaklar da dâhil olmak üzere insan kaynaklı emisyonlar, atmosferde ısıyı tutarak iklim değişikliğine sebep olurlar (GAO, 2009). Uçuşlar sırasında, uçaklar CO₂, NO_x, partikül madde (kurum/is), su buharı gibi sera gazları ve diğer emisyonları salarlar. Uçaklardan kaynaklanan CO₂ emisyonları, yakıtın doğrudan yanması sonucunda ortaya çıkar. Böylece, yakılan yakıt miktarının azaltılması, salınan CO₂ miktarının azalmasına neden olur. Uçak motorları ayrıca çevresel etkisi olan diğer kirleticileri de atmosfere salarlar (Mrazova, 2014). Sürdürülebilir havacılık yakıtlarının araştırılması, hava taşımacılığının çevresel etkisini ve toplam CO₂ ayak izini azaltma hedefi, Airbus ve Boeing gibi pek çok uçak üreticisinin ana prensibi haline gelmiştir.



Şekil 1. 150 Yolcu ile 1 Saatlik Uçuş Sırasında Tipik İki Motorlu Jet Uçağından Kaynaklanan Emisyonlar (Emissions from a Typical Twin-Engine Jet Aircraft during a 1-Hour Flight with 150 Passengers)

Şekil 1, uçak motorları tarafından operasyon sırasında yayılan temel kirleticileri gösterir: CO₂, NO_x, SO_x, yanmamış HC, CO, partikül madde (PM) ve kurumdur (EEA, 2009). CO₂, emisyonların yaklaşık %70'ini oluştururken, su buharı geri kalan %30'luk dilimin önemli bir kısmını oluşturur. Modern uçak motorları az miktarda metan ve azot oksitleri üretir veya hiç üretmezler. Emisyonların yaklaşık %1'ini oluşturan diğer kirleticiler arasında CO, metan olmayan uçucu organik bileşikler (NMVOC), SO_x, NO_x, diğer gazlar, PM ve kurum bulunmaktadır (EUROCONTROL, 2018). NO_x içinde nitrik oksit (NO) ve azot dioksit (NO₂) bulunurken, SO_x ve kurum da önemli emisyon türlerindedir. CO₂, NO_x ve su buharı emisyonları, diğer parametrelere kıyasla sera gazları açısından daha önemlidir (IPCC, 1999). IPCC 2006

kılavuzuna göre, beş ana hava kirletici olarak kabul edilen kirleticiler aşağıdaki tabloda listelenmiştir (National Academy of Sciences, 2008). Tablo 1, motorda yanma sonucu açığa çıkan kirleticilerin genel emisyon sürecine ve ilgili kirleticilere odaklanmaktadır.

Tablo 1. Emisyon kaynağı ve Emisyon süreci (Emission source and emission process)

Kaynak	Emisyon Süreci	Emisyonlar
Uçaklar <ul style="list-style-type: none"> • Jet • Turboprop • Piston 	Yanma İşlemi sonucu Oluşan	Ana Kirleticiler <ul style="list-style-type: none"> • CO₂, CH₄, N₂O Öncüler ve diğerleri <ul style="list-style-type: none"> • H₂O, PM, SO_x, NO_x, CO, NMVOC
	Yanma İşlemi Gerçekleşmeden Oluşan	Öncüler ve diğerleri <ul style="list-style-type: none"> • NMVOC

Havacılık sektörü, genellikle küresel ısınmaya katkıda bulunan CO₂ ve diğer sera gazlarını atmosfere salarak bu süreci hızlandırmaktadır. Sektör, Jet-A veya Avgas gibi yakıtların yanmasıyla uçuş sırasında salınan CO₂'nin yanı sıra, havalimanlarında kullanılan yer hizmetleri araçları ve personelin ulaşımında kullanılan araçlar gibi kaynaklardan kaynaklanan sera gazlarıyla da hava kirliliğine katkıda bulunmaktadır (Mrazova, 2014). Havalimanlarının ısınma ve elektrik ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılan fosil yakıtlardan, uçak kapılarını besleyen yardımcı güç ünitelerinde kullanılan jet yakıtlarından da sera gazı emisyonları ortaya çıkmaktadır (FAA, 2020). Tablo 1'teki emisyonlar kategorisinde, yanma süreci olmadan ortaya çıkan buharlaşma ve kaçak salınımları içerir. "Atık yönetimi faaliyetleri" altındaki kirleticiler, çeşitli süreçleri ve teknolojileri içerdiğinden, bu kategori kesin bir rehber değildir (National Academy of Sciences, 2008).

1.3.1. Karbondioksit (CO₂) (Carbon Dioxide)

CO₂, iki oksijen atomuyla kovalent bağlı bir karbon atomundan oluşan bir moleküldür. Bu renksiz gaz, oda sıcaklığında genellikle gaz halindedir. Doğada, bitkiler tarafından fotosentez sırasında karbon kaynağı olarak kullanılır ve oksidatif fosforilasyona bağımlı olan organizmalar tarafından salınır. Aynı zamanda gezegen atmosferlerinde bulunur ve metal zenginleşmesi ile sıcak gaz devlerinin birincil atmosferlerinin oluşumunda rol oynar. CO₂, Dünya dışındaki gezegenlerin ikincil atmosferlerinde bulunabilen umut verici bir türdür. Organik sentezde karbonil kaynağı olarak kullanılabilir, çünkü zehirsiz, bol, erişilebilir ve geri dönüşümlenebilirdir. Birçok araştırma grubu, değerli karbonil içeren bileşiklerin sentezinde CO₂ kullanımında önemli ilerlemeler kaydetmiştir. CO₂, CO ve oksidanın bir kombinasyonu olarak düşünülebilir, bu da karboksilasyon reaksiyonları için güvenli ve ekonomik bir strateji sunar (Klöwer et al., 2021).

Havacılık sektörü, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %2,46'sını oluşturuyor. 2050'ye kadar, havacılığın küresel karbon emisyonlarındaki payının %3'e yükselmesi ve toplam sera gazı emisyonlarının %5'ini oluşturması öngörülüyor. Bu oranlar göreceli olarak düşük olsa da havacılık sektörü, büyüme kaynaklı etkileri dengelemek için etkili emisyon azaltma önlemlerine ihtiyaç duymaktadır (Klöwer et al., 2021). IPCC verilerine göre, havacılığın küresel CO₂ emisyonları 2000 yılında yaklaşık 480 milyon ton civarındaydı (GAO, 2009). Son IPCC raporuna göre, taşımacılık sektörü 2010'da küresel CO₂ doğrudan

emisyollarının %2,7'sini oluşturdu ve temel CO₂ emisyonlarının 2050'ye kadar yaklaşık iki katına çıkacağı tahmin ediliyor (Abdullah et al., 2016).

Türkiye'deki uluslararası havacılık faaliyetlerinde %12'lik bir büyüme oranı göz önüne alındığında ve yakıt verimliliği de dikkate alınarak, 2030'a kadar hesaplanan CO₂ emisyon miktarı Tablo 2'te sunulmuştur (SHGM, 2018).

Tablo 2. CO₂ Emisyonlarının Sektörlere Göre Dağılımı. (Distribution of CO₂ Emissions by Sectors.)

Sektör	Payı (%)
Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık	25
Bina Işığı ve Isı	20
Yol	13
Diğer Elektrik ve Isı	12
Diğer Enerji	10
Kimyasal	6
Çimento retimi	5
Endüstriyel Işlemler	3
Havacılık	2.46
Diğer Endüstriler	0.02

1.3.2. Azot Oksit (NO_x) (Nitrogen Oxide)

NO_x (azot oksit) evresel açıdan önemli kirleticilerden biri olarak kabul edilen toksik atmosfer gazları grubunu oluşturur. evre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. NO_x emisyonları, enerji santralleri, endüstriyel süreçler ve fosil yakıt yanması gibi çeşitli kaynaklardan gelir. NO_x emisyonlarını azaltmak için oksidasyon, indirgeme ve adsorpsiyon/emilim teknikleri gibi farklı yöntemler geliştirilmiştir. Ayrıca, NO_x emisyonları, CO₂ ve sera gazı (GHG) emisyonlarını değerlendirmede bir lt olarak kullanılarak dekarbonizasyon ve genel sürdürülebilirlik açısından incelenmektedir. NO_x, sürdürülebilirliğin her bir ayağı ile güçlü bir ilişkiye sahiptir ve küresel emisyonlar ve dekarbonizasyon yolunda ilerlemenin daha kapsamlı bir görünümünü sunabilir. NO_x'ın maruz kalınması hem fiziksel hem de zihinsel sağlık üzerinde etkileri olduğu bilinmektedir, özellikle zihinsel sağlık koşulları NO_x maruziyeti ile ilişkilendirilmiştir. Genel olarak, NO_x önemli bir kirletici olup yapısal bir incelemeyi, çevresel kontrolü ve emisyonları ve sürdürülebilirliği değerlendirirken dikkate almayı gerektirir.

Bir uçuş sırasında yayılan NO_x kütlesinin, uçuşun her aşaması için yakılan her bir kilogram yakıt için 0.0000856 kg emisyon endeksi olduğu varsayılarak tahminler yapılmaktadır (IPCC. (1999). Atmosferde, NO insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerle ilişkilendirilen, özellikle akciğer iltihabı gibi durumlarla bağlantılı olan NO₂ haline hızla okside olur. NO₂ ayrıca ikincil partikül oluşumu ve yer seviyesindeki ozonun oluşumunda da önemli bir rol oynar. Dolayısıyla, azot oksitlerin hem hava kalitesi üzerinde doğrudan hem de dolaylı etkileri bulunmaktadır (NASA, 2020).

1.3.3. Sülfür/Kükürt Oksitler (SO_x) (Sulfur Oxides)

SO_x, insan sağlığı ve çevre üzerinde önemli etkilere sahip oldukça reaktif gazlardır. Kömür yanması, petrol rafinasyonu, petrol ve gaz üretimi ile atık yakma gibi çeşitli kaynaklardan salınır. SO_x, kireçle kaplanmış çatlak bir Kalsiyum sülfat (CaSO₄) kabuğu içeren yeni bir Kükürt dioksit (SO₂) giderme işleminden elde edilen katı bir yan ürün kullanılarak etkili bir şekilde nötralize edilebilir. Ayrıca, özellikle Bakır Zirkonyum (Cu-Zr) oksitleri farklı gaz atmosferinde SO_x'u depolayabilen ve salabilen geri dönüşümlü SO_x tutucuları olarak bilinmektedir. Petrol endüstrisindeki işlemlerden kaynaklanan kükürt bileşikleri, kontrol ve tedavi yöntemlerinin gerekliliğini vurgulayarak ortaya çıkar. SO₂ ve kükürt trioksit (SO₃) gibi sülfür oksitleri, genellikle elektrik santralleri ve endüstri tesislerinden kaynaklanan önemli ambiyans hava kirleticileridir ve çeşitli sağlık ve çevresel etkilere neden olabilirler.

SO_x, özellikle SO₂ ile temsil edilir ve solunum sistemini tahriş edebilen bir gaz grubunu içerirler. Bu tür emisyonlar, kükürt içeren yakıtların yanmasıyla ortaya çıkar. Oluşan SO_x, atmosferde sülfat aerosollerini oluşturur (National Academy of Sciences, 2008). SO_x emisyon miktarı, kullanılan yakıtın doğrudan kükürt içeriğine bağlıdır (IPCC. (1999). Sülfat aerosollerini, güneş ışınlarını doğrudan uzaya geri yansıtarak radyatif etkiyi olumsuz etkileyebilir. Yani, SO₂oksijenle birleşmesiyle oluşan sülfat aerosollerini, güneş ışığını yansıtarak bir soğutma etkisi yaratır (Lee, 2018).

1.3.4. Su Buharı (H₂O) (Water Vapour)

Su buharı (H₂O), suyun gaz halidir. Farklı bağlamlarda kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Uzak kızılötesi bölgedeki su buharı sürekli emilimini anlamak için laboratuvar ölçümleri yapılmış ve su dimerinin sürekli oluşuma önemli katkı sağladığı ortaya çıkarılmıştır. Su buharının ayrıca terahertz (THz) algılama ve görüntüleme spektroskopisinde rol oynadığı bulunmuş, femtosaniye lazer darbelerinin su buharına odaklandığında yoğun geniş bantlı THz emisyonu gözlemlenmiştir. Su buharı oluşturma teknikleri arasında oksijen ve hidrojenin ısıtılmış bir reaksiyon odasına verilmesi ve burada birleşerek su buharı oluşturmaları yer alır. Su buharı, optik fiber H₂O algılama sistemlerinin ölçüm hassasiyeti ve kararlılığı üzerinde etkili olabilir, ancak etkisi diferansiyel teknikler ve optik bileşenlerin uygun bir şekilde birleştirilmesi ile azaltılabilir. Ek olarak, nükleer reaksiyonları incelemek için iç su buharı jet hedefi kullanılmıştır. Bu, istenen buhar basıncına ulaşmak için bir su rezervuarının ısıtılması ve nükleer reaksiyonları incelemek için iç su buharı jetinin oluşturulması anlamına gelir.

Su buharı, hidrokarbon yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan ve doğal bir sera gazı olan bir bileşendir. Su, ışığı emme ve yansıtma özelliği nedeniyle küresel ısınmada etkili bir gazdır. Havacılık faaliyetlerinden kaynaklanan ek su buharı miktarı, küçük ölçüde pozitif bir radyatif etki yaratır (Lee, 2018). Havacılığın emisyonları çoğunlukla troposferde meydana gelir ve bu bölgede kısa bir süre kalır. Havacılık kaynaklı su buharı emisyonları, doğal kaynaklardan gelen miktarlara kıyasla oldukça düşüktür (GAO, 2009). Su buharı doğal olarak atmosferde yaygın olarak bulunur, ancak önemini artıran faktör, iklim değişikliği karşısında fiziksel veya kimyasal tepkiler vermesidir. Dünya atmosferi ısındıkça su buharı miktarı da artar. Bu artış, sera etkisinin oluşumunda kritik bir rol oynayan bulutların ve yağışların oluşumunu tetikler (SHGM, 2018). Su buharı emisyonları, yoğunlaşmış su buharı izleri olarak adlandırılan kontrailerin ve cirrus bulutlarının oluşumuna yol açabilir. Hem kontrailerin hem de cirrus bulutlarının,

atmosferde ısınma etkisine sahip olduğuna inanılmaktadır (GAO, 2009). Bu bulut türlerinin küresel ısınma üzerindeki etkileri üzerine araştırmalar devam etmektedir.

1.3.5. Karbonmonoksit (CO) (Carbon Monoxide)

CO, bitkilerde ve hayvanlarda çeşitli fizyolojik işlevlere ve sinyal iletimi rollerine sahip bir gaz olarak bulunmuştur. Bitkilerde, CO, heme ksijenaz enzimi tarafından üretilir ve kök gelişimi gibi süreçlerde ve çevresel streslere yanıtlarda biyo-düzenleyici olarak görev yapar. Hayvanlarda, CO, heme oksijenaz enzimi tarafından heme'nin parçalanmasıyla üretilir ve kardiyovasküler fonksiyonlarda önemli bir sinyal molekülü olarak tanınmaktadır. Kardiyovasküler bozukluklarla ilişkilendirilmiş ve fizyolojik seviyelere geri dönüşü, bu bozuklukların tedavisinde olumlu etkiler göstermiştir. Ayrıca, CO'nun rapor edilen anti-hipertansif, anti-inflamatuar ve hücre koruyucu etkilerinden dolayı potansiyel terapötik uygulamaları için incelenmiştir. Genel olarak, CO, hem bitki hem de hayvan sistemlerinde önemli roller üstlenir ve terapötik müdahaleler için potansiyel sonuçları bulunmaktadır.

CO, renksiz ve kokusuz bir gaz olup kan dolaşımındaki oksijeni değiştirerek çeşitli fizyolojik hasarlara neden olabilir. Havadaki yakıt ve oksijen arasındaki eksik yanmanın bir ürünüdür. CO, daha düşük sıcaklıklar ve yüksek yakıt/hava oranları gibi koşullarda oluşur. CO'nun doğrudan sera gazı etkisi çok azdır, ancak Ozon (O₃) gibi bileşenlerin oluşumunda bir öncüdür (National Academy of Sciences, 2008).

1.3.6. Metan Olmayan Uçucu Organik Bileşikler (NMVOC) (Non-Methane Volatile Organic Compound)

NMVOC önemli hava kirleticilerdir ve troposferik ozon oluşumuna katkıda bulunur, insan sağlığına, tarım verimlerine ve iklim üzerine olumsuz etkileri vardır. Tarım, özellikle hayvancılık ve gübre yönetimi, bazı bölgelerde endüstri, taşımacılık ve konut ısıtmasından daha fazla NMVOC emisyonuna neden olan önemli bir kaynaktır. NMVOC'lerin emisyon envanterlerinde doğru bir şekilde temsil edilmesi, atmosfer kimyasını, politika önlemlerini ve iklim projeksiyonlarını anlamak için hayati öneme sahiptir. Bununla birlikte, NMVOC'lerin emisyon envanterlerindeki temsiliyetini iyileştirme konusunda bazı zorluklar vardır; uzun vadeli ölçümlerin sınırlı olması, emisyon faktörlerinin güncellenmesi ve NMVOC türlerinin reaktivitesi gibi nedenlerle. Solventlerden ve diğer uçucu organik kimyasallardan kaynaklanan NMVOC emisyonlarının tahmini, geniş kullanım alanları ve çeşitli yerlerinden dolayı da zor olabilir. NMVOC'lerin dinamiklerini anlamak, hükümet müdahalelerini değerlendirmek ve emisyonları azaltmada kalıcı etkilerini değerlendirmek açısından önemlidir.

NMVOC, genellikle fotokimyasal reaksiyonlara katılan ve normal atmosfer koşullarında buhar olarak bulunan yüksek buhar basıncına sahip hidrokarbonları içerir. Bu bileşenler, O₃ oluşumunun öncülleridir. Bu tür halojenlenmemiş bileşiklerin doğrudan sera gazı etkisi oldukça düşüktür. Benzer şekilde CO gibi, özellikle düşük sıcaklık ve yakıt açısından zengin ortamlarda eksik yanma ürünleri olarak ortaya çıkabilirler. Ayrıca, havalimanlarında yapılan bakım, boyama gibi çeşitli faaliyetlerin buharlaşması sırasında da ortaya çıkabilirler. Uçaklar ve yer hizmetleri araçları, yakıt ikmali sırasında yanlış müdahaleler sonucu kaçak emisyonlar şeklinde yayılabilirler (National Academy of Sciences, 2008).

1.3.7. Partikül Maddeler (PM) ve Kurum (İs) (Particulate Matter and Soot)

Partikül madde, 10 mikrometreden daha küçük aerodinamik çapa sahip partikülleri ifade etmek için kullanılan bir terimdir. Fizikokimyasal olarak, partikül madde, doğal ve insan kaynaklı kaynaklardan doğrudan salınan veya ikincil olarak oluşturulan bileşenlerden oluşan karmaşık bir karışımdır (kurum, jeolojik ve aşındırılmış parçacıklar, biyolojik materyaller gibi). Bu karışım çok çeşitli bileşenler içerir: ağır metaller, sülfatlar, nitratlar, amonyum, organik karbonlar, polisiklik aromatik hidrokarbonlar, dioksinler/furanlar (ICAO, 2011). PM emisyonları genellikle yakıtın tam olarak yanmamasından kaynaklanır (Eurocontrol, 2018). Yakıt yanması sonucu oluşan partiküller, güneş ışığını emerek atmosferi ısıtır. Bu maddeler, küçük de olsa iklim üzerinde bir ısınma etkisi yaratır (pozitif radyasyon ışıması) (GAO, 2009).

"Kurum" emisyonları, uçak partikül emisyonlarının uçucu olmayan siyah-karbon içeriğini ifade eder. Diğer uçucu parçacık emisyonları da içerebilir ve bulutların radyoaktif ışıma özelliklerinde değişikliklere yol açabilir. Havacılık keroseninin tam olarak yanmaması sonucu kurum emisyonları meydana gelir. Kurum parçacıklarının kızılötesi radyasyonu emdiği ve ısınmayı etkilediği belirlenmiştir. Ancak kurumun sera gazı emisyonlarına olan etkisinin oldukça düşük olduğu bulunmuştur (Lee, 2018).

2. Havacılık Pazarları ve Yakıt Tüketimi (Aviation Markets and Fuel Consumption)

2018 yılına göre artan kapasiteye bağlı olarak, 2018'de 359 milyar litre, 2019'da 363 milyar litre ve 2020'de 371 milyar litrelik bir yakıt tüketimi gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, sektördeki yakıt giderlerinin Brent petrol fiyatlarındaki düşüşe rağmen 2018'de 180 milyar dolar, 2019'da 188 milyar dolar ve 2020'de 182 milyar dolardır. Bu durum, 2018'de %22,8 olan yakıt verimliliğinin 2020'de %21,9'a gerilemiştir. Artan bu verimlilikle birlikte, 2018'de %23,5 olan yakıtın giderler içindeki payının 2020'de %22,1'e düşmüştür. Bu veriler, sektördeki kapasite artışına rağmen yakıt tüketimi ve giderlerindeki oransal düşüşün devam etmiştir (Karataş, 2020). Küresel olarak, ATF (Aviation Turbine Fuel- Havacılık Yakıtı) kullanımı, 2019 öncesi COVID döneminde yılda tüketilen 98 milyar galon yakıt oranına ulaştı (IATA, 2019).

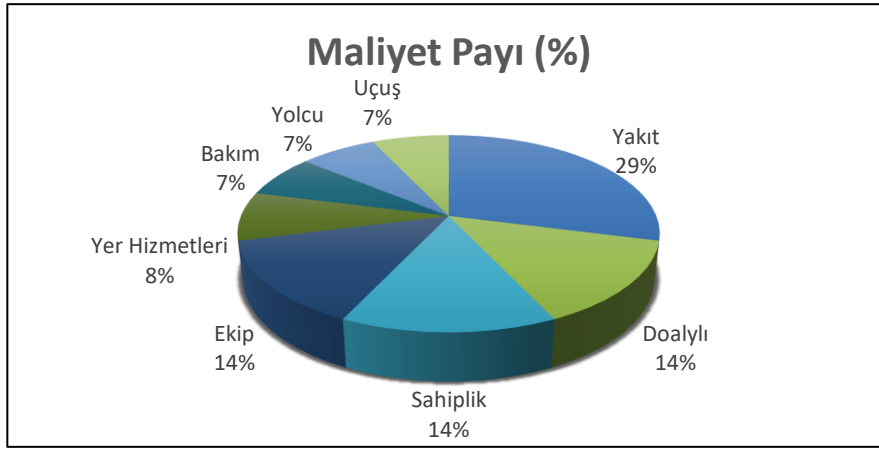
Tablo 3. 100 km'de tüketilen yakıt miktarı (Fuel consumption per 100 km)

Uçak Modeli	100 km'de Tükettiği yakıt miktarı (lt)
A320	427
A330	864
A350	962
A380	2060
B737	451
B747	1697
B777	1251

Havacılık endüstrisinde jet yakıtının kullanımının çevresel etkileri ve fiyat dalgalanmalarının yanı sıra sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesi, uçakların ömrü boyunca oluşan sera gazı emisyonlarının çoğunlukla uçuş sırasında gerçekleştiği ve bu durumun havacılık sektöründeki yakıtın çevresel sürdürülebilirliği üzerinde odaklanma gerekliliğini vurguluyor. Tek koridorlu uçakların endüstrideki

enerji tüketimindeki büyük rolü ve uzun menzilli uçuşların çevresel etkiyi artırdığı belirtilirken, sürdürülebilir çözümlerin bu uçak sınıfı için bulunmasının zorluğu ve yenilenebilir enerji entegrasyonunun fiziksel kısıtlamalar getirdiği ifade ediliyor. Havacılık sektöründeki enerji talebinin sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesi, teknolojik ilerlemelerin yanı sıra genel enerji sektöründeki gelişmelere bağlı olduğu ve çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir gelecek için yeni enerji taşıyıcıları ve teknolojilerin araştırılmasının önemine dikkat çekiliyor. Hava taşımacılığında yoğun kullanılan uçak tiplerinin 100 km’de harcadığı yakıt miktarı aşağıda verilmiştir (Yılmaz ve Atmanlı, 2016).

Hava yolu işletmelerinin giderlerine baktığımızda yakıt gideri gerçekten ciddi bir pay sahibidir. Karlılık ve işletmenin hayatta kalabilmesi için yakıt giderlerinin optimum seviyede tutulması gerekmektedir. Aşağıda hava yolu işletmesine ait gider dağılımı görülmektedir (Battal ve Mühim, 2016).



Şekil 2. Havayolu İşletmelerinde Operasyonel Maliyetler (Operational Costs in Airline Businesses) (Battal ve Mühim, 2016).

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, petrole olan bağımlılığı azaltma, sera gazı emisyonlarını düşürme ve kırsal kalkınmayı destekleme amacıyla biyoyakıtların farklı üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yakıtlar, birincil ve ikincil olmak üzere iki ana kategoride incelenir. Birincil biyoyakıtlar, kimyasal işlem gerektirmeyen atıklar, hayvansal yağlar, odun gibi doğal kaynaklarla kullanıma hazır halde bulunurken, ikincil biyoyakıtlar ise bitkisel yağlar, biyodizel, etanol gibi ürünler olarak işlenmiş ve kimyasal süreçlerle elde edilmiştir. Bu ikincil biyoyakıtlar da üretim tekniklerine ve hammaddenin dönüşüm sürecine göre farklı nesillerde sınıflandırılır, böylece enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve çevresel etkilerin azaltılması hedeflenir (Niğam ve Singh,2011)

2.1. Sürdürülebilir Yakıtların Analizi (Analysing Sustainable Fuels)

Havacılık endüstrisinde günümüz şartlarında ilgi çeken yakıt türleri şunlardır;

- Havacılıkta sentetik kerosen biyo-jet yakıtlar (BJF)
- Havacılıkta sentetik kerosen PtL (Power-to-Liquid) yakıtlar
- Sıvı hidrojen (LH₂)
- Sıvı doğal gaz (LNG)

- Amonyak (NH₃)
- Alkol (Metanol, CH₃OH ve Etanol, C₂H₆O)
- Elektrokimyasal (Batarya-Piller)

2.2. Sentetik Kerosen Yakıtlar (Synthetic Kerosene Fuels)

Sentetik kerosen yakıtları, geleneksel kerosenin yerine kullanılabilir, sentetik olarak üretilen bir tür yakıttır. Bu yakıtlar genellikle biyokütle, hidrojen veya karbon dioksit gibi ham maddelerden sentezlenir. Sentetik kerosenler, enerji taşıma sektöründe özellikle havacılıkta kullanılmak üzere geliştirilmektedir (Ram & Salkuti, 2023). Aşağıda sentetik kerosen yakıt türleri incelenmiştir.

2.2.1. Sentetik Kerosen Biyo-jet (Synthetic Kerosene Bio-jet)

Son on yılda, havacılık biyo-yakıtlarına büyük ilgi gösterilmiştir. Bu incelemede, biyo-enerjiden elde edilen kerosen yakıtları biyo-jet yakıtları (BJF) olarak adlandırılmaktadır. BJF'ler, diğer alternatif enerji taşıyıcıları arasında ticari uçuşlarda kullanılmak için sertifikalandırılmış en olgun yakıt türüdür, çünkü belirli oranlarda fosil kökenli havacılık yakıtıyla karıştırılabilirler. BJF'ler, farklı işleme yöntemleri kullanılarak çeşitli hammaddelerden elde edilebilir, bu da konuyu karmaşık hale getirir (Bauen vd., 2020).

BJF'ler, uçak işletmelerinin CO₂ emisyonlarını azaltma potansiyeli taşımaktadır. Tamamen BJF kullanan uçaklarla ilgili tahminler %80'e varan azalmayı öngörmektedir. Farklı üretim yöntemleriyle, fosil yakıtlara kıyasla %39 ila %42 arasında CO₂ azalması beklenmektedir (Ansell, 2023).

2.2.2. PtL Sentetik Kerosen (PtL Synthetic Kerosene)

PtL sentetik kerosen, CO ve H₂ kullanılarak üretilir. CO, atmosferik CO₂'den elde edilebilirken, H₂ suyun elektrolizi ile sağlanır. Alternatif olarak, metanol kullanımı da bir seçenek sunar, ancak henüz havacılık otoriteleri tarafından onaylanmamıştır. Bu süreçler DAC ve elektroliz gibi yenilenebilir kaynaklardan faydalanarak enerji yoğun olup, yenilenebilir elektrik kaynaklarına bağımlıdır.

PtL sentetik kerosenine dair detaylı incelemeler mevcuttur. Bu sentez, atmosferik veya endüstriyel atık CO₂'nin havacılık yakıtı üretimi için kullanılabilirliği ile dikkat çeker. Dünya genelinde 50'den fazla Power-X (PtX) pilot projesi, bu yaklaşıma artan ilgiyi göstermektedir (Schmidt vd.,2018).

2.2.3. Emisyonları (Emissions)

Sentetik kerosen yakıtları, havacılık sektöründeki sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeli taşımaktadır. Yakıt üretimi sırasında alınan CO₂'un tekrar emisyon haline getirilmesi, kapalı bir net-sıfır CO₂ döngüsü oluşturarak ideal bir durumu ortaya koyar. Ancak, bu yakıtların ömür döngüsünde diğer aşamalarda emisyonlar bulunmaktadır. Bu durum, yerel topluluklarda sera gazı yoğunluklarının ve okyanus asitlenmesi gibi ekosistem etkilerinin düşünülmesi gerektiğini göstermektedir. Bu yakıtların potansiyel faydaları, CO₂ dışındaki diğer emisyonları azaltarak, kontrailer oluşumunu ve sağlık etkilerini en aza indirgeyerek artırılabilir. Ancak, bu yakıtların NO_x emisyonlarını azaltma konusundaki etkisi, motor tasarım özelliklerine bağlı olarak sınırlı olabilir (Cherubini, 2011).

2.3. Sıvı Hidrojen (Liquid Hydrogen)

Uçaklar için likit hidrojen (LH₂) kullanımı, yüksek enerji ve soğutma kapasitesiyle öne çıkar ve tamamen yenilenebilir kaynaklardan üretilebilir. Ancak, maliyet, güvenlik ve kabul gibi zorluklar nedeniyle geniş ölçekte kullanımı henüz tam olarak gelişmemiştir. Geçmişten günümüze yapılan deneysel uçuşlar ve araştırmalar, LH₂'nin ticari uçaklarda potansiyelini ortaya koymuştur. Özellikle Airbus'un ZEROe programı, hidrojenle çalışan ticari uçakların geliştirilmesini hedefliyor. Bu program kapsamında yapılan test uçuşları, gelecekteki uçak tasarımlarını şekillendirmek için önemli veriler sunmaktadır. Bununla birlikte, LH₂'nin ticari havacılıkta kullanımı için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

LH₂'nin avantajları arasında düşük çevresel etki, karbonsuz çalışma ve potansiyel olarak sürdürülebilir üretim yer alır. Ancak, LH₂'nin depolanması ve taşınması zorlu bir süreçtir çünkü sıvı hidrojenin düşük sıcaklıklarda tutulması gerekir. Bu durum, enerji yoğunluğunun artırılması ve uçuş menziline iyileştirilmesi açısından avantajlar sunsa da, mevcut altyapı ve teknoloji ile uyumlu hale getirilmesi gereken önemli bir meseledir.

LH₂'nin havacılıkta kullanımı, sektördeki çeşitli paydaşlar arasında bir dizi teknik, ekonomik ve operasyonel zorlukları beraberinde getirir. Ancak, bu tür alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi, sektörde sürdürülebilirliği artırma çabalarının bir parçası olarak önemli bir potansiyele sahiptir (Klug ve Faass, 2001).

2.3.1. Emisyonları (Emissions)

LH₂'nin çevresel avantajlarından biri, karbonsuz olması ve dolayısıyla doğrudan CO₂ emisyonlarını ortadan kaldırmasıdır. Hidrojen sistemleri, geleneksel kerosen motorlarına göre daha fazla su buharı emisyonuna neden olabilir, ancak bu sera gazı olarak etkili olmak için yüksek irtifalarda oluşmalıdır. Ayrıca, LH₂'nin kimyasal iz bulutları, geleneksel yakıtlara göre daha ince olup radyatif zorlamayı azaltabilir.

Ancak, LH₂'nin yanma sürecinde yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında üretilen NO_x emisyonları, bu emisyonları artırma potansiyeline sahiptir. Mikro karışım yakıt enjeksiyonu ve düşük H₂-hava oranları gibi yöntemlerle bu emisyonlar önemli ölçüde azaltılabilir. LH₂'nin çevresel etkileri üzerinde, atmosfere sızan fazla H₂'nin metanı artırarak küresel ısınma potansiyeli yaratabileceği endişesi bulunmaktadır.

LH₂'nin üretim süreci de çevresel etkilere sahiptir ve fosil kaynaklardan elde edilen elektrik, LH₂ üretimini çevresel olarak sürdürülebilir hale getiremez. LH₂ üretiminin yaşam döngüsü emisyonları, üretim yoluna bağlı olarak değişir. Elektroliz, sürdürülebilir bir H₂ üretim yöntemi olarak görülse de enerji yoğun bir işlemdir ve daha verimli hale getirilmesi gereklidir.

LH₂'nin çevresel sürdürülebilirliği, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına bağlıdır. Araştırmalar, LH₂'nin diğer yakıtlara kıyasla yaşam döngüsü emisyon etkilerinin daha düşük olduğunu göstermiştir, ancak bu potansiyel, yenilenebilir enerji kullanımının artmasıyla mümkün olabilir (Bicer ve Dincer, 2017)

2.4. Sıvı Doğal Gaz (LNG) (Liquid Natural Gas)

LNG'nin havacılıkta enerji taşıyıcısı olarak kullanımı, özellikle yakın dönemde cazip bir seçenek olarak öne çıkıyor. Fosil kaynaklı doğal gazın kullanımıyla yakıt maliyetlerini ve emisyonları azaltma potansiyeli sunarken, uzun vadede biyogaz gibi yenilenebilir kaynaklara geçişi de destekliyor. LNG'nin uçaklar için kullanılabilirliği, LH₂ ve diğer sentetik kerosen yakıtlarıyla benzer avantajlar ve zorluklar içeriyor. Özellikle kriyojenik sıcaklıklar, yüksek yanabilirlik ve farklı motor sistemlerinde esnek kullanım gibi teknik zorluklar mevcut.

Sıvı metan (LCH₄) kullanımına ilişkin deneyler geçmişte gerçekleşti ve LNG ile yapılan uçuşlar da 1980'lerde ve sonrasında gündeme geldi. Özellikle, LNG'nin emisyonları azaltma amacıyla gelecek nesil uçaklarda enerji taşıyıcısı olarak kullanılması önemli araştırma programları tarafından destekleniyor. Havacılıkta LNG'nin kullanımı, enerji maliyetlerini düşürme ve yerli kaynaklara erişimi artırma vaadiyle birçok alanda ilgi çekici bir seçenek olarak kabul ediliyor. Bu, havacılık endüstrisi için hem kısa hem de uzun vadede dikkate alınması gereken bir enerji taşıyıcısı olarak öne çıkıyor (Mody, 2010).

2.4.1. Emisyonları (Emissions)

LNG, fosil kaynaklardan ve biyojenik besinlerden türetilebilir olmasıyla, sürdürülebilir güç sistemlerine ve altyapıya geçişi destekleyen bir esneklik sunar. Bu, fosil kaynaklı başlayıp daha sonra tamamen yenilenebilir kaynaklara geçiş yapılabilen senaryoların önünü açar. Doğal gazın yanması, aynı ısı salınımı için kerosen yakıtlarına göre daha az CO₂ emisyonu üretir. Bu sebeple, fosil doğal gaz kullanılsa bile, tek koridorlu bir LNG uçağının geleneksel yakıtlı uçağa göre CO₂'de %24, NO_x emisyonlarında ise %69 oranında azalma sağlayabileceği öngörülmektedir.

Ancak, LNG üretim ve sıvılaştırma süreçleri, havacılık için fosil kaynaklı LNG enerji sistemlerinin tam yaşam döngüsü çevresel sürdürülebilirliğini sorgulamaktadır. Denizcilikte kullanılan yenilenebilir LNG'ye dair yapılan analizler de benzer CO₂ azalmalarını göstermektedir. Ancak, CCS benzeri teknolojilerin kullanılmadığı sürece, yenilenebilir LNG havacılıktaki çevresel etkiyi azaltmada yararlı olabilir ancak net sıfır CO₂ etkisi sağlayamayabilir.

Bununla birlikte, doğal gazın kayıp kaçakları ve boru hatlarından sızıntılar gibi emisyonlar, LNG kullanımının çevresel etkilerini artırabilir. Bu nedenle, LNG'nin etkilerini anlamak ve kontrol etmek, havacılıkta bu enerji taşıyıcısının kullanımını değerlendirirken önemlidir (Abrahams vd., 2015).

2.5. Amonyak (Ammonia)

Amonyak, sıvı formda düşük sıcaklık ve basınç altında kolaylıkla yönetilebilen bir enerji taşıyıcısı olarak öne çıkıyor. Bu özelliği, amonyağın uzun süre depolanmasını ve taşınmasını daha etkili hale getiriyor. Bu nedenle, moleküler hidrojen işlemlerinde lojistik zorlukları azaltan bir araç olarak da düşünülüyor. Amonyak, çeşitli motorlarda yakılabiliyor veya hidrojen üretimi için kullanılabilir. Haber-Bosch prosesiyle üretilen amonyak, mevcut altyapılar üzerinden dağıtılabiliyor ve uçaklar için hidrojen olarak kullanılabilen LH₂'ye dönüştürülebilir.

Ayrıca, amonyak geçmişte bazı uçuş deneylerinde kullanılmış olsa da hidrokarbon yakıtlara kıyasla performans eksiklikleri olduğu tespit edilmiş ve daha fazla incelenmemiştir. Ancak, NASA ve

ARPA-E gibi kurumlar, amonyağı havacılık için enerji taşıyıcısı olarak aktif bir şekilde değerlendiriyorlar (Zhao vd., 2019). Amonyakın potansiyeli, daha ileri araştırmalar ve teknolojik gelişmelerle birlikte, havacılık sektöründe sürdürülebilir enerji taşıyıcıları arasında önemli bir yer edinebilir

2.5.1. Emisyonlar (Emissions)

Amonyak, CO₂ üretmeyen bir enerji taşıyıcısı olmasıyla dikkat çeker; ancak uygulamada amonyak yanması NO_x emisyonlarını artırabilir. Diğer yakıtlara kıyasla amonyakla uçak çalıştırmanın doğrudan çevresel ve toplumsal maliyeti yüksek olabilir. Amonyak üretimi, üretim yöntemlerine ve kaynaklara bağlı olarak sürdürülebilirlik açısından farklılık gösterir. Mevcut üretim yöntemleri, uzun vadeli sürdürülebilirlik konusunda belirsizlik yaratırken, elektrik şebekesinde yenilenebilir enerjinin yaygın kullanımını gerektiren elektrokimyasal yaklaşımlar daha sürdürülebilir bir üretim döngüsü sağlayabilir.

Amonyak, uçak kullanımında düşük enerji yoğunluğuna sahip olduğundan, uçağın ağırlığını artırarak genel verimliliğini azaltabilir. Bu durum, amonyak enerji uçaklarının diğer enerji taşıyıcılarına kıyasla daha büyük bir yaşam döngüsü emisyonuna sahip olabileceğini gösteriyor. Bu nedenle, amonyak enerji uçaklarının etki sırası düşük emisyonla sahip olsa da geleneksel yakıtlardan daha az etkili olduğunu gösteren yaşam döngüsü analizleri mevcut (Otto vd., 2022). Amonyakın havacılık sektöründe sürdürülebilir bir enerji taşıyıcısı olarak kullanımı, daha verimli üretim yöntemleri ve teknolojik gelişmelerle desteklendiğinde daha etkili bir seçenek olabilir.

2.6. Alkol (Alcohol)

Alkol bazlı yakıtlar, havacılıkta bazı uygulamalar için dikkat çekmiş olsa da özellikle metanol ve etanol üzerinde daha fazla odaklanılmıştır. Metanol, doğal gaz, kömür, biyokütle veya CO₂ hidrojenasyonu ile elde edilebilirken, etanol genellikle nişasta veya şeker fermantasyonuyla üretilir. Hem etanol hem de metanol, genel ve tarihsel olarak havacılık uygulamalarında göz önünde bulundurulmuş ve sentetik kerosen üretimi için kullanılmıştır.

Ancak, propanol ve butanol gibi diğer alkoller daha az üretim ve dağıtım altyapısına sahip olduğu için daha az dikkat çekmiştir (Shauck vd., 1994). Bu alternatif alkollerin havacılık yakıtlarında kullanımı, özellikle üretim ve dağıtım süreçlerindeki zorluklar ve maliyet faktörleri göz önüne alındığında, henüz metanol ve etanol kadar yaygın değildir. Ancak, ilerleyen teknoloji ve sürdürülebilir enerji çözümlerine olan talep arttıkça, bu alternatif alkollerin potansiyeli üzerinde gelecekte daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmaları beklenmektedir.

2.6.1. Emisyonlar (Emissions)

Etanolün genel havacılık yakıt karışımlarına entegrasyonu, egzozdan çıkan CO ve uçucu organik bileşiklerin (UHC) miktarında belirgin bir azalma sağlamıştır. Ancak, geleneksel havacılıkta kullanılan benzinle karşılaştırıldığında CO₂ emisyonlarında küçük artışlar ve azalan nitrojen oksit (NO_x) emisyonları gözlenmiştir. Alkol yakıtlarının gaz türbin motorlarına entegre edilmesi, düşük NO_x emisyonlarına yol açarak bu alkol kullanımının bir avantajı olarak öne çıkmıştır.

Etanolün havacılık için kullanımının temel avantajlarından biri, etanol üretimi için mevcut düşük emisyonlu biyo-enerji altyapısının varlığıdır. Ancak, etanol ve metanolün göreceli düşük özgül enerjileri

nedeniyle, bu alkol bazlı yakıtların ilişkilendirilen ömür boyu emisyonları diğer enerji taşıyıcılarına kıyasla oldukça yüksektir. Bu durum, alkol bazlı yakıtların havacılık için enerji taşıyıcısı olarak düşünüldüğünde önemli bir faktördür (Adelman ve Browning, 2012). Bu bağlamda, alkol bazlı yakıtların kullanımının ek avantajlar ve dezavantajlarla dengelenmesi, havacılık endüstrisinde sürdürülebilir enerji çözümleri arayışında kritik bir rol oynamaktadır.

2.7. Pil Elektrokimyası (Battery Electrochemistry)

Havacılık endüstrisinde pil-elektrik sistemlerinin gelişimi, diğer pil teknolojilerindeki genişleme ile paralel olarak artmıştır. Bu sistemler, uçaklar için sürdürülebilir enerji sağlama konusunda çekici bir seçenek sunar. Pil-elektrik sistemleri, uçak tahrikinde kullanıldığında doğrudan emisyon üretmez ve termal motorlar veya yakıt hücresi sistemlerine kıyasla daha yüksek uçtan uca tahrik verimliliği sunar. Ayrıca, pil sistemleri boşalırken önemli ölçüde kütle kaybetmez, bu da pil ile çalışan uçakların performansının görev süresi boyunca sabit kalmasını sağlar.

Ancak, bu sistemlerin özgül enerjilerinin düşük olması, özellikle kentsel hava taşımacılığı gibi sınırlı menzile sahip uçak uygulamaları için orta ve uzun vadede sınırlılıklar getirebilir. Pil-elektrik sistemlerinin ticari uçak uygulamaları için ana zorluğu da burada yatar. Ancak, modern uçak konfigürasyonlarında daha fazla elektrikli sistemlerin benimsenmesiyle, pil-elektrik sistemleri uçakların ağırlığını azaltmasına ve genel sistem verimliliğini artırmasına izin veren bir rol oynamaktadır.

Bu sistemlerin ticari taşımacılık uçakları için tamamen elektrikli bir seçenek olmasının yakın veya orta vadede sürdürülebilir olmadığı gösterilmiştir. Ancak, düşük maliyetli ve çevre dostu uçak işletmeleri için hibrit elektrikli uçaklar üzerine yapılan çalışmalar devam etmektedir (Hepperle, 2012). NASA ve diğer programlar, tamamen elektrikli uçakların ötesine geçerek, büyük taşıma sınıfı uygulamalar için pil-elektrik sistemlerinin geliştirilmesine odaklanmış durumda. Örneğin, NASA'nın Elektrifikasyonlu Güç Aktarma Uçuş Gösterimi Projesi, bu alandaki ilerlemeleri teşvik etmekte ve ölçeklenebilirlik üzerine odaklanmaktadır (Misra, 2018).

2.7.1. Malzeme Özellikleri (Material Properties)

Pil sistemlerinin ticari uçak uygulamalarının gereksinim duyduğu ağırlık ve hacim kriterlerini karşılamada yetersiz olduğu açıkça görülmektedir. Özgül enerji ve enerji yoğunluğu değerleri, mevcut havacılık yakıtlarından önemli ölçüde düşüktür. Tamamen elektrikli tek koridorlu uçakların yaşanabilirlik için gereken pil özgül enerjisi tahminleri, şu anda mevcut pil sistemlerinin performansıyla örtüşmemektedir.

Halihazırda, pil sistemlerinin özgül enerjisi üzerine yapılan çalışmalar, 2030 yılı için daha yüksek özgül enerji seviyelerini hedeflemektedir. Ancak, pil sistemlerinin düşük özgül enerjisi, uçaklarda birincil enerji taşıyıcısı olarak kullanılmalarını önemli ölçüde kısıtlamaktadır. Bunun yanı sıra, pil materyallerinin diğer özellikleri de uçaklara entegrasyonlarını zorlaştırmaktadır. Özellikle, birçok pilin termal kaçak olaylarına duyarlı olduğu bilinmektedir; bu durum hücre kimyasına ve konfigürasyona, şarj ve paket entegrasyonuna bağlı olarak değişebilir (Yıldız, 2021).

Pil güvenilirliği ve güvenliği, uçaklar için önemli bir zorluk oluşturmakta olup, bazı pil-elektrik uçaklarının yanı sıra Boeing 787 gibi ticari uçaklarda da yangın vakaları yaşanmıştır (Sripad ve Bills, 2021). Bu durum, pil sistemlerinin uçak endüstrisinde tam anlamıyla entegre olabilmesi için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmalarının yapılması gerekliliğini vurgulamaktadır.

2.7.2. Emisyonlar (Emissions)

Pil-elektrik güç sistemleri, doğrudan emisyon üretmemeleri nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik açısından olumlu bir etki sağlar; ancak, bu sistemin çevresel etkileri temel olarak elektrik şebekesinin enerji üretim kaynaklarına bağlıdır. Dolayısıyla, pil-elektrik uçaklarının benimsenmesiyle emisyonların azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine büyük ölçüde bağlıdır. Şu anda, dünya genelindeki elektrik şebekelerinin yaklaşık %11,2'sini yenilenebilir enerji kaynakları oluşturmaktadır. ABD'nin 2050'ye kadar enerji üretiminin %80'inin rüzgâr, güneş enerjisi, hidroelektrik ve biyokütle gibi sürdürülebilir kaynaklardan sağlanabileceği tahmin edilmektedir.

Ancak, pil-elektrik uçaklarının, termal motorlara göre daha yüksek uçtan uca verimlilik sunmalarına rağmen düşük özgül enerji özelliklerine sahip olmaları, tamamen pil-elektrik konfigürasyonlarını şu anda endüstri için düşük emisyonlu bir çözüm yapmamaktadır (Mai vd., 2012). Bu durum, pil teknolojilerindeki gelişmelerin ve özellikle de enerji depolama kapasitesinin artırılmasıyla birlikte, pil-elektrik uçaklarının daha etkili bir çevresel çözüm olabilmesi için ilerlemelerin yapılması gerektiğini vurgular.

3. Karşılaştırmalı Analiz (Comparative Analysis)

Bu analiz sonucunda elde edilen verilere dayanarak çeşitli yakıtların havacılık uygulamaları için sürdürülebilirlik performansını değerlendiren yaklaşımla emisyon karşılaştırması sunulmaktadır. Bu değerlendirme, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve enerji üretimi süreçlerinin sürdürülebilir biçimde yönetilmesini temel almaktadır.

Analize göre, amonyak, etanol ve metanol gibi enerji taşıyıcıları düşük özgül enerji özellikleri nedeniyle yakıt olarak uygun görünmemektedir. Özellikle, amonyağın yüksek toksisitesi ve aşındırıcı doğası, depolama ve işleme güvenliği konularında karmaşıklıklara yol açmaktadır. Etanolün kara taşımacılığı pazarında kullanılmasına rağmen, uzun vadede ekonomik rekabetçi olmaması beklenmektedir.

Öte yandan, pil sistemleri bir dizi olumlu özellik sergilemektedir. Pillerin işletilmesi sırasında doğrudan emisyon üretmemeleri ve yüksek genel enerji verimliliği sağlamaları, bu teknolojilerin dikkat çekici avantajlarıdır. Ayrıca, geniş çaplı ağlar sayesinde elektrik enerjisinin iletimi için altyapı zaten mevcut ve kara taşımacılığı sektöründe büyüme örnekleri bulunmaktadır. Ancak, pil sistemlerinin düşük özgül enerjiye sahip olmaları, pil elektrikli uçaklar için enerji miktarındaki artışları beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, pil sistemlerinin şu anda tamamen uygulanabilir olmadığı görülmektedir. Ancak pil kimyası alanında önemli gelişmeler kaydedilirse, pil sistemlerinin havacılıkta sürdürülebilirliğin sonuçlarını önemli ölçüde iyileştirebileceği düşünülmektedir.

Yakıtlar arasında BJT sentetik kerosen, PtL sentetik kerosen, LH₂ ve LNG gibi çeşitli alternatifler bulunmaktadır. Her birinin farklı avantajları ve dezavantajları vardır. BJT kerosenler, toprak/kaynak kullanım gereksinimleri dışında diğer kategorilerde avantajlı görünmektedir. PtL sentetik kerosen, daha fazla ölçeklenebilirlik ve toprak kaynak zorluklarına sahip olmadığı için dikkate değer bir alternatif olarak sunulmaktadır. LNG'nin düşük maliyetli bir yakıt olması ve kullanılabilir bir taşıma ve dağıtım ağına sahip olması önemli avantajlar sunmaktadır.

Hidrojen, gelecekteki sürdürülebilir havacılık hedefleri için uygun bir yakıt olarak görülmektedir, ancak yakın ve orta vadeli uygulanabilirlik konusunda bazı zorluklar bulunmaktadır. Yenilenebilir kaynaklardan üretilen LH₂'nin, ölçeklenebilirlik ve maliyeti artırma olasılıkları bulursa da depolama ve kullanımında bazı zorluklar mevcuttur.

Genel olarak, sentetik kerosenler, LNG ve hidrojen gibi çeşitli enerji taşıyıcıları, havacılık için gelecekteki sürdürülebilir enerji taşıyıcıları olarak öne çıkmaktadır. Ancak her birinin kendi avantajları ve zorlukları bulunmaktadır. Bu nedenle, gelecekte havacılık için en uygun enerji taşıyıcısının belirlenmesi için teknolojik gelişmeler ve daha fazla araştırma gerekmektedir.

4. Sonuç ve Öneriler (Conclusion and Recommendations)

Havacılık sektörü, sürdürülebilirlik açısından kritik bir kavşak noktasında bulunmaktadır. Bu alandaki çabalar, uzun vadeli çözümler konusunda çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutları kapsamaktadır. Özellikle, havacılık endüstrisi, geleneksel fosil yakıtların geniş ölçüde kullanılmasının yol açtığı çevresel etkilerle başa çıkmak için önemli bir dönemeçtedir. Bu durum, havacılık sektörünün sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelik araştırmalar ve çözüm önerilerine odaklanmasını gerektirmektedir.

Birçok araştırmacı ve endüstri uzmanı, havacılık için potansiyel sürdürülebilir enerji kaynaklarını değerlendirmekte ve çeşitli öneriler sunmaktadır. Bu öneriler arasında sentetik kerosenler, sıvılaştırılmış hidrojen (LH₂), sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), amonyak, metanol, etanol ve pil teknolojileri bulunmaktadır. Her enerji taşıyıcısının kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır ve bu özellikler, sürdürülebilirlik üzerinde farklı etkilere sahiptir.

Gelecekte, pil-elektrik enerji sistemlerinin geliştirilmesiyle birlikte sürdürülebilirlik açısından daha iyi performans gösterme potansiyeli olduğuna inanılmaktadır. Ancak, bazı enerji taşıyıcıları, örneğin amonyak, metanol ve etanol gibi, sürdürülebilirlik açısından yeterli olmayabilir. Sentetik kerosenler, ticari havacılığın CO₂ emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir, ancak maliyet ve ölçeklenebilirlik sorunları çözümlenmelidir. LH₂ ise gelecekte havacılık için umut verici bir yaklaşım olabilir, ancak altyapı ve teknik zorluklarla karşılaşmaktadır.

Genel olarak, havacılık endüstrisinin enerji ihtiyacını karşılamak için farklı enerji taşıyıcılarını göz önünde bulundurması gerekmektedir. Fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için, sentetik kerosen üretimi ve kullanılabilirliğinin artırılması önemlidir. Ancak, tek bir çözüm bulunmamakta ve gelecekte çeşitli enerji kaynaklarının etkili bir şekilde entegre edileceği bir strateji belirlenmelidir.

Havacılıkta sera gazı emisyonlarının artması, çevresel etkilerin uzun vadeli olacağını göstermektedir. Bu nedenle, sürdürülebilir bir havacılık ekosistemi oluşturma aciliyeti, endüstri ve araştırma alanlarında öncelikli bir konu olarak değerlendirilmelidir. Gelecek yıllarda, havacılık endüstrisinde sürdürülebilirlik adına yapılan çalışmaların etkileri daha fazla hissedilecek ve bu alandaki gelişmeler büyük önem taşıyacaktır.

Bu sonuçlara dayanarak aşağıdaki öneriler sunulabilir. Bunlar altı başlık altındadır;

Çeşitlendirilmiş Enerji Kaynaklarına Yatırım: Havacılık endüstrisi, enerji taşıyıcılarını genişleterek mevcut enerji kaynaklarına alternatif yakıtları eklemelidir. Bu, enerji bağımsızlığını güçlendirirken aynı zamanda çevresel etkileri azaltabilir.

Yenilikçi Teknolojilere Odaklanma: Pil-elektrik sistemlerinin geliştirilmesiyle birlikte, özellikle gelecekte potansiyeli olan teknolojilere, örneğin LH₂ kullanımına, daha fazla yatırım yapılmalıdır. Yenilikçi teknolojilere odaklanmak, sürdürülebilirlik çabalarını destekleyebilir.

Sentetik Kerosen Üretiminin İyileştirilmesi: Sentetik kerosenlerin üretim sürecini iyileştirme çabaları, maliyetleri düşürmek ve ölçeklenebilirliği artırmak için önemlidir. Bu, ticari havacılıkta CO₂ emisyonlarını azaltma potansiyelini artırabilir.

Fosil Yakıt Bağımlılığını Azaltmak: Havacılık endüstrisi, sürdürülebilir enerji taşıyıcılarına geçiş yaparak fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmalıdır. Bu adım, uzun vadeli çevresel etkileri minimize etme konusunda kritik bir rol oynayabilir.

Altyapı ve Teknik Zorlukların Ele Alınması: Özellikle LH₂ gibi yeni teknolojilere geçiş, altyapı ve teknik zorluklarla karşı karşıyadır. Bu nedenle, bu engelleri aşmak için daha fazla araştırma ve geliştirme yapılmalıdır, bu da sürdürülebilirlik çabalarına destek sağlayabilir.

Endüstri ve Araştırma İş Birliği: Sürdürülebilir havacılık ekosistemi için endüstri ve araştırma kurumları arasında daha fazla iş birliği ve ortaklık teşvik edilmelidir. Bu, daha etkili ve verimli çözümlerin geliştirilmesine katkı sağlayabilir ve sektördeki sürdürülebilirlik çabalarını güçlendirebilir.

Bu öneriler, havacılık endüstrisinin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için bir rehber oluşturabilir ve enerji taşıyıcılarının çeşitlendirilmesi, teknolojik yeniliklere odaklanma ve iş birliği gibi adımların birleşimini vurgular.

KAYNAKLAR (RESOURCES)

Abdullah, M.-A., Chew, B. C., & Hamid, S.-R. (2016). Benchmarking Key Success Factors for the Future Green Airline Industry. *Social and Behavioral Sciences*, 224, 246–253.

Abrahams, L. S., Samaras, C., Griffin, W. M., & Matthews, H. S. (2015). Life cycle greenhouse gas emissions from US liquefied natural gas exports: implications for end uses. *Environmental Science & Technology*, 49(5), 3237–3245.

Adelman, H., Browning, L., & Pefley, R. (1976). Predicted exhaust emissions from a methanol and jet fueled gas turbine combustor. *AIAA Journal*, 14(6), 793–798.

- Ansell, P. J. (2023). Review of sustainable energy carriers for aviation: Benefits, challenges, and future viability. *Progress in Aerospace Sciences*, 141, 100919. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2023.100919>.
- Aydın, H., Turan, Ö., Karakoç, T. H., & Midilli, A. (2013). Exergo-Sustainability Indicators of a Turboprop Aircraft for the Phases of a Flight. *Energy*, 58, 550–560.
- Aydın, H., Turan, Ö., Karakoç, T. H., & Midilli, A. (2015). Exergetic Sustainability Indicators as a Tool in Commercial Aircraft: A Case Study for a Turbofan Engine. *International Journal of Green Energy*, 12, 28–40.
- Battal, Ü., & Mühim, S. A. (2016). Havayolu Taşımacılığında Yakıt Anlaşmalarında Riskten Korunma Yöntemleri ve Türkiye Uygulaması. *Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar* (611), 39-56.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., & Moran, M. (1996). *Thermal Design and Optimization*. John-Wiley & Sons, Inc.
- Bauen, A., Bitossi, N., German, L., Harris, A., & Leow, K. (2020). Sustainable Aviation Fuels: Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation. *Johnson Matthey Technol. Rev.*, 64(3), 263–278. <http://dx.doi.org/10.1595/205651320X15816756012040>.
- Becattini, F. (2023). Exergy of an open continuous medium. *Physical Review E*, 107(3), 034135. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.107.034135>
- Bicer, Y., & Dincer, I. (2017). Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(16), 10722–10738.
- Brundtland, G. H. (1987). *Our Common Future (Brundtland Report)*. United Nations.
- Cherbini, F., Peters, G. P., Berntsen, T., Strømman, A. H., & Hertwich, E. (2011). CO₂ emissions from biomass combustion for bioenergy: Atmospheric decay and contribution to global warming. *Gcb Bioenergy*, 3(5), 413–426.
- Directorate General of Civil Aviation TURKEY. (2018). (s. 57)
- European Environment Agency. (2009). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook- 2009*. European Environment Agency: https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation_annex.zip/at_download/file (Erişim Tarihi: 25 Ocak 2024).
- EUROCONTROL. (2018). *European Aviation Fuel Burn and Emissions Inventory System (FEIS)*. https://www.eurocontrol.int/archive_download/all/node/10454 (Erişim Tarihi: 18 Ocak 2024).
- FAA. (2005). *Aviation & Emissions- A Primer*. Federal Aviation Administration Office of Environment and Energy. United State of America: Federal Aviation Administration [FAA]. https://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/media/aeprimer.pdf (Erişim Tarihi: 21 Ocak 2024).
- Federal Aviation Administration [FAA]. (2020). *Airport Carbon Emissions Reduction*. ABD. https://www.faa.gov/airports/environmental/air_quality/carbon_emissions_reduction/ (Erişim Tarihi: 21 Ocak 2024).

- Federal Aviation Administration [FAA]. (2019). Economic performance of the airline industry, in: 2018 End-Year Report.
- Gadreau, K., Fraser, R. A., & Murphy, S. (2012). The Characteristics of Exergy Reference Environment and Its Implications for Sustainability Based Decision Making. *Energies*, 5, 2197–2213.
- Grimley, P. M. (2006). Indicators of sustainable development in civil aviation (Ph.D. Thesis, Loughborough University).
- Gülsün Nakıboğlu. (2017). Sürdürülebilirlik için Yeil Tedarik Zincirlerine Btnsel Yaklaım. Detay Yayıncılık, Ankara.
- Hepperle, M. (2012). Electric Flight: Potential and Limitations. Technical Report STO-MP-AVT-209.
- Hulst, D. (2006). Commercial Market Outlook 2022–2041. Boeing.
- IATA. (2019). Economic performance of the airline industry, in: 2018 End-Year Report.
- International Civil Aviation Organization [ICAO]. (2011). Airport Air Quality Manuel. Montreal, Kanada: International Civil Aviation Organization.
- IPCC. (1999). Aviation and The Global Atmosphere. UNEP; WMO. Costa Rica: The Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/av-en-1.pdf> (Eriim Tarihi: 29 Ocak 2024).
- Karata, Y. (2020). Havacılık sektöründe performans analizi, performansı etkileyen faktörler ve strateji (Doktora tezi). İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İletme Anabilim Dalı, Finans Bilim Dalı.
- Klöwer, M., Allen, M. R., Lee, D. S., Proud, S. R., Gallagher, L., & Skowron, A. (2021). Quantifying aviation’s contribution to global warming. *Environmental Research Letters*, 16(2021), 104027. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac286e>.
- Klug, H. G., & Faass, R. (2001). CRYOPLANE: Hydrogen fuelled aircraft—status and challenges. *Air Space Eur.*, 3(3–4), 252–254.
- Kılkı, ., & Kıkı, . (2016b). Multicriteria Analysis of Integrated Airline – Main Hub Airports Based on a Sustainable Aviation Sector Index. International Symposium on Sustainable Aviation, 29 Mayıs – 1 Haziran 2016, İstanbul, Türkiye.
- Lee, D., Fahey, D., Skowron, A., Allen, M., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S., Freeman, P., Forster, J., Fuglestedt, A., et al. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmos. Environ.*, 244, 117834. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>.
- Lee, D. S. (2018). The Current State of Scientific Understanding of The Non-CO2 Effects of Aviation on Climate. Manchester: Manchester Metropolitan University.
- Liu, G. (2014). Development of a General Sustainability Indicator for Renewable Energy Systems, A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 611–621.

- Mai, T., Sandor, D., Wiser, R., & Schneider, T. (2012). Renewable Electricity Futures Study: Executive Summary. Technical Report, National Renewable Energy Lab (NREL), Golden, CO, United States.
- Misra, A. (2018). Summary of 2017 NASA Workshop on Assessment of Advanced Battery Technologies for Aerospace Applications. In AIAA SciTech Forum and Exposition.
- Mody, P. P. C. (2010). Impact of Liquefied Natural Gas Usage and Payload Size on Hybrid Wing Body Aircraft Fuel Efficiency (Ph.D. thesis). Massachusetts Institute of Technology.
- Muhammad-Azfar Abdullah, Boon Cheong Chew, Syaiful-Rizal Hamid (2016). “Benchmarking Key Success Factors for the Future Green Airline Industry”. *Social and Behavioral Sciences*, 224, 246-253.
- Mrazova, M. (2014). Sustainable development – the key for green aviation. *Incas Bulletin*, 6 (1), 109-122.
- NASA. (2020). The Causes of Climate Change. *Global Climate Change: Vital Signs of the Planet*. <https://climate.nasa.gov/causes/> (Erişim Tarihi: 1 Haziran 2020).
- National Academy of Sciences (2008). Appendices to ACRP Report 11: Guidebook on Preparing Airport GHG Emissions Inventories. Washington: The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.
- Nigam, P. S., & Singh, A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources: Review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37, 52–68.
- Ottom, M. V., Vesely, L., Kapat, J., Stoia, M., Applegate, N. D., & Natsui, G. (2022). Ammonia as an aircraft fuel: Thermal assessment from airport to wake. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 85987, V002T03A023). American Society of Mechanical Engineers.
- Ram, V.; Salkuti, S.R. (2023) An Overview of Major Synthetic Fuels. *Energies*, 16, 2834. <https://doi.org/10.3390/en16062834>
- Rocco, M. V., Colombo, E., & Sciubba, E. (2014). Advances in exergy analysis: a novel assessment of the Extended Exergy Accounting Method. *Applied Energy*, 113, 1405–1420.
- Romero, J. C., & Linares, P. (2014). Exergy as a Global Energy Sustainability Indicator. A Review of the State of the Art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 427–442.
- Schmidt, P., Batteiger, V., Roth, A., Weindorf, W., & Raksha, T. (2018). Power-to-liquids as renewable fuel option for aviation: A review. *Chem. Ing. Tech.*, 90(1–2), 127–140.
- Scherbini, F., Peters, G. P., Berntsen, T., Strømman, A. H., & Hertwich, E. (2011). CO2 emissions from biomass combustion for bioenergy: Atmospheric decay and contribution to global warming. *Gcb Bioenergy*, 3(5), 413–426.
- Sewalt, M. P. G., Toxopeus, M. E., & Hirs, G. G. (2001). Thermodynamics Based Sustainability Concept. *International Journal of Applied Thermodynamics*, 4, 35–41.
- Shauck, M., Tubbs, J., & Zanin, M. (1994). Certification of a carbureted aircraft engine on ethanol fuel. In *Proceedings of AIAA/FAA/MSU 3rd Joint Symposium on General Aviation Systems*, Starksville, Missouri.

- Schmidt, P., Batteiger, V., Roth, A., Weindorf, W., & Raksha, T. (2018). Power-to-liquids as renewable fuel option for aviation: A review. *Chem. Ing. Tech.*, 90(1–2), 127–140.
- Stips, A., Macias, D., Coughlan, C., Garcia-Gorriz, E., & Liang, X.S. (2016). On the causal structure between CO₂ and global temperature. *Sci. Rep.*, 6(1), 1–9.
- Sripad, S., Bills, A., & Viswanathan, V. (2021). A review of safety considerations for batteries in aircraft with electric propulsion. *MRS Bulletin*, 46(5), 435–442.
- Tona, C., Raviolo, P. A., Pellegrini, L. F., & Junior S. de O. (2010). Exergy and Thermo-economic Analysis of a Turbofan Engine during a Typical Commercial Flight. *Energy*, 35, 952–959.
- United Nations Environment Programme. (2008). UNEP 2008 Annual Report.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (1998). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.
- United States Government Accountability Office [GAO]. (2009). Aviation and Climate Change. Washington, Amerika Birleşik Devletleri. <https://www.gao.gov/new.items/d09554.pdf> (Erişim Tarihi: 18 Ocak 2024).
- Wolfgang, Grimme. (2023). The Introduction of Sustainable Aviation Fuels—A Discussion of Challenges, Options and Alternatives. *Aerospace*, doi: 10.3390/aerospace10030218
- Yılmaz, N., & Atmanlı, A. (2016). Havacılıkta Alternatif Yakıt Kullanılmasının İncelenmesi. *Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 3-10.
- Yıldız, M. (2021). Electric Energy Use in Aviation: Perspective and Applications. *Journal of Polytechnic-Politeknik Dergisi*, 24, 1605–1610. <https://doi.org/10.2339/politeknik.852272>
- Zhao, Y., Setzler, B. P., Wang, J., Nash, J., Wang, T., Xu, B., & Yan, Y. (2019). An efficient direct ammonia fuel cell for affordable carbon-neutral transportation. *Joule*, 3(10), 2472–2484.