

Sürdürülebilir Havacılıkta Yeşil Dönüşüm

Editör: Doç. Dr. Gülbeniz Akduman



 ÖZGÜR
YAYINLARI

Sürdürülebilir Havacılıkta Yeşil Dönüşüm

Editör:

Doç. Dr. Gülbeniz Akduman



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şehitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozgurayinlari.com

✉ info@ozgurayinlari.com

Sürdürülebilir Havacılıkta Yeşil Dönüşüm

Editör: Doç. Dr. Gülbeniz Akduman

Language: Turkish

Publication Date: 2026

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-8813-36-4

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1353>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>
This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Akduman, G. (ed) (2026). *Sürdürülebilir Havacılıkta Yeşil Dönüşüm*. Özgür Publications.

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1353>. License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozgurayinlari.com/>



Ön Söz

Sürdürülebilir Havacılıkta Yeşil Dönüşüm kitabı, havacılık sektörünün sürdürülebilirlik ve karbonsuzlaşma sürecinde karşı karşıya kaldığı çevresel, ekonomik, teknolojik ve operasyonel dönüşümleri çok boyutlu bir yaklaşımla ele almaktadır. Küresel ölçekte artan hava trafiği, turizm hareketliliği, enerji talebi ve karbon emisyonları, havacılığı yalnızca bir ulaşım sektörü olmaktan çıkararak iklim politikaları, bölgesel kalkınma, altyapı planlaması ve işletme stratejileri açısından yeniden değerlendirilmesi gereken stratejik bir alan haline getirmiştir. Kitapta yer alan bölümler; düşük maliyetli havayollarının karbon ayak izi ve sürdürülebilir turizm üzerindeki çelişkili etkisini, helikopter operasyonlarında sürdürülebilirlik paradoksunu, sürdürülebilir havacılık yakıtlarının havayolu iş modellerine etkisini, Türkiye'deki büyük havalimanlarının sıfır emisyonlu uçak operasyonlarına hazırlık düzeyini ve yeşil havacılık dönüşümünün boş zaman endüstrisi bağlamındaki ekonomik kısıtlarını incelemektedir. Bu yönüyle çalışma, havacılıkta çevresel sürdürülebilirlik hedefleri ile ekonomik büyüme, erişilebilirlik, operasyonel zorunluluklar ve tüketici davranışları arasındaki gerilimleri görünür kılmaktadır. Kitap, sürdürülebilir havacılık literatürüne bütüncül bir katkı sunmanın yanı sıra, politika yapımcılar, havayolu işletmeleri, havalimanı yöneticileri, turizm aktörleri ve araştırmacılar için güncel ve yol gösterici bir kaynak niteliği taşımaktadır.

İçindekiler

Ön Söz iii

Bölüm 1

Yeşil Havacılık Paradoksu: Boş Zaman Endüstrisi Perspektifinden
Havacılıkta Karbonsuzlaşmanın Ekonomik Kısıtları 1

Hamza Ceylan

Gözde Güven

Bölüm 2

Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF) Kullanımının Havayolu İş
Modellerine Etkisinin Swot Analizi İle Değerlendirilmesi 11

Gözde Güven

Bölüm 3

Türkiye'deki Büyük Havalimanlarının Sıfır Emisyonlu Havacılık
Dönüşümüne Hazırlığının ARI Modeli ile Değerlendirilmesi 35

Hamza Ceylan

Eren Sezer

Bölüm 4

Helikopter Operasyonlarında Sürdürülebilirlik Paradoksu: Offshore ve Acil
Sağlık Perspektifi 51

Hamza Ceylan

Bölüm 5

Düşük Maliyetli Havayollarının Karbon Ayak İzi ve Sürdürülebilir Turizm
Üzerindeki Çelişkili Etkisi 67

Hamza Ceylan

Yeşil Havacılık Paradoksu: Boş Zaman Endüstrisi Perspektifinden Havacılıkta Karbonsuzlaşmanın Ekonomik Kısıtları

Hamza Ceylan¹

Gözde Güven²

Özet

Havacılık sektöründe karbonsuzlaşma sürecinin boş zaman odaklı seyahat talebi üzerinde oluşturduğu ekonomik kısıtları incelemektedir. Net sıfır karbon hedefleri doğrultusunda Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF), karbon fiyatlandırması, yeni nesil uçak teknolojileri ve altyapı yatırımları havayollarının maliyet yapısını yeniden biçimlendirmektedir. Ancak bu maliyetlerin bilet fiyatlarına aktarılması, özellikle turizm amaçlı ve fiyat duyarlılığı yüksek yolcu gruplarında talep daralması riski yaratabilmektedir. Yeşil havacılık paradoksu kavramı, havacılıkta büyüme hedefleri ile emisyon azaltımı zorunluluğu arasındaki gerilim üzerinden ele alınmaktadır. Literatür temelli kavramsal modelleme ve İstanbul-Antalya hattı üzerinden oluşturulan varsayımsal ödeme istekliliği senaryosuna dayanan çalışmadaki rota, Türkiye’de yoğun iç hat hareketliliği ve güçlü turizm talebi nedeniyle boş zaman seyahati bağlamını görünür kılan açıklayıcı bir örnek olarak seçilmiştir. Senaryo bulguları, düşük emisyonlu uçuş alternatifinin yolcular açısından algılanan çevresel değer üretebileceğini; ancak bu değerın bilet fiyatının her durumda bütünüyle karşılamayabileceğini göstermektedir. Sürdürülebilir uçuş ürünlerinin yalnızca çevreci söylemle değil, ölçülebilir karbon azaltımı, güvenilir sertifikasyon, maliyet şeffaflığı ve kamu destekli teşviklerle birlikte tasarlanması gerektiğine işaret etmektedir. Ayrıca gelir düzeyi, çevresel bilinç, seyahat zorunluluğu ve alternatif ulaşım seçenekleri gibi değişkenlerin ödeme istekliliğini etkileyebileceği değerlendirilmektedir. Bu nedenle fiyatlandırma kararları, teknik maliyet hesaplarının ötesinde

- 1 Öğr. Gör., Kapadokya Üniversitesi, Sivil Hava Ulaştırma İşletmeciliği (İngilizce), 50400, hamza.ceylan@kapadokya.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4242-0217>
- 2 Bağımsız Araştırmacı, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Kamu Politikası ve İşletmeciliği Ana Bilim Dalı, gozdegüvenn0@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1771-1186>

davranışsal ve destinasyon temelli etkiler dikkate alınarak kurgulanmalıdır. Bölüm, karbonsuzlaşma politikalarının havayolu işletmeleri, yolcular ve turizm destinasyonları açısından birlikte değerlendirilmesinin önemini vurgulamakta ve talep yönlü analizlerin gelecekteki araştırmalar için tamamlayıcı bir alan olduğunu göstermektedir.

1. GİRİŞ

Havacılık sektörü, küresel bağlanabilirlik, turizm, ticaret ve bölgesel kalkınma açısından stratejik bir işleve sahip olmakla birlikte, artan hava trafiği nedeniyle iklim değişikliği tartışmalarının merkezinde yer almaktadır. Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO), 41. Genel Kurul'da uluslararası havacılık için 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonu hedefini uzun vadeli küresel aspirasyonel hedef (LTAG) olarak kabul etmiştir (ICAO, n.d.-a). Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA) de havayollarının 2050 yılına kadar net sıfır karbona ulaşma taahhüdünü ilan etmiş; bu hedefe ulaşmada SAF'ın yaklaşık %65, yeni teknolojilerin %13, operasyonel ve altyapısal iyileştirmelerin %3, karbon dengeleme ve karbon yakalama uygulamalarının ise %19 katkı sağlayabileceğini belirtmiştir (IATA, n.d.-a). Dönüşüm süreci, literatürde “yeşil havacılık paradoksu” olarak adlandırılabilir yapısal bir gerilim üretmektedir. Bir tarafta hava taşımacılığına yönelik küresel talep artarken, diğer tarafta sektörün karbon emisyonlarını azaltması beklenmektedir. Özellikle havacılık, yüksek enerji yoğunluğu gereksinimi nedeniyle karbonsuzlaştırılması zor sektörler arasında kabul edilmektedir. Elektrikli ve hidrojen temelli teknolojiler uzun vadede önemli bir potansiyel taşısa da mevcut kısa ve orta vadeli dönüşümün ana aracı büyük ölçüde Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF) olarak görülmektedir (Staples et al., 2018; Lee et al., 2021).

SAF, mevcut uçak ve yakıt altyapısıyla uyumlu bir “drop-in” yakıt olması nedeniyle uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. Ancak IATA verileri, SAF'ın hâlen küresel jet yakıtı kullanımının %1'inden daha azını oluşturduğunu; 2025'te yaklaşık 1,9 milyon ton olan üretimin 2026'da yaklaşık 2,4 milyon tona ulaşmasının beklendiğini göstermektedir (IATA, n.d.-b). Avrupa Birliği'nde ReFuelEU Aviation düzenlemesi kapsamında 2025'ten itibaren AB havalimanlarında %2 SAF payı, 2050'de ise %70 SAF payı hedeflenmektedir (European Commission, n.d.-a). Bu düzenlemeler, çevresel hedefler açısından önemli olmakla birlikte, havayolu işletmeleri ve yolcular açısından yeni bir maliyet yapısı yaratmaktadır.

Karbonsuzlaşma maliyetlerinin en kritik etkilerinden biri, boş zaman odaklı seyahat talebi üzerinde ortaya çıkmaktadır. İş seyahatlerine kıyasla turistik ve rekreasyon amaçlı seyahatler genellikle daha yüksek fiyat duyarlılığına sahiptir. Bu nedenle SAF, karbon fiyatlandırması ve yeni teknoloji yatırımlarından doğan

maliyetlerin bilet fiyatlarına yansıtılması, özellikle turizm odaklı pazarlarda talep davranışını etkileyebilmektedir. Bu bölümün temel amacı, havacılıkta karbonsuzlaşma maliyetlerinin boş zaman seyahat talebi üzerindeki olası etkilerini literatüre dayalı kavramsal model ve varsayımsal bir rota senaryosu üzerinden değerlendirmektir.

Çalışmanın örnek uygulaması olarak İstanbul-Antalya hattının seçilmesi, başlıkta yer alan geniş “boş zaman endüstrisi” perspektifini Türkiye bağlamında somutlaştırma amacı taşımaktadır. Antalya, Türkiye’nin en güçlü turizm çekim merkezlerinden biri olup, iç hat yolculuğunda önemli bir boş zaman/turizm talebi üretmektedir. Bu nedenle İstanbul-Antalya hattı, karbonsuzlaşma maliyetlerinin fiyat duyarlılığı yüksek bir yolcu segmentinde nasıl değerlendirilebileceğini göstermek için uygun bir senaryo alanı olarak ele alınmıştır. Bu tercih, çalışmanın Türkiye genelindeki tüm havacılık talebini temsil ettiği anlamına gelmemekte; yalnızca kavramsal tartışmayı sayısal bir örnekle görünür kılmayı amaçlamaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Havacılıkta karbonsuzlaşma literatürü, büyük ölçüde teknolojik çözümler, alternatif yakıtlar, operasyonel verimlilik ve karbon fiyatlandırma araçları etrafında şekillenmektedir. Lee et al. (2021), havacılığın iklim etkisinin yalnızca CO₂ emisyonlarıyla sınırlı olmadığını; yüksek irtifa etkileri ve CO₂ dışı iklim zorlamalarının da dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu durum, sektörde yalnızca yakıt değişiminin değil, operasyonel ve talep yönlü yaklaşımların da tartışılmasını gerekli kılmaktadır.

SAF kısa ve orta vadede havacılığın karbonsuzlaşmasında en uygulanabilir araçlardan biri olarak görülmektedir. IATA (2026b), SAF’ın mevcut uçak ve havalimanı altyapısıyla kullanılabilirliğini; ancak üretim ölçeğinin yetersizliği, hammadde sınırlılıkları, yüksek yatırım ihtiyacı ve gelişmekte olan tedarik zinciri nedeniyle maliyetlerin konvansiyonel jet yakıtına göre hâlen yüksek olduğunu belirtmektedir. Bu nedenle SAF, teknik olarak uygulanabilir olsa da ekonomik sürdürülebilirlik açısından tartışmalı bir dönüşüm aracıdır.

Karbon fiyatlandırma mekanizmaları, havacılıkta çevresel maliyetlerin içselleştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. ICAO tarafından yürütülen CORSIA, sektör düzeyinde uygulanan ilk küresel piyasa temelli mekanizma olarak tanımlanmakta ve teknolojik yenilikler, operasyonel iyileştirmeler ve SAF gibi sektör içi azaltım araçlarını tamamlayıcı bir yapı sunmaktadır (ICAO, n.d.-b). Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi (EU ETS) ise 2012’den itibaren Avrupa’daki havacılık faaliyetlerini kapsamakta ve havayollarının emisyonlarını

izleme, raporlama ve karşılık olarak tahsisat teslim etme yükümlülüğünü içermektedir (European Commission, n.d.-b).

Talep tarafına ilişkin literatür, çevresel tutumlar ile gerçek satın alma davranışı arasında çoğu zaman bir boşluk bulunduğunu göstermektedir. Kollmuss ve Agyeman (2002), çevreye duyarlı tutumların tek başına çevreci davranışa dönüşmediğini; maliyet, alışkanlık, bilgi, güven ve kurumsal sorumluluk algısı gibi faktörlerin bu ilişkiyi etkilediğini belirtmektedir. Havacılık bağlamında bu durum, yolcuların çevreci uçuş seçeneklerini destekleyebilmelerine rağmen, ek ücret ödeme konusunda sınırlı davranış gösterebilmeleriyle açıklanabilir.

Ödeme istekliliği (Willingness to Pay-WTP) literatürü de bu noktada önem kazanmaktadır. Brouwer et al. (2008), yolcuların uçuş kaynaklı karbon emisyonlarını dengelemek için belirli bir ödeme istekliliği gösterebildiğini; ancak bu istekliliğin fiyat seviyesi, güven ve çevresel faydanın algılanabilirliği gibi değişkenlere bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Mair (2011) de gönüllü karbon dengeleme davranışının yalnızca çevresel tutumla değil, aynı zamanda kişisel sorumluluk algısı ve uygulamaya duyulan güvenle ilişkili olduğunu vurgulamaktadır. Bu çerçevede mevcut literatürde önemli bir boşluk bulunmaktadır: Karbonsuzlaşma maliyetleri çoğunlukla arz yönlü teknolojik ve düzenleyici araçlar üzerinden tartışılırken, bu maliyetlerin boş zaman odaklı seyahat talebi üzerindeki olası fiyat etkisi daha sınırlı ele alınmaktadır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu kavramsal/senaryo temelli bir değerlendirme ile görünür kılmaktadır.

3. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Havacılıkta karbonsuzlaşma sürecinin talep tarafındaki etkilerini açıklamak için üç temel kavram öne çıkmaktadır: yeşil havacılık paradoksu, boş zaman seyahati talep dinamikleri ve karbon maliyetlerinin fiyat mekanizması üzerinden aktarımıdır. Yeşil havacılık paradoksu, sektörün büyüme eğilimi ile net sıfır hedefleri arasındaki yapısal gerilimi ifade etmektedir. Gössling ve Humpe (2020), küresel hava taşımacılığı talebinin dağılımı ve büyüme eğilimlerinin iklim politikaları açısından önemli sonuçlar doğurduğunu göstermektedir. Bu nedenle havacılıkta sürdürülebilirlik, yalnızca teknolojik iyileştirmelerle değil, talep yapısının ve tüketici davranışlarının anlaşılmasıyla da ilişkilidir.

Boş zaman seyahati dinamikleri, özellikle fiyat duyarlılığı üzerinden açıklanabilir. Turistik seyahatler çoğu durumda isteğe bağlı tüketim niteliği taşıdığı için bilet fiyatlarında ortaya çıkan artışlar seyahat sıklığı, destinasyon tercihi veya harcama kompozisyonu üzerinde etkili olabilir. Bu nedenle karbon maliyetlerinin bilet fiyatlarına aktarımı, havayolu işletmelerinin gelir yönetimi kadar destinasyon ekonomileri açısından da önem taşımaktadır. Karbon

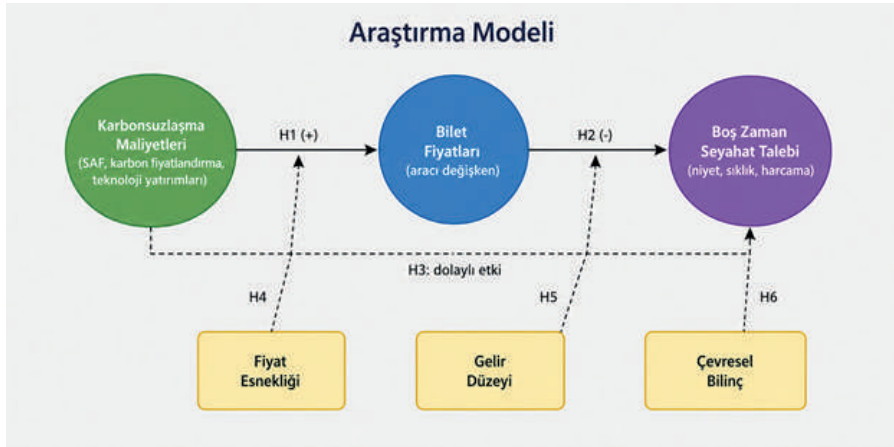
maliyetlerinin fiyat mekanizması üzerinden aktarımı ise çalışmanın temel aracı değişken ilişkisini oluşturmaktadır. SAF maliyetleri, karbon fiyatlandırma yükümlülükleri ve yeni teknoloji yatırımları havayolu işletmeleri için maliyet artışı oluşturmakta; bu artışın bir bölümü bilet fiyatlarına yansıtılabilmektedir. Bilet fiyatları ise boş zaman seyahat talebini doğrudan veya dolaylı olarak etkileyebilecek bir ara değişken niteliğindedir.

4. YÖNTEM

Ampirik bir saha araştırması yerine literatür temelli kavramsal modelleme ve senaryo temelli ekonomik değerlendirme yaklaşımına dayanmaktadır. Çalışmada anket verisi toplanmamış ve Yapısal Eşitlik Modellemesi (SEM) testi gerçekleştirilmemiştir. Bu tercih, karbonsuzlaşma maliyetleri ile boş zaman seyahat talebi arasındaki olası ilişkiyi teorik düzeyde tartışmayı amaçlamaktadır. Yöntem iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, karbonsuzlaşma maliyetleri, bilet fiyatları ve boş zaman seyahat talebi arasındaki olası ilişkiler literatür temelinde kavramsallaştırılmıştır. Modelde karbonsuzlaşma maliyetleri bağımsız değişken, bilet fiyatları aracı değişken, boş zaman seyahat talebi ise bağımlı değişken olarak ele alınmıştır. Fiyat esnekliği, gelir düzeyi ve çevresel bilinç ise ilişkinin yönünü veya şiddetini etkileyebilecek düzenleyici değişkenler olarak değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada, İstanbul-Antalya hattı üzerinden varsayımsal bir ödeme istekliliği senaryosu oluşturulmuştur. Bu senaryo gerçek yolcu anketine, gözlemsel satış verisine veya saha araştırmasına dayanmamaktadır. Senaryoda kullanılan bilet fiyatları, karbon emisyon değerleri, döviz kuru ve WTP parametresi, literatürdeki tartışmalarla uyumlu temsili varsayımlar olarak ele alınmıştır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar yolcuların fiili davranışı olarak değil, karbonsuzlaşma maliyetleri ile algılanan çevresel fayda arasındaki olası ekonomik dengeyi gösteren analitik bir örnek olarak yorumlanmalıdır.

Çalışmanın sınırlılığı, sonuçların senaryo varsayımlarına bağlı olmasıdır. Bulgular genellenebilir ampirik sonuçlar sunmamakta; buna karşılık havacılıkta yeşil dönüşüm maliyetlerinin talep tarafında nasıl tartışılabileceğine ilişkin kavramsal bir değerlendirme zemini oluşturmaktadır. Gelecek çalışmalarda aynı modelin anket verisi, ayrıık seçim deneyi veya gerçek bilet satış verisiyle test edilmesi mümkündür.



Şekil 1. Karbonsuzlaşma Maliyetleri, Bilet Fiyatları ve Boş Zaman Seyahat Talebi Arasındaki Önerilen Kavramsal/Senaryo Modeli

Kaynak: Yazarlar tarafından literatür temel alınarak oluşturulmuştur. Not: Model, literatür temelli kavramsal/senaryo çerçevesi niteliğindedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gerçek saha verisi yerine varsayımsal bir rota senaryosu üzerinden sunulan çalışmanın amacı düşük emisyonlu uçuş alternatifinin yolcu açısından algılanan ekonomik değerini bilet fiyatı primiyle karşılaştırmaktır. Bu nedenle analiz, nedensel veya genellenebilir bir yolcu davranışı sonucu olarak değil, literatür temelli bir değerlendirme örneği olarak okunmalıdır.

Tablo 1. İstanbul-Antalya Uçuş Alternatifleri İçin Varsayımsal Senaryo

Özellik	Geleneksel Uçuş (A)	Düşük Emisyonlu Uçuş (B)
Ortalama bilet fiyatı	2.500 TL	2.800 TL
Kişi başı karbon emisyonu	0,25 ton CO ₂	0,18 ton CO ₂
Çevreci sertifika / düşük emisyon iletişimi	Yok	Var

Kaynak: Yazarlar tarafından senaryo varsayımlarıyla oluşturulmuştur.

Tablo 1’de düşük emisyonlu uçuş seçeneğinin 300 TL daha yüksek fiyatlı olduğu; buna karşılık kişi başına 0,07 ton CO₂ azaltımı sağladığı varsayılmıştır. Karbon azaltımı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{CO}_2 = 0,25 - 0,18 = 0,07\text{-ton CO}_2$$

Senaryoda karbon azaltımına ilişkin temsili ödeme istekliliği 100 ABD doları/ton CO₂ olarak alınmıştır. Bu değer anket verisiyle bu bölümde yeniden ölçülmemiştir; yalnızca literatürdeki ödeme istekliliği tartışmalarına dayalı örnek parametre olarak kullanılmıştır. Buna göre düşük emisyonlu uçuşun kişi başına çevresel fayda değeri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$0,07 \text{ ton CO}_2 \times 100 \text{ ABD doları/ton CO}_2 = 7 \text{ ABD doları}$$

1 ABD doları = 40 TL varsayımı altında bu değer 280 TL'ye karşılık gelmektedir. Bu hesaplama, güncel döviz kuru tahmini değil, senaryo içi sabit varsayımdır.

Tablo 2. Varsayımsal Maliyet-Fayda Karşılaştırması

Gösterge	Değer
Bilet fiyatı primi	300 TL
Karbon azaltımının varsayımsal algılanan değeri	280 TL
Net fark	-20 TL

Kaynak: Yazarlar tarafından yapılan senaryo hesaplamasıdır.

Bu varsayımsal senaryoya göre düşük emisyonlu uçuşun çevresel fayda değeri 280 TL olarak hesaplanmakta, fiyat primi ise 300 TL olarak belirlenmektedir. Aradaki -20 TL'lik fark, düşük emisyonlu uçuş seçeneğinin yolcu açısından ekonomik olarak tamamen dengelenmediğini; ancak çevresel fayda ile fiyat primi arasında yakın bir denge bulunduğunu göstermektedir. Bu sonuç, özellikle çevresel bilinci yüksek yolcularda düşük emisyonlu uçuş tercihinin güçlenebileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, bu bulgu yolcuların gerçek davranışını temsil etmemektedir. Fiyat duyarlılığı yüksek boş zaman yolcularında 300 TL'lik ek ücretin kabulü; gelir düzeyi, seyahat zorunluluğu, destinasyon tercihi, çevresel güven, havayolu markasına duyulan güven ve alternatif ulaşım seçeneklerine bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle WTP temelli hesaplamalar, tek başına talep tahmini olarak kullanılmamalı; ampirik anketler ve ayrık seçim modelleriyle desteklenmelidir.

Kavramsal model açısından değerlendirildiğinde, karbonsuzlaşma maliyetlerinin talep üzerindeki etkisi doğrudan değil, büyük ölçüde bilet fiyatları aracılığıyla gerçekleşmektedir. Fiyat esnekliği yüksek yolcu segmentlerinde bu etkinin daha güçlü; gelir düzeyi ve çevresel bilinç yüksek segmentlerde ise daha zayıf olabileceği değerlendirilmektedir. Dolayısıyla havayolu işletmeleri için sürdürülebilirlik iletişiminin yalnızca “yeşil imaj” üzerinden değil, ölçülebilir karbon azaltımı, şeffaf sertifikasyon ve güvenilir fiyatlandırma üzerinden kurulması önem taşımaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Havacılıkta karbonsuzlaşma maliyetlerinin boş zaman odaklı seyahat talebi üzerindeki olası etkilerini kavramsal ve varsayımsal bir senaryo çerçevesinde incelemiştir. Değerlendirme, SAF, karbon fiyatlandırması ve yeni teknoloji yatırımlarının havayolu maliyet yapısını dönüştürdüğünü; bu maliyetlerin bilet fiyatları aracılığıyla özellikle fiyat duyarlılığı yüksek turizm pazarlarında talep üzerinde baskı oluşturabileceğini ortaya koymaktadır. Elde edilen değerlendirme, düşük emisyonlu uçuş seçeneklerinin yolcular açısından belirli bir çevresel değer üretebileceğini; ancak bu değerın fiyat primini her durumda karşılamayabileceğini göstermektedir. Bu nedenle karbonsuzlaşma maliyetlerinin tümüyle yolcuya yansıtılması, özellikle boş zaman ve turizm odaklı pazarlarda talep daralması riski doğurabilir. Bu risk, fiyat duyarlılığı yüksek destinasyonlarda daha belirgin hale gelebilir.

Politika düzeyinde, SAF ve karbon fiyatlandırması gibi araçların yalnızca zorunluluk mantığıyla değil, maliyet dengeleyici teşvikler, arz ölçeklendirme politikaları ve şeffaf sertifikasyon mekanizmalarıyla birlikte ele alınması gerekmektedir. IATA'nın net sıfır yol haritasında SAF'ın yüksek paya sahip olması, bu yakıtın stratejik önemini göstermektedir; ancak mevcut üretim düzeyinin hâlen sınırlı olması, kamu-özel sektör iş birliğini zorunlu kılmaktadır. Havayolu işletmeleri açısından öneri, düşük emisyonlu uçuş ürünlerinin yalnızca ek ücretli çevreci seçenekler olarak değil, ölçülebilir karbon azaltımı, güvenilir sertifika, rota bazlı emisyon bilgisi ve şeffaf fiyatlandırma ile desteklenen bütüncül bir değer önerisi olarak sunulmasıdır. Turizm destinasyonları açısından ise sürdürülebilir ulaşım maliyetlerinin destinasyon rekabetçiliği üzerindeki etkisi izlenmeli; özellikle Antalya gibi boş zaman talebinin yoğun olduğu pazarlarda fiyat, çevresel değer ve destinasyon harcaması birlikte değerlendirilmelidir. Gelecek araştırmalarda bu kavramsal modelin anket verisi, ayrık seçim deneyi veya gerçek bilet satış verileriyle test edilmesi önerilmektedir. Böylece yolcuların çevresel faydaya yönelik ifade ettikleri ödeme istekliliği ile gerçek satın alma davranışları arasındaki fark daha güvenilir biçimde analiz edilebilir.

Kaynakça

- Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50(2), 179-211. [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T)
- Bows-Larkin, A. (2015). All adrift: Aviation, shipping, and climate change policy. *Climate Policy*, 15(6), 681-702. <https://doi.org/10.1080/14693062.2014.965125>
- Brouwer, R., Brander, L., & Van Beukering, P. (2008). A convenient truth: Air travel passengers' willingness to pay to offset their CO₂ emissions. *Climatic Change*, 90, 299-313. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9417-0>
- European Commission. (n.d.-a). ReFuelEU aviation. Retrieved June 20, 2026, from https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueeu-aviation_en
- European Commission. (n.d.-b). Reducing emissions from aviation. Retrieved June 20, 2026, from https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-aviation_en
- Gössling, S., & Humpe, A. (2020). The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change. *Global Environmental Change*, 65, 102194. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102194>
- Gössling, S., Scott, D., & Hall, C. M. (2018). Global trends in length of stay: Implications for destination management and climate change. *Journal of Sustainable Tourism*, 26(12), 2087-2101.
- Higham, J., Cohen, S. A., Cavaliere, C. T., Reis, A., & Finkler, W. (2016). Climate change, tourist air travel and radical emissions reduction. *Journal of Cleaner Production*, 111, 336-347.
- International Air Transport Association. (n.d.-a). Fly Net Zero. Retrieved June 20, 2026, from <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/flynetzero/>
- International Air Transport Association. (n.d.-b). Sustainable Aviation Fuel (SAF). Retrieved June 20, 2026, from <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/sustainable-aviation-fuel-saf/>
- International Civil Aviation Organization. (n.d.-a). Long-term global aspirational goal (LTAG) for international aviation. Retrieved June 20, 2026, from <https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG>
- International Civil Aviation Organization. (n.d.-b). Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSA). Retrieved June 20, 2026, from <https://www.icao.int/CORSA>
- Kollmuss, A., & Agyeman, J. (2002). Mind the gap: Why do people act environmentally and what are the barriers to pro-environmental behavior? *Environmental Education Research*, 8(3), 239-260. <https://doi.org/10.1080/13504620220145401>

- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., ... & Wilcox, L. J. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
- Mair, J. (2011). Exploring air travellers' voluntary carbon-offsetting behaviour. *Journal of Sustainable Tourism*, 19(2), 215-230.
- Scheelhaase, J., Maertens, S., Grimme, W., & Jung, M. (2018). EU ETS versus CORSIA: A critical assessment of two approaches to limit air transport's CO₂ emissions by market-based measures. *Journal of Air Transport Management*, 67, 55-62.
- Staples, M. D., Malina, R., Suresh, P., Hileman, J. I., & Barrett, S. R. H. (2018). Aviation CO₂ emissions reductions from the use of alternative jet fuels. *Energy Policy*, 114, 342-354. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.007>

Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF) Kullanımının Havayolu İş Modellerine Etkisinin Swot Analizi İle Değerlendirilmesi

Gözde Güven¹

Özet

Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF) kullanımının mevcut uçak ve yakıt altyapısıyla uyumlu olması ve yaşam döngüsü emisyonlarını azaltma potansiyeli nedeniyle havacılığın kısa ve orta vadeli karbonsuzlaşma seçenekleri arasında öne çıkmaktadır. Yüksek üretim maliyeti, sınırlı arz, hammadde rekabeti ve bölgesel tedarik farklılıkları SAF adaptasyonunun her havayolu iş modelinde aynı sonuçları üretmesini engellemektedir. SAF kullanımının farklı havayolu iş modelleri üzerindeki stratejik etkileri doküman incelemesine dayalı nitel bir SWOT analizi benimsenmiştir. Çalışmada literatür, uluslararası havacılık kuruluşlarının raporları ve düzenleyici çerçeveler üzerinden elde edilen bulgular tam hizmet, düşük maliyetli, tarifersiz/charter ve bölgesel havayolu iş modellerine göre değerlendirilmiştir. Tam hizmet veren havayollarının marka değeri, kurumsal müşteri portföyü ve yeşil finansmana erişim bakımından görece avantajlı olduğunu; düşük maliyetli havayollarının ise maliyet liderliği stratejisi nedeniyle SAF fiyat artışlarına daha hassas olduğunu göstermektedir. Charter ve bölgesel havayollarında talep yapısı, filo ölçeği, rota özellikleri ve SAF tedarik erişimi belirleyici unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

1. GİRİŞ

Havacılık sektörü, küresel ekonomik büyüme ve uluslararasılaşma açısından stratejik öneme sahip olmakla birlikte, fosil yakıtlara bağımlı yapısı nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik tartışmalarının da merkezinde yer almaktadır. Artan hava taşımacılığı talebi ve iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında

1 Bağımsız Araştırmacı, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Kamu Politikası ve İşletmeciliği Ana Bilim Dalı, gozdegüvenn0@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1771-1186>

benimsenen net sıfır emisyon hedefleri, sektörün enerji kaynaklarını yeniden değerlendirmesini gerekli kılmaktadır. Fayda maliyet açısından yüksek, güvenli ve temiz enerjiye erişim günümüzün temel zorluklarından biri olup, özellikle ulaşım sektöründe alternatif enerji çözümlerine yönelik arayışlar giderek hız kazanmaktadır (Alpman ve Göğüş, 2017). Bu kapsamda, hava ve kara taşımacılığında sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı önem kazanmakta; havacılık sektörünün yakıt ihtiyacını karşılayabilecek yerli, erişilebilir ve sürdürülebilir kaynaklara duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır (Lee et al., 2021).

Havacılık sektöründe kullanılan yakıtların yüksek enerji yoğunluğuna, iyi akış özelliklerine ve termal kararlılığa sahip olması gerekmektedir (ASTM, 2022; ICAO, 2023). Bu teknik gereklilikleri karşılayan yakıtların aynı zamanda gıda üretimiyle rekabet etmemesi, ekosistem üzerinde olumsuz etki yaratmaması ve ormansızlaşma gibi arazi kullanım değişikliklerine yol açmaması beklenmektedir (IPCC, 2022; FAO, 2021). Bu bağlamda, sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF), yaşam döngüsü boyunca düşük veya nötr karbon emisyonu sağlama potansiyeli nedeniyle öne çıkmaktadır (IEA, 2023; IATA, 2025). Bununla birlikte, SAF üretiminde kullanılan biyokütle ve atık temelli hammaddelerin çeşitliliği, yakıt tedarik zincirinin esnekliğini artırmakta ve alternatif yakıt seçeneklerinin yaygınlaşmasına katkı sağlamaktadır (Staples et al., 2018). Ancak bu süreçte ekonomik sürdürülebilirlik ve üretim maliyetleri sınırlayıcı faktörler olarak öne çıkmaktadır.

Havacılıkta SAF kullanımının etkinliği yalnızca teknik kapasiteye değil, aynı zamanda havayolu iş modellerinin yapısal özelliklerine de bağlıdır. Rekabetin yoğun olduğu havayolu piyasasında iş modelleri; hedef müşteri kitlesi ve operasyonel yapı açısından farklılaşmakta, bu durum SAF adaptasyon süreçlerini de etkilemektedir (Gössling ve Humpe, 2020; Abate et al., 2020). Bu nedenle, özellikle yüksek rekabet baskısı altında faaliyet gösteren havayolu iş modellerinde SAF kullanımının stratejik önemi daha da artmaktadır. SAF kullanımının havayolu iş modelleri üzerindeki etkilerini stratejik bir bakış açısıyla inceleyen ve bu etkileri SWOT analizi çerçevesinde değerlendiren çalışmada, SAF'ın havayolu işletmelerine yansımalarını ortaya koymayı hedeflemektedir. Bu kapsamda SAF adaptasyonunu tek bir genel sektör değerlendirmesi yerine tam hizmet, düşük maliyetli, tarifersiz/charter ve bölgesel havayolu iş modelleri açısından ayrı ayrı ele alınmıştır. SAF'ın maliyet, tedarik, regülasyon, marka konumlandırması ve operasyonel esneklik üzerindeki etkilerinin iş modeli özelliklerine göre nasıl farklılaştığını daha görünür kılmaktadır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF)

Küreselleşme enerji talebinde yapısal ve sürekli bir artışı beraberinde getirmektedir. İktisadi yapı ve sanayileşmedeki her %1'lik artışın, toplam enerji tüketiminde ortalama %1,7'lik bir yükselişe yol açması, mevcut büyüme dinamiklerinin enerji yoğun üretimi açıkça ortaya koymaktadır. Bu durum, sürdürülebilir alternatiflerin yeterince yaygınlaşmadığı koşullarda, fosil yakıt bağımlılığını azaltmak yerine pekiştirme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, uzun vadeli karbonsuzlaştırma hedeflerine ulaşılabilmesi, yalnızca enerji arzının değil, aynı zamanda eğitim, sanayi ve teknoloji sistemlerinin de dönüşümünü içeren bütüncül bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması, enerji verimliliğinin artırılması ve temiz teknoloji inovasyonlarının desteklenmesi kritik öneme sahiptir. Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF) teknolojileri, yapısal dönüşüm süreçlerinin azaltılması zor olan sektörlerinden biri olan havacılıkta, küresel enerji-emisyon dengesizliğine hem teknik hem de stratejik bir yanıt olarak öne çıkmaktadır (Yılmaz ve Atmanlı,2017).

Havacılık sektörü, artan küresel hareketlilik, ticaret ve turizm faaliyetleri doğrultusunda yıllık yaklaşık %4,5 oranında büyüme eğilimi göstermektedir. Bu büyüme; istihdam yaratma, uluslararası ticaretin kolaylaştırılması, kültürel etkileşim ve afet müdahalesi gibi önemli sosyoekonomik faydalar sağlasa da sektörün küresel sera gazı emisyonlarındaki payının yaklaşık %5 seviyesinde olması, karbonsuzlaştırma gerekliliğini kritik bir öncelik haline getirmektedir. Bununla birlikte, havacılıkta kullanılan yakıtların yüksek enerji yoğunluğu gereksinimi, alternatif enerji çözümlerinin uygulanabilirliğini sınırlandırmakta ve sektörü büyük ölçüde sıvı hidrokarbonlara bağımlı kılmaktadır. Yakıt fiyatlarındaki değişkenlik ve hava trafiğindeki artış da bu bağımlılığı daha da stratejik bir sorun haline getirmektedir. Bu çerçevede, sektörün artan enerji talebini karşılayabilen ve aynı zamanda çevresel etkileri azaltabilen çözümlere yönelmesi kaçınılmazdır. Bu noktada SAF, mevcut uçak ve yakıt altyapısıyla uyumlu olması sayesinde, kısa ve orta vadede uygulanabilir en önemli karbonsuzlaştırma araçlarından biri olarak değerlendirilmektedir (Wang, Zhao ve Zhao, 2024).

SAF'lar, günümüzde ticari havacılıkta kullanılan sıvı yakıtlardır ve CO₂ emisyonlarını %80'e kadar azaltabilme potansiyeline sahiptir. SAF'lar, fosil bazlı jet yakıtlarıyla aynı hidrokarbonları içerdiğinden, egzoz (yanma) emisyonları benzer özellik göstermektedir. Ancak temel fark, bu hidrokarbonların daha sürdürülebilir kaynaklardan elde edilmesidir. SAF, atık yağlar ve gresler, belediye

katı atıkları, tarımsal ve ormancılık kalıntıları, ıslak atıklar ve marjinal arazilerde yetiştirilen gıda dışı bitkiler gibi çeşitli hammaddelerden üretilmektedir. Ayrıca, doğrudan havadan karbon yakalama süreçleri kullanılarak sentetik olarak da üretilmektedir (IATA,2025).

Fosil yakıtlar, daha önce yer altında depolanmış karbonu atmosfere salarak toplam CO₂ seviyesini artırırken, SAF'lar döngüsel bir yapı sergileyerek karbonu yeniden kullanır. Bu kapsamda, SAF üretiminde kullanılan biyokütle, yaşam döngüsü boyunca CO₂'yi absorbe eder ve böylece karbonun atmosfere net katkısı azaltılmış olur. Bu kapsamda SAF, biyokütle, organik atık veya havadan doğrudan CO₂ yakalama yoluyla üretilen yenilenebilir sıvı yakıtları ifade etmektedir. Sürdürülebilirlik kriterlerini karşılayan sentetik yakıt veya biyoyakıt, jet yakıtının yerine kullanılabilen ikameleri olmaktadır. Yakıtın SAF olarak kabul edilmesi için çeşitli sürdürülebilirlik kriterleri bulunmaktadır. Bu kriterleri şu şekilde sıralamak mümkündür (IATA,2025):

- Yaşam döngüsü boyunca sera gazı ve karbon ayak izi emisyonlarının azaltılması,
- Hammaddelerin gıda üretimiyle rekabet etmemeli,
- Biyolojik çeşitliliğin korunması,
- Su ve toprak kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi gibi çevresel kriterler de SAF üretiminin temel belirleyicileri arasında yer almaktadır.

SAF üretiminde kullanılan Fischer-Tropsch (FT), hidroişlem görmüş esterler ve yağ asitleri, sentezlenmiş izoparafinik yakıt ve Alkolden Jete dönüşüm gibi farklı teknolojik yollar, hammadde türüne ve üretim koşullarına bağlı olarak çeşitli avantaj ve sınırlılıklar sunmaktadır. Örneğin, HEFA süreci ekonomik açıdan daha avantajlı bir seçenek olarak öne çıkarken, diğer bazı yöntemlere kıyasla nispeten daha yüksek yaşam döngüsü emisyonlarına sahip olabilmektedir. Bu nedenle, SAF üretiminde tek bir optimal yöntemden söz etmek mümkün olmayıp, bölgesel kaynaklar, teknolojik altyapı ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda çoklu üretim yollarının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Watson, Machado, Da Silva, Salter, Riberio, Nascimento ve Dowling, 2024).

Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF)'ın gerçekten "sürdürülebilir" olarak değerlendirilebilmesi, yalnızca sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeline değil, aynı zamanda üretim süreçlerinin çevresel, sosyal ve ekonomik etkilerine de bağlıdır. Bu kapsamda, Roundtable on Sustainable Biomaterials tarafından geliştirilen ilkeler ve kriterler, SAF üretiminin sürdürülebilirliğini değerlendirmede uluslararası kabul görmüş bir çerçeve sunmaktadır (IATA,2025).

Tablo. 1 RSB İlkeleri

Kategori	Kriterler
Hukuki	Yasal uygunluk
	Arazi hakları
Sosyal	İnsan ve işçi hakları
	Kırsal ve sosyal kalkınma
	Yerel gıda güvenliği
Çevresel	Sera gazı emisyonları
	Biyolojik çeşitliliğin korunması
	Toprak
	Su ve su hakları
	Hava
Yönetim ve Teknik	Planlama, izleme ve sürekli iyileştirme
	Teknoloji kullanımı, girdiler ve atık yönetimi

Kaynak: IATA (2025), Sustainable Aviation Fuel Roadmap Report

RSB ilkeleri, SAF'ın yalnızca alternatif bir yakıt olmasının ötesinde, sürdürülebilir bir enerji dönüşüm aracı olarak değerlendirilmesinde kritik bir referans noktası oluşturmaktadır.

2.2. SAF Üretiminde Kullanılan Hammaddeler

SAF üretim sürecinde amaç, kerosen bazlı havacılık yakıtının ana bileşeni olan sentetik parafinik (petrolden elde edilen mineral yağ) kerosen (SPK) elde etmektir. SPK'dan üretilen yakıtın aromatikler ve halkalı zincirli alkanlardan yoksun olması sebebiyle geleneksel kerosen bazlı havacılık yakıtı ile harmanlanması gerekmektedir. Buna rağmen, SAF karbon emisyonlarının azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunur ve yaşam döngüsü sera gazı emisyonları geleneksel havacılık yakıtı emisyonlarına göre daha düşüktür (Wang vd., 2024). Hammadde seçimi kökenine ve özelliklerine bağlı olarak SAF kategorisinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Potansiyel hammaddenin sahip olması gereken bazı temel özellikleri şu şekilde sıralamak mümkündür (Bonicontró et al., 2025):

- Hammaddenin bulunabilirliği,
- Gıda üretimini etkilememesi,
- Optimal düzeyde çevresel ayak izidir.

SAF üretiminde kullanılan hammadde kaynakları birinci, ikinci ve üçüncü nesil olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadır. Bu hammadde kaynaklarını şu şekilde ele almak mümkündür (Lau vd., 2024):

- Birinci Nesil; Yenilebilir bitkisel yağlar gibi birinci nesil hammaddeler, SAF gelişiminin erken aşamalarında çok önemli olmuş ve havacılık endüstrisinin fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltmaya yönelik ilk yolu sunmuştur. Birinci nesil lipid hammaddeleri, C8 ila C18 karbon zincirleri arasında değişen yağ asitleri içermektedir. Genellikle izomerik formda bulunan hem doymuş hem de doymamış yağ asidi bağlarını kapsamaktadır. Bu hammaddelerdeki yağ asidi bileşimi, zincir uzunluğu ve doymamışlık derecesi de dahil olmak üzere, hidroişlem ile ürün verimini ile seçiciliğini verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Lipit hammaddelerinin karbon zincir uzunluğu, ortaya çıkan HC'lerin ve SAF'ın özelliklerini de önemli ölçüde etkiler. Bu daha düşük yakıt donma noktası, sıcaklıkların önemli ölçüde düşebildiği yüksek rakımlarda yaşanan soğuk koşullar altında yakıtın akışkan ve kararlı kalmasını sağlamak için gereklidir. Daha yüksek donma noktalarına sahip yakıtlar, yakıt hatlarını tıkayabilen, yakıt akışını bozabilen ve ciddi bir motor arızası riski oluşturabilen katılaşmaya veya mum kristali oluşumuna daha yatkındır.
- İkinci Nesil; ikinci nesil lipid hammaddeleri, bitkilerden elde edilen yenilebilir olmayan yağları, kullanılmış yemeklik yağı (UCO) ve endüstriyel atık akışlarından geri kazanılan yağı kapsamaktadır. Bu hammaddeler, gıda ürünleriyle rekabet etmedikleri için sürdürülebilirlik ve karbon ayak izi azaltımı açısından önemli avantajlar sunarak kritik "gıda mı yakıt mı" ikilemini çözmektedir. UCO, en çok araştırılan ikinci nesil lipid hammaddelerinden biridir. Farklı bölgelerde tercih edilen yemeklik yağ türlerinden büyük ölçüde etkilenmektedir. Örneğin, özellikle palmiye yağının yaygın olarak üretildiği ve yemek pişirmek için kullanıldığı Güneydoğu Asya'da, özellikle Malezya ve Endonezya'da, toplanan UCO tipik olarak yüksek miktarda palmitik asit ve oleik asit içermektedir. Yenilebilir olmayan bitkisel yağların SAF için kullanımı, yenilenebilir doğaları, yüksek lipid içerikleri ve geleneksel jet yakıtlarına benzer özelliklere sahip HC'ler üretme yetenekleri nedeniyle SAF üretimi, geleneksel ikinci nesil hammaddelerin ötesine geçerek önemli avantajlar sunmaktadır.
- Üçüncü Nesil; üçüncü nesil hammaddeler, özellikle mikroalgler, SAF üretimi için potansiyel bir lipid hammaddesi kaynağı olarak önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Mikroalgler, yüksek lipid içeriği, hızlı

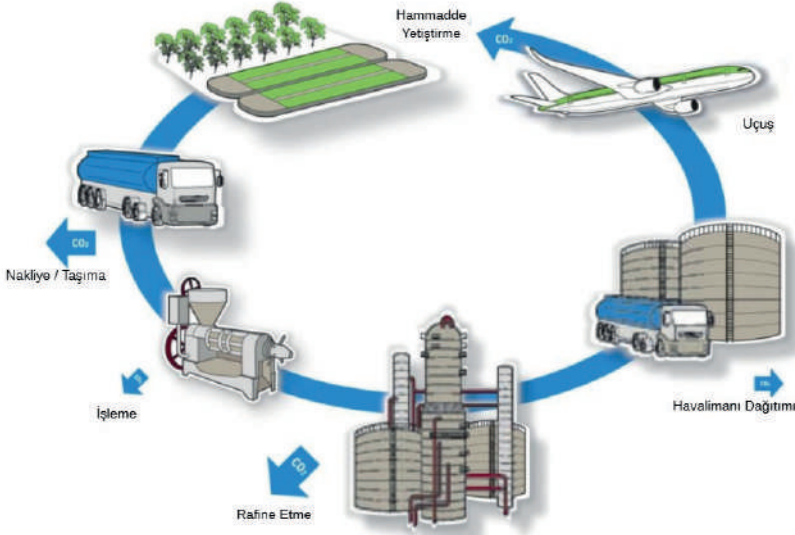
büyüme ve tarıma elverişli olmayan arazilerde gelişebilme yeteneği gibi çeşitli avantajlar sunarak gıda ürünleriyle rekabeti en aza indirmektedir. Bazı mikroalgler, geleneksel lipit kaynaklarında nispeten nadir bulunan pentadekanoik asit ve heptadekanoik asit gibi az miktarda tek zincirli yağ asidi (OCFA) üretir. OCFA'ların oksidatif stabiliteyi ve yanma özelliklerini iyileştirdiği ve böylece daha verimli ve daha temiz yanan biyoyakıtların üretimine katkıda bulunduğu bildirilmiştir. Bunun yanı sıra bazı mikroalg türleri, düz zincirli muadillerine kıyasla biyoyakıtların çeşitli kritik özelliklerini iyileştirdiği bilinen izo- ve anteizo-yağ asitleri de dahil olmak üzere dallı zincirli yağ asitleri (BCFA) üretmektedir. Özellikle BCFA'lar oksidatif stabiliteyi ve soğuk akış özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra daha yüksek oktan değerleri ve daha düşük bulanıklık noktaları sunar; bu da özellikle jet motoru uygulamaları için avantajlıdır. BCFA esterlerinin biyodizel ile karıştırılmasının motor performansını iyileştirdiği ve egzoz emisyonlarında, özellikle azot oksitlerde (NO_x) ile karbon oksitlerde (CO_x) azalmaya yol açtığı bildirilmiştir. Bu yağ, yüksek yağ verimi ve düşük donma noktası nedeniyle soğuk koşullar altında yakıt kalitesini korumak için havacılık alanında avantaj sağlamaktadır.

Tablo.2 SAF Üretiminde Kullanılan Hammaddeler

Birinci Nesil	İkinci Nesil	Üçüncü Nesil
Palm Yağı	Kullanılmış kızartma yağları	Chlorella Vulgaris
Hindistan Cevizi Yağı	Jatropha curcas yağı	Nannochloropsis
Soya Yağı	Ricinus communis yağ	Botryococcus Braunii
Kolza Yağı	Brassica carinata	Scenedesmus
Hurma Çekirdeği Yağı	Tarımsal atıklar	Schizochytrium

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Biyoyakıt üretiminde kullanılan hammaddeler, teknolojinin gelişimine paralel olarak çeşitlenmiş ve daha sürdürülebilir kaynaklara yönelmiştir. SAF üretiminde kullanılan hammaddeler geleneksel fosil yakıtların aksine, burada yakıt yanarken çıkan karbon, yakıtın hammaddesi olan bitkiler tarafından tekrar emildiği için atmosfere sera gazı ve karbon ayak izi emisyonu salınmamış (net sifıra yakın) kabul edilir (Yaşar ve Onat,2025).



Şekil.1 SAF Yaşam Döngüsü

Kaynak: Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM). (2025). *Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF) HAP Bilgi Notu*.

SAF üretim sürecinde; tarımsal faaliyetler, hammaddelerin taşınması ve yakıtın rafinasyonu gibi aşamalardan kaynaklanan emisyonlar da ortaya çıkmaktadır. Bu unsurlar hesaba katıldığında dahi, SAF kullanımının fosil yakıtlara kıyasla toplam yaşam döngüsü CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı ve bazı durumlarda bu azalmanın %80'e kadar ulaşabildiği gösterilmektedir. Fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında, sürdürülebilir şekilde üretilmiş alternatif jet yakıtları, yaşam döngüsü boyunca karbondioksit (CO₂) emisyonlarında önemli ölçüde azalma sağlamaktadır. Biyokütlenin büyüme sürecinde bitkiler tarafından emilen CO₂ miktarı, yakıtın yanma sırasında atmosfere saldırdığı CO₂ miktarına yaklaşık olarak eşdeğerdir. Bu durum, SAF'ın yaşam döngüsü perspektifinde yaklaşık karbon-nötr bir özellik sergilemesine olanak tanımaktadır (IATA,2025).

Ayrıca SAF, daha düşük kükürt ve diğer safsızlıkları içerdiğinden, kükürt dioksit (SO₂) ve partikül madde emisyonlarında da mevcut teknolojilere kıyasla ilave azalmalar sağlamaktadır. Özellikle belediye atıklarından üretilen SAF söz konusu olduğunda, çevresel kazanımlar yalnızca fosil yakıt kullanımının önlenmesinden değil, aynı zamanda bu atıkların düzenli depolama alanlarında ayrışarak herhangi bir fayda üretmeden çevreye zarar vermesinin engellenmesinden de kaynaklanmaktadır. Bu sayede, atıkların

enerjiye dönüştürülmesi yoluyla hem kaynak verimliliği artırılmakta hem de havacılık sektörünün karbon ayak izi azaltılmaktadır. Her ne kadar hazır yakıtların bileşimi geleneksel yakıtlara benzer olsa da istenen performansı elde etmek için hazır yakıtlar geleneksel yakıtlarla karıştırılmalıdır. Yakıttaki aromatik içeriğinin yanma sırasında partikül madde (PM) emisyonlarının bir göstergesi olduğunu ve daha düşük aromatik konsantrasyonunun daha düşük PM emisyonlarına yol açacağını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, aromatik içeriği motor uyumluluğunda birincil bir faktördür; bu nedenle, alternatif yakıtlar her zaman ticari yakıtlarla karıştırılır. Hazır yakıtlar, petrol benzini, dizel veya jet yakıtına benzer özelliklere ve standartlara sahip olmalıdır. Üretimin hammaddesi, hazır yakıtların bileşimini belirleyecektir. Jet yakıtının bileşimini, uçuculuğunu, akışkanlığını, yoğunluğunu ve diğer özelliklerini de belirlemiştir (Mariyam, Alherbawi, McKay ve Al-Ansari, 2026).

2.3. Küresel SAF Regülasyonları ve Politikalar

Havayolu şirketleri, 2021 yılında gerçekleştirilen 77th International Air Transport Association Annual General Meeting kapsamında 2050 yılına kadar net sıfır karbon dioksit (CO₂) emisyonuna ulaşma taahhüdünde bulunmuştur. Bunu takiben, International Civil Aviation Organization üye devletleri de 2022 yılında havacılıktan kaynaklanan CO₂ emisyonlarının 2050 yılına kadar net sifira indirilmesini hedefleyen uzun vadeli bir aspirasyonel hedef (LTAG) üzerinde uzlaşmıştır. Bu taahhütler, sektörün ve genel olarak bağlantısallığın ekonomik kalkınma açısından vazgeçilmez olduğu yönündeki güçlü kanaatten kaynaklanmaktadır. Hava taşımacılığı, United Nations Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'nın 17 hedefinden 15'ine doğrudan katkı sağlamakta olup, özellikle "Yoksulluğa Son" hedefi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, sürdürülebilirliğin sağlanması için 2050 yılına kadar sektörün öngörülen trafik hacmi, geleneksel jet yakıtı kullanılması durumunda yaklaşık 1,8 milyar ton karbon emisyonu üretebilecektir. Net sıfır emisyon hedefine ulaşılabilmesi için toplam emisyon azaltımının yaklaşık %65'inin Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF) kullanımıyla sağlanması beklenmektedir. Bu ise 2050 yılı itibarıyla yıllık 360 milyon tonun (yaklaşık 450 milyar litre) üzerinde SAF üretimini gerektirmekte olup, tüm sürdürülebilir hammadde kaynaklarının etkin biçimde değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır (IATA,2026a).

Havayollarının ve sektör paydaşlarının 2050 yılına kadar net sıfır CO₂ emisyonuna ulaşma hedefi, yalnızca hava taşımacılığı sektörünü ilgilendiren bir konu olarak değerlendirilmemelidir. Havacılığın enerji dönüşümü, küresel enerji dönüşümünün ve Paris Anlaşması kapsamında küresel sıcaklık artışını sınırlandırmaya yönelik uluslararası çabaların ayrılmaz bir parçasını oluşturmaktadır. Bu doğrultuda hazırlanan politika yol haritaları, stratejik

politika sıralamasının önemine dikkat çekerken, havacılık sektörü dışındaki paydaşları da kapsayan geniş kapsamlı bir uluslararası iş birliğinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, gelecekte oluşacak küresel Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF) pazarına tüm ülkelerin katılımını sağlayabilecek tek tip bir politika yaklaşımının bulunmadığı ve ülkelerin kendi koşullarına uygun çözümler geliştirmesi gerektiği kabul edilmektedir (IATA,2026b).

SAF'ın ticari ölçekte üretimini ve kullanımının hızlandırılması için etkili politika araçlarının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, arz yönlü teşvikler en etkili politika araçları arasında görülmekte ve kamu kaynaklarının çeşitli destek mekanizmaları aracılığıyla SAF üretimine yönlendirilmesini içermektedir. Söz konusu teşvikler, yatırım ve proje risklerini azaltırken SAF üretimini fırsat maliyetini düşürmekte, böylece arz ve talebin doğal biçimde gelişebileceği sürdürülebilir bir pazar yapısının oluşmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, Uzun Vadeli Küresel Hedefin (LTAG) kabul edilmesiyle birlikte hükümetler, havacılık sektörünün karbonsuzlaştırılması konusunda ortak bir hedef etrafında birleşmiş ve SAF kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik ortak bir çıkar geliştirmiştir. Bu nedenle, SAF üretimi ve kullanımını destekleyecek kapsamlı politika ve teşvik mekanizmalarının oluşturulması kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır (IATA,2026c).

Benzer şekilde, ICAO tarafından yürütülen CAAF/3 süreci kapsamında hükümetler, 2030 yılına kadar SAF kullanımı yoluyla havacılık kaynaklı emisyonlarda %5 oranında azalma sağlama hedefi üzerinde uzlaşmıştır (ICAO, 2023). Bu hedef, küresel ölçekte SAF kullanımını destekleyen somut politikaların geliştirilmesi gerektiğine yönelik güçlü bir mesaj niteliği taşımaktadır. Bununla birlikte, havayollarına belirli miktarda SAF kullanma zorunluluğu getiren düzenlemeler, özellikle maliyetleri dengeleyici teşvik mekanizmalarıyla desteklenmediği sürece, sektör tarafından her zaman olumlu karşılanmamaktadır. Nitekim IATA, zorunlu kullanım uygulamalarının tek başına en uygun ekonomik sonucu üretmediğini, çoğu durumda maliyet ve fiyat artışlarına yol açarak çevresel yatırımlara aktarılacak kaynakları sınırlandırdığını belirtmektedir (IATA, 2025). SAF politikalarının uygulanmasında bölgesel farklılıklar da dikkat çekmektedir. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri ile Avrupa Birliği, SAF kullanımının teşvik edilmesi ve yaygınlaştırılması konusunda farklı politika araçları ve düzenleyici yaklaşımlar benimsemektedir. Bu yaklaşımlarla hedefe ulaşılması için yalnızca havacılık sektörü aktörlerinin çabalarıyla mümkün olmayıp, aynı zamanda kamu otoriteleri ve değer zincirindeki tüm paydaşların koordineli desteğini gerektirmektedir. Özellikle devlet politikalarının, SAF üretimini ölçeklendirilmesini teşvik edecek düzenleyici ve finansal mekanizmaları içerecek şekilde tasarlanması

kritik öneme sahiptir (IATA, 2025; European Commission, 2023; U.S. DOE, 2023).

2.4. Havayolu İş Modelleri

İş modelleri, bir işletmenin nasıl değer yarattığını, sunduğunu ve bu değerden nasıl fayda sağladığını açıklayan yapılar olarak tanımlanmaktadır (Tece, 2010) Özellikle karmaşık ve sürekli değişen pazarlarda rekabet avantajını sürdürmeye çalışan yöneticiler için iş modelleri kritik bir öneme sahiptir (Markides & Charitou, 2004). İş modelleri, tüketici tercihleri, işlem maliyetleri, üretici ve tüketiciler arasındaki farklılıklar ile rekabetin bulunduğu piyasa ekonomilerinin temel unsurlarından biridir. Rekabetçi piyasalarda faaliyet gösteren ve kâr amacı güden işletmeler, tüketicilerin farklı ihtiyaç ve beklentilerini karşılayabilmek için sürekli olarak yeni değer önerileri geliştirip sunmaya çalışmaktadır. İş modelleri çoğu zaman, teknolojik yeniliklerin ortaya çıkardığı fırsatlardan doğmakta; bu yenilikler hem yeni buluşların pazara sunulmasını hem de daha önce karşılanmamış müşteri ihtiyaçlarının giderilmesini mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, yeni iş modelleri yalnızca yeniliklerin sonucu değil, aynı zamanda başlı başına bir yenilik türü olarak da değerlendirilebilir. İşletmeler için çok sayıda iş modeli alternatifi bulunmakta olup, bazı modeller belirli müşteri ihtiyaçlarına ve iş çevrelerine diğerlerinden daha iyi uyum sağlamaktadır. Bu nedenle uygun iş modelinin seçilmesi, geliştirilmesi ve sürekli iyileştirilmesi karmaşık ve dinamik bir süreçtir. Etkili iş modeli tasarımları büyük ölçüde içinde bulunulan koşullara bağlıdır ve çoğu zaman tekrar eden değerlendirme ve geliştirme aşamalarını içerir. Tarihsel deneyimler de göstermektedir ki yeni iş modelleri hem yeniliğin ortaya çıkmasını kolaylaştırmakta hem de yeniliğin kendisini temsil etmektedir (Tece, 2010). İş modellerinin işletmelerin rekabet avantajı elde etmesi ve sürdürmesindeki kritik rolü, yoğun rekabetin ve değişen müşteri beklentilerinin hâkim olduğu havacılık sektöründe daha da belirgin hale gelmektedir. Bu nedenle havayolu işletmeleri, farklı pazar segmentlerine hitap edebilmek ve sürdürülebilir bir rekabet avantajı sağlayabilmek amacıyla çeşitli iş modelleri geliştirmiştir. Bu kapsamda havayolu iş modellerini şu şekilde ele almak mümkündür:

- Geleneksel Havayolları: Tam hizmet sunan havayolu ya da ağ taşıyıcısı olarak da adlandırılan bu havayolları, geniş coğrafi bir alanda genellikle merkez-uydu ağ yapılanması ile ulusal, uluslararası ve küresel pazarlarda hizmet vermektedir. Bu havayolları farklı sınıflarda hizmet sunmakta ve oldukça karmaşık hizmet tasarımlarına sahiptirler. Bağlantılı ve uzun uçuşlar, büyük ve karmaşık filo yapısı, direkt dağıtım yanında satış ofisleri ve seyahat acenteleri yoluyla satış ve dağıtım gibi karmaşık hizmet

süreçleri karmaşık planlama ve operasyonel sistemleri gerektirmektedir (Auerbach ve Delfmann, 2005).

- **Düşük Maliyetli Havayolları:** Düşük fiyatlı havayolları, ikramsız havayolları ve bütçe havayolları şeklinde farklı isimlerle ele alınabilen bu modelin temeli geleneksel havayollarının sundukları hizmetlerin bazılarından vazgeçerek düşük maliyetlere ulaşan ve sonucunda düşük fiyata ve ücrete duyarlı yolculara sunulan basit hizmet tasarımına dayanmaktadır (Şengür ve Şengür, 2017; Franke, 2004). Geleneksel taşıyıcıların aksine birden fazla hizmet sınıfı yerine tek hizmet sınıfı; genellikle ikramsız, düşük düzeyde ya da ücretli ikram konsepti; doğrudan dağıtım kanallarına yoğunlaşma, noktadan noktaya ve nispeten kısa hat seçimi; tek tip filo kullanımı ve yoğun birincil havaalanları yerine ikincil havaalanlarının seçilmesi bu iş modelinin özellikleri içinde yer almaktadır.
- **Tarifersiz (charter) Havayolları:** Genellikle paket tatil tur acentelerine uçaktaki boş koltukların tamamını ya da bir bölümünü blok satış şeklinde satan veya uçaklarını kiraya vererek gelir elde eden, olabildiğince düşük maliyetler ile basit hizmet tasarımına sahip olan havayolu işletmeleridir (Şengür ve Şengür, 2017).
- **Bölgesel Havayolları:** Genellikle küçük ya da talebin yetersiz olduğu yerlerden merkezi havaalanlarına bağlantı hizmeti veren, coğrafi odaklı, kısa mesafede nispeten küçük yolcu uçaklarıyla havayolu hizmeti sunan işletmelerdir (Şengür ve Şengür, 2017). Diğer iş modellerinin belirli ve dar alanlarda uygulanmasıdır. Tek bir bölgeyi hedef aldığı için odaklanma olarak da tanımlanmaktadır. Amaç düşük fiyatlarla, kısıtlı bir alanda bulunan yolcu profilinin ihtiyaçlarını karşılamak, farklılığını ortaya koymak ve aynı zamanda maliyeti düşük satışlar gerçekleştirmektir. Hedef alınan pazarın belirli bir alanda olması ve belirli bölgedeki farklı yolcu profillerinin belirlenmesi ve her birinin tercih edebileceği farklı hizmetlerin sunulması durumları ortak özellikleridir (Adiloğlu Yalçınkaya, 2021).

Tablo 3. Düşük Maliyetli Havayolları (LCC) ile Tam Hizmet Veren Havayollarının (FSA) Operasyonel ve Ticari Özelliklerinin Karşılaştırılması

Özellik	Düşük Maliyetli Havayolları (LCC)	Tam Hizmet Veren Havayolları (FSA)
Ağ Yapısı	Noktadan noktaya (point-to-point)	Merkez-çevre (hub-and-spoke)
Filo Yapısı	Tek tip veya yüksek düzeyde standartlaştırılmış	Çeşitlendirilmiş
Belly Cargo Taşımacılığı	Sınırlı düzeyde veya hiç bulunmaz	Yaygın olarak uygulanır
Havaalanları	İkincil ve daha az yoğun havaalanları	Birincil ve büyük ölçekli havaalanları
Hizmet Kapsamı	Temel hizmetler; ek hizmetler ücretlendirilir	Hizmetlerin büyük bölümü bilete dâhildir
Kabin ve Koltuk Düzeni	Daha yüksek koltuk yoğunluğu, sınırlı konfor özellikleri	Daha geniş koltuk aralığı ve yüksek konfor düzeyi
Gelir Yönetimi ve Fiyatlandırma	Basit fiyatlandırma ve tek sınıflı hizmet yapısı	Gelişmiş gelir yönetimi ve farklılaştırılmış hizmet sınıfları
Ücret Düzeyi ve Yan Hizmetler	Düşük bilet fiyatları, ücretli ek hizmetler	Daha yüksek bilet fiyatları, kapsamlı yan hizmetler
Kod Paylaşımı	Sınırlı düzeyde	Yaygın düzeyde
Yolcu Programları	Sınırlı veya temel düzeyde	Kapsamlı ve gelişmiş
Dağıtım ve Satış Kanalları	Doğrudan satış kanalları (web sitesi, mobil uygulama)	Doğrudan satış kanalları ile seyahat acenteleri ve küresel dağıtım sistemleri (GDS)

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Düşük maliyetli havayolları (LCC'ler), merkez-çevre (hub-and-spoke) sisteminin beraberinde getirdiği operasyonel karmaşıklıklardan kaçınmak amacıyla noktadan noktaya (point-to-point) ağ yapısını benimsemektedir. Bu karmaşıklıklar; uçuş programlarının koordinasyonu, daha uzun uçak dönüş süreleri, zincirleme gecikmelere karşı yüksek hassasiyet, havaalanı tıkanıklığı ile yolcu ve bagaj transferlerinin yönetiminde ortaya çıkan lojistik zorlukları kapsamaktadır. Buna karşılık, tam hizmet veren havayolları (FSA'lar), merkezi bir havaalanının çok sayıda çevre havaalanını birbirine bağladığı merkez-çevre sistemini temel operasyonel strateji olarak kullanmaktadır (Smith ve Cox, 2012). Operasyonların merkez havaalanında yoğunlaştırılması sayesinde FSA'lar, büyük şehirlere daha sık uçuş gerçekleştirebilmekte ve daha az sayıda rota ile çok sayıda destinasyonu birbirine bağlayabilmektedir. Bu durum, ağ kapsamını genişletirken yolcuların uçuş seçeneklerine erişimini de artırmaktadır.

Ayrıca, farklı çevre havaalanlarından gelen yolcuların merkezde toplanması, havayollarına yoğunluk ekonomilerinden yararlanma imkânı sağlamaktadır (Brueckner ve Zhang, 2001). Bununla birlikte, lojistik ve ekonomik sınırlamalar aynı havaalanında birden fazla havayolu merkezinin sürdürülebilirliğini zorlaştırmakta ve merkez havaalanlarındaki rekabet düzeyini azaltmaktadır. Rekabetin azalması ise talebin daha az fiyat duyarlı hâle gelmesine neden olmakta, bunun sonucunda da bilet fiyatları yükselirken hizmet kalitesinde düşüşler görülebilmektedir (Berry vd., 1996).

LCC'lerin temel maliyet avantajlarından biri, filolarını tek tip uçaklardan oluşturmasıdır. Filo standardizasyonu, bakım ve pilot eğitim maliyetlerini azaltırken uçakların farklı rotalar arasında daha kolay yeniden görevlendirilmesine olanak tanımaktadır. Böylece operasyonel süreçler sadeleşmekte, maliyetler düşmekte ve operasyonel esneklik artmaktadır (Button ve Ison, 2008). Bunun yanında, daha hızlı uçak dönüş süreleri ve uçak başına daha yüksek koltuk kapasitesi sayesinde uçak kullanım oranları da yükselmektedir. Hızlı dönüş süreleri; kargo bölümlerinin bulunmaması nedeniyle yükleme ve boşaltma işlemlerinin daha kısa sürmesi ve daha az yoğun ikincil havaalanlarının tercih edilmesiyle mümkün olmaktadır. Bu uygulamalar operasyonların daha akıcı yürütülmesini sağlamakta, uçakların yerde bekleme süresini azaltmakta ve günlük uçuş sayısının artırılmasına katkıda bulunmaktadır (Button ve Ison, 2008; Yu vd., 2019).

Hizmet sunumu açısından LCC'ler, yemek, bagaj ve koltuk seçimi gibi ek hizmetleri ayrı ücretlendiren minimalist bir yaklaşım benimsemektedir (Button ve Ison, 2008). Bu model, tam hizmet veren havayollarının katlandığı birçok ek maliyet unsurundan kaçınmalarına olanak sağlamaktadır. LCC'lerin bir diğer önemli avantajı ise daha basit fiyatlandırma yapılarıdır. FSA'lar, farklı müşteri segmentlerinden daha fazla gelir elde etmek amacıyla karmaşık gelir yönetimi sistemleri kullanmakta ve çok sayıda hizmet seçeneği sunmaktadır. Ancak bu uygulamalar, analiz ve operasyon maliyetlerini artırmaktadır. Buna karşılık LCC'ler, daha sade gelir yönetimi sistemleri kullanarak bu maliyetleri önemli ölçüde azaltabilmektedir (Bitzan ve Peoples, 2016).

İş gücü maliyetleri de iki iş modeli arasındaki önemli farklılıklardan biridir. LCC'ler genellikle sendikasıız iş gücünden yararlanmakta, çalışan başına düşen mevcut koltuk mili (ASM) performansını yüksek tutarken ücret seviyelerini FSA'lara kıyasla daha düşük düzeyde korumaktadır (Chopra ve Lisiak, 2006). Ayrıca, bilet satışlarını büyük ölçüde doğrudan çevrim içi kanallardan üzerinden gerçekleştirerek küresel dağıtım sistemleri ve seyahat acentelerine ödenen komisyon maliyetlerinden kaçınmaktadırlar (Gillen ve Lall, 2018). Son olarak, maliyet ile konfor arasında doğal bir denge bulunduğundan,

LCC'ler yolcu konforunu ikinci planda tutarak uygun fiyatlı ulaşım sağlamaya odaklanmaktadır (Mason ve Morrison, 2008).

Tablo 4. Havayolu İş Modelleri ve SAF Etkisinin Temel Ayrıştırma Noktaları

İş modeli	Operasyonel yapı	SAF açısından güçlü taraf	SAF açısından hassasiyet
Tam hizmet	Hub-and-spoke ağ, uzun menzil, çok sınıflı hizmet	Marka, kurumsal müşteri, ESG finansmanı	Yüksek toplam yakıt tüketimi ve karmaşık operasyon
Düşük maliyetli	Noktadan noktaya ağ, sade hizmet, yüksek uçak kullanımı	Verimli filo ve düşük birim emisyon iletişimi	Fiyat duyarlılığı ve maliyet liderliği baskısı
Charter	Sezonluk/tur operatörü odaklı operasyon	Sürdürülebilir turizm paketleri	Paket fiyat hassasiyeti ve sezonluk arz
Bölgesel	Kısa mesafe, küçük ölçekli filo, bağlantı rolü	Kısa rotalarda düşük emisyon iletişimi	Sınırlı tedarik erişimi ve düşük pazarlık gücü

Kaynak: Teece (2010), Franke (2004), Mason ve Morrison (2008), Şengür ve Şengür (2017) temel alınarak yazar tarafından oluşturulmuştur.

3. YÖNTEM

Havacılık sektörü, küresel ekonomik büyümeye ve uluslararası bağlantısallığa önemli katkılar sağlamakla birlikte, sera gazı emisyonları nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik açısından yoğun eleştirilere maruz kalmaktadır. Uluslararası iklim hedefleri doğrultusunda havacılık kaynaklı karbon emisyonlarının azaltılması, sektörün öncelikli gündem maddelerinden biri hâline gelmiştir. Bu kapsamda Sürdürülebilir Havacılık Yakıtları (Sustainable Aviation Fuel–SAF), mevcut uçak ve altyapı sistemleriyle büyük ölçüde uyumlu olması nedeniyle havacılık sektörünün karbon ayak izini azaltmada en uygulanabilir çözümlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Ancak SAF kullanımının yaygınlaşması, yalnızca çevresel performansı değil, aynı zamanda havayollarının maliyet yapıları, rekabet stratejileri ve iş modelleri üzerinde de önemli etkiler yaratmaktadır. Özellikle düşük maliyetli havayolları (LCC) ile tam hizmet veren havayolları (FSA) arasındaki operasyonel ve finansal farklılıklar, SAF uygulamalarının bu işletmeler üzerindeki etkilerinin farklılaşmasına neden olmaktadır.

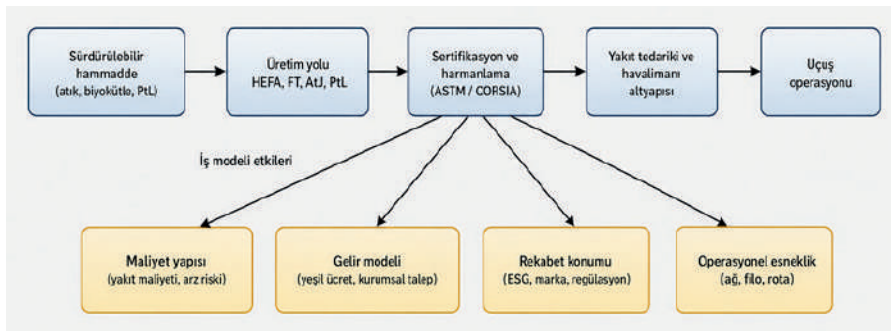
SAF kullanımının havayolu iş modelleri üzerindeki stratejik sonuçlarının değerlendirilmesi, sektörün sürdürülebilir dönüşüm sürecinin anlaşılması açısından kritik önem taşımaktadır. Bu araştırmada, Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı kullanımının havayolu iş modellerine etkileri SWOT (Güçlü Yönler, Zayıf

Yönler, Fırsatlar ve Tehditler) analizi çerçevesinde incelenerek, havayollarının sürdürülebilirlik hedefleri ile rekabetçi konumları arasındaki ilişkinin ortaya konulması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda SWOT unsurlarının belirlenme süreci, kullanılan kaynak türleri ve iş modeli bazlı sınıflandırma yaklaşımı yöntem bölümünde açık biçimde tanımlanmıştır. Veri kaynakları üç gruptan oluşmaktadır: (i) havacılıkta SAF, karbonsuzlaşma ve havayolu iş modelleri üzerine hakemli akademik çalışmalar; (ii) IATA, ICAO ve Avrupa Komisyonu gibi kurumsal düzenleyici ve sektör kaynakları; (iii) havayolu iş modellerine ilişkin kavramsal ve ampirik literatür. Güncel kurumsal kaynaklarda resmî web sayfaları esas alınmış; haber niteliğindeki kaynaklar temel dayanak olarak kullanılmamıştır.

SWOT unsurları tümdengelsel kodlama yaklaşımıyla belirlenmiştir. İlk aşamada literatür ve kurumsal raporlardan SAF'ın maliyet, tedarik, regülasyon, marka, operasyon ve müşteri değeriyle ilişkili ifadeleri çıkarılmıştır. İkinci aşamada bu ifadeler güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar ve tehditler kategorilerine ayrılmıştır. Üçüncü aşamada ise unsurlar tam hizmet, düşük maliyetli, charter ve bölgesel havayolu iş modellerine göre yeniden sınıflandırılmıştır.

SWOT sınıflandırmasında “güçlü yönler” ve “zayıf yönler” havayolu işletmesinin içsel kapasite ve iş modeli özellikleriyle; “fırsatlar” ve “tehditler” ise dış çevre, regülasyon, piyasa ve tedarik koşullarıyla ilişkilendirilmiştir. Çalışmada uzman görüşü veya Delphi/AHP gibi nicel ağırlıklandırma yöntemleri uygulanmamıştır. Bu nedenle bulgular, keşfedici ve stratejik değerlendirme niteliğindedir; nedensel veya istatistiksel sonuç olarak yorumlanmamalıdır.

Analizin sınırlılığı, SWOT unsurlarının ikincil kaynaklara ve literatür temelli yoruma dayanmasıdır. Gelecek çalışmalarda havayolu yöneticileri, yakıt tedarikçileri, havalimanı işletmecileri ve regülatör temsilcilerinden alınacak uzman görüşleriyle SWOT bulgularının ağırlıklandırılması önerilmektedir.



Şekil 2. SAF Tedarik Zinciri ve Havayolu İş Modellerine İlişkin Etkileri

Kaynak: Yazar tarafından IATA (2026), ICAO (2023) ve European Commission (2025) çerçeveleri temel alınarak oluşturulmuştur.

Tablo 5. SAF Üretim Yolları ve İş Modeli Açısından Temel Etkileri

Üretim yolu	Temel hammadde/kaynak	Avantaj	İş modeli açısından sınırlılık
HEFA	Atık yağ, hayvansal yağ, bitkisel yağ	Ticari olgunluğu görece yüksek	Hammadde arzı ve fiyat rekabeti
Fischer-Tropsch	Biyokütle, belediye atığı, sentez gazı	Atık temelli üretim potansiyeli	Yüksek yatırım ve ölçeklenme ihtiyacı
Alkolden jete dönüşüm (AtJ)	Etanol, izobütanol, atık bazlı alkoller	Farklı bölgesel kaynaklarla uyum	Teknoloji maliyeti ve tedarik sürekliliği
PtL/c-SAF	Yeşil hidrojen ve yakalanmış CO ₂	Uzun vadeli düşük karbon potansiyeli	Yüksek elektrik, hidrojen ve sermaye ihtiyacı

Kaynak: IATA (2026b), Staples et al. (2018) ve Lee et al. (2021) temel alınarak yazar tarafından oluşturulmuştur.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bulgular, SAF kullanımının tüm havayolu işletmeleri için ortak bir sürdürülebilirlik aracı olmakla birlikte, iş modeli farklılıkları nedeniyle stratejik etkilerinin ayrıştığını göstermektedir. Bu kapsamda maliyet, arz ve regülasyon unsurları baz alınarak dört ayrı iş modeli için SWOT tabloları oluşturulmuştur.

Tablo 6. Tam Hizmet Veren Havayolları İçin SAF Kullanımına Yönelik SWOT Analizi

<p>Güçlü Yönler</p> <ul style="list-style-type: none"> Güçlü marka ve kurumsal itibar kapasitesi Kurumsal müşteri ve premium segmentlerde çevresel değer önerisi sunabilme Yeşil finansman ve sürdürülebilirlik raporlamasına erişim Uzun vadeli yakıt tedarik anlaşmaları yapabilecek ölçek 	<p>Zayıf Yönler</p> <ul style="list-style-type: none"> Uzun menzilli uçuşlarda yüksek toplam yakıt tüketimi Karmaşık filo ve ağ yapısı nedeniyle uygulama maliyetlerinin artması SAF maliyetinin bilet fiyatına yansıtılmasında talep riski Kapsamlı operasyon nedeniyle tedarik ve raporlama karmaşıklığı
<p>Fırsatlar</p> <ul style="list-style-type: none"> Kurumsal seyahatlerde SAF sertifikalı ürün ve yeşil ücret geliştirme ESG fonları ve sürdürülebilir finansman kaynaklarına erişim Küresel ittifaklar üzerinden SAF tedarik iş birlikleri Regülasyonlara erken uyum sayesinde rekabetçi konum kazanma 	<p>Tehditler</p> <ul style="list-style-type: none"> SAF arzının sınırlı kalması ve fiyat volatilitesi AB ve farklı bölgelerde regülasyon uyumsuzlukları Rakip taşıyıcıların yeşil marka algısını daha güçlü sahiplenmesi Uzun menzilli operasyonlarda karbon maliyetinin hızla artması

Kaynak: Yazar tarafından literatür ve kurumsal kaynaklar temel alınarak oluşturulmuştur.

Tam hizmet veren havayolları açısından SAF, yalnızca maliyet kalemi değil aynı zamanda marka, kurumsal müşteri ve sürdürülebilir finansman boyutlarında stratejik bir araçtır. Ancak bu modelin uzun menzilli ve karmaşık ağ yapısı, SAF maliyetlerinin toplam etkisini yükseltmektedir.

Tablo 7. Düşük Maliyetli Havayolları İçin SAF Kullanımına Yönelik SWOT Analizi

<p>Güçlü Yönler</p> <ul style="list-style-type: none"> • Yeni ve yakıt verimli filo kullanımının birim emisyon avantajı sağlaması • Sade operasyon yapısı sayesinde uygulama süreçlerinin görece hızlı yönetilebilmesi • Doğrudan satış kanallarında düşük emisyonlu ürünlerin görünür kılınması • Kısa ve orta mesafeli hatlarda çevresel etki iletişiminin somutlaştırılması 	<p>Zayıf Yönler</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maliyet liderliği stratejisi nedeniyle SAF fiyat artışına yüksek hassasiyet • Ek maliyetleri düşük fiyatlı bilet yapısına yansıtma zorluğu • Sürdürülebilirlik yatırımları için sınırlı finansal esneklik • Fiyat duyarlı müşteri segmentinde talep kaybı riski
<p>Fırsatlar</p> <ul style="list-style-type: none"> • Yeşil ek hizmet paketi veya isteğe bağlı SAF katkısı geliştirme • Yeni nesil yakıt tedarik anlaşmalarıyla maliyet sabitleme • Düşük birim emisyon ve verimli filo algısını pazarlama • Regülasyonlara erken uyumla ceza ve karbon maliyeti riskini azaltma 	<p>Tehditler</p> <ul style="list-style-type: none"> • SAF maliyetlerinin bilet fiyatı rekabetini zayıflatması • Tam hizmet taşıyıcılarının sürdürülebilirlik algısını sahiplenmesi • Yakıt tedarikinde büyük ölçekli taşıyıcılara göre düşük pazarlık gücü • Zorunlu SAF oranlarının düşük marjları baskılaması

Kaynak: Yazar tarafından literatür ve kurumsal kaynaklar temel alınarak oluşturulmuştur.

Düşük maliyetli havayollarında SAF'ın temel etkisi maliyet liderliği stratejisi üzerinde ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bu model için en kritik konu, SAF maliyetinin yolcuya aktarımı ile talep kaybı riski arasındaki dengenin yönetilmesidir.

Tablo 8. Tarifesiz/Charter Havayolları İçin SAF Kullanımına Yönelik SWOT Analizi

<p>Güçlü Yönler</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tur operatörleriyle blok anlaşmalar üzerinden SAF maliyetini paket yapıya dahil edebilme • Turizm destinasyonlarının sürdürülebilirlik imajıyla uyum sağlama • Sezonluk planlama sayesinde belirli rotalarda hedefli SAF kullanımı • Paket tur müşterilerine düşük emisyonlu tatil ürünü sunabilme 	<p>Zayıf Yönler</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sezonluk talep nedeniyle SAF tedarik sürekliliğinin sınırlı olması • Fiyat duyarlı tatil talebinde ek maliyeti yansıtmaya zorluğu • Küçük/orta ölçekli charter işletmelerinde düşük pazarlık gücü • Sürdürülebilirlik raporlaması ve sertifikasyon kapasitesinin sınırlı olması
<p>Fırsatlar</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sürdürülebilir turizm paketleriyle farklılaşma • Destinasyon yönetimleri ve tur operatörleriyle ortak yeşil pazarlama • Avrupa pazarında çevre duyarlı tüketici segmentlerine erişim • Sezonluk SAF anlaşmalarıyla maliyet kontrolü 	<p>Tehditler</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tur operatörlerinin maliyet baskısı nedeniyle SAF primini kabul etmemesi • Rakip destinasyon/taşıyıcıların daha düşük fiyat sunması • SAF arzının yoğun sezonlarda yetersiz kalması • Regülasyon maliyetlerinin paket tur rekabetçiliğini azaltması

Kaynak: Yazar tarafından literatür ve kurumsal kaynaklar temel alınarak oluşturulmuştur.

Charter havayollarında SAF'ın etkisi turizm değer zinciriyle birlikte düşünülmelidir. SAF maliyeti yalnızca havayolunu değil, tur operatörü, destinasyon ve paket fiyat yapısını da etkilemektedir.

Tablo 9. Bölgesel Havayolları İçin SAF Kullanımına Yönelik SWOT Analizi

Güçlü Yönler <ul style="list-style-type: none"> • Kısa mesafeli rotalarda düşük emisyonlu ulaşım anlatısını güçlendirme • Bölgesel kalkınma ve kamu hizmeti hedefleriyle uyum • Küçük ölçekli pilot SAF uygulamaları için uygun operasyon alanı • Yerel hammadde ve bölgesel tedarik zinciri potansiyeli 	Zayıf Yönler <ul style="list-style-type: none"> • Düşük ölçek nedeniyle SAF tedarikinde sınırlı pazarlık gücü • Bölgesel havalimanlarında SAF altyapısının yetersizliği • Düşük talep yoğunluğu nedeniyle maliyet aktarımının zor olması • Küçük filo yapısında sertifikasyon ve operasyon maliyetlerinin görece olarak yükselmesi
Fırsatlar <ul style="list-style-type: none"> • Kamu destekli yeşil bölgesel ulaşım programları • Yerel atık ve biyokütle kaynaklarıyla tedarik zinciri geliştirme • Bölgesel havalimanlarında erken altyapı yatırımıyla rekabet avantajı • Kısa rota emisyonlarının şeffaf raporlanmasıyla sosyal kabulü artırma 	Tehditler <ul style="list-style-type: none"> • SAF erişiminin yalnızca büyük hub havalimanlarıyla sınırlı kalması • Maliyet artışının bölgesel hatların ekonomik sürdürülebilirliğini zayıflatması • Alternatif kara ulaşımı karşısında rekabet kaybı • Kamu teşviklerinin süreklilik göstermemesi

Kaynak: Yazar tarafından literatür ve kurumsal kaynaklar temel alınarak oluşturulmuştur.

Bölgesel havayolları için SAF, çevresel ve bölgesel kalkınma hedefleri açısından önemli fırsatlar sunabilir; ancak arz ve altyapı erişimi bu modelde en kritik sınırlılıktır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF) kullanımının havayolu iş modelleri üzerindeki etkileri SWOT analizi çerçevesinde incelenen araştırmada elde edilen bulgular, SAF'ın yalnızca çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı sağlayan bir araç olmadığını, aynı zamanda havayolu işletmelerinin rekabet stratejilerini, maliyet yapılarını ve gelir modellerini dönüştüren stratejik bir unsur hâline geldiğini göstermektedir. Analiz sonuçları, SAF kullanımının özellikle tam hizmet veren havayolları (legacy/full service carriers) açısından önemli fırsatlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Güçlü marka algısı, geniş ağ yapısı ve premium müşteri segmentlerine erişim gibi avantajlara sahip olan bu havayolları, artan çevre duyarlılığını rekabet avantajına dönüştürebilmektedir. Sürdürülebilirlik odaklı yolcu talebinin artması, "yeşil premium" olarak adlandırılacak yeni fiyatlandırma uygulamalarına olanak tanımakta ve SAF kaynaklı maliyet artışlarının belirli ölçüde gelir tarafında telafi edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum özellikle uluslararası ve premium pazarlarda faaliyet gösteren

havayolları için farklılaşma ve marka değerini güçlendirme fırsatı yaratmaktadır. Buna karşılık, düşük maliyetli havayolları (LCC) açısından SAF kullanımını daha karmaşık sonuçlar doğurmaktadır. LCC modelinin temelinde yer alan maliyet liderliği stratejisi, SAF'ın geleneksel jet yakıtına kıyasla daha yüksek maliyetli olması nedeniyle önemli ölçüde baskı altına girmektedir. Yüksek maliyetler ile yoğun fiyat rekabetinin birleşmesi, düşük maliyetli taşıyıcıların kâr marjlarını daraltmakta ve iş modelinin sürdürülebilirliği üzerinde risk oluşturmaktadır. Bu nedenle LCC'ler ya bilet fiyatlarını artırmak ya da operasyonel verimliliklerini daha da geliştirerek maliyetlerini dengelemek durumunda kalabilirler. Ancak fiyat artışları, bu işletmelerin hedef kitlesini oluşturan fiyat hassasiyeti yüksek yolcular üzerinde talep kaybına yol açma potansiyeli taşımaktadır.

SWOT analizinde ortaya çıkan bir diğer önemli sonuç, SAF kullanımının sektördeki rekabet dinamiklerini yeniden şekillendirebileceğidir. Özellikle erken dönemde SAF yatırımı yapan ve sürdürülebilirlik stratejilerini kurumsal yapılarına entegre eden büyük ölçekli ağ taşıyıcılarının, gelecekteki çevresel düzenlemelere uyum konusunda önemli avantajlar elde etmesi beklenmektedir. Buna karşılık, finansal kaynakları daha sınırlı olan veya maliyet liderliği üzerine kurulu iş modeli izleyen havayolları, artan düzenleyici baskılar karşısında daha dezavantajlı bir konuma düşebilir. Bu süreçte enerji şirketleri, yakıt üreticileri ve kamu kurumları ile kurulacak stratejik ortaklıklar, havayollarının rekabet gücünü koruyabilmeleri açısından kritik öneme sahip olacaktır.

Sonuç olarak SAF kullanımı, havayolu iş modellerini yalnızca operasyonel düzeyde değil, stratejik düzeyde de dönüştürmektedir. Kısa vadede yüksek maliyetler nedeniyle önemli zorluklar yaratmasına rağmen, uzun vadede sürdürülebilirlik hedeflerine uyum, düzenleyici avantajlar, kurumsal itibar artışı ve yeni gelir fırsatları sunmaktadır. Bununla birlikte, bu dönüşümün etkileri tüm havayolu işletmeleri için aynı değildir. Geleneksel havayolları SAF'ı bir rekabet avantajına dönüştürme potansiyeline sahipken, düşük maliyetli havayolları açısından SAF maliyet liderliği temelli iş modelini zorlayan yapısal bir risk unsuru olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle SAF'ın yaygınlaşması, havacılık sektöründe mevcut iş modeli farklılaşmasını daha da belirginleştirecek ve gelecekteki rekabet koşullarını yeniden şekillendirecektir.

Kaynakça

- Abate, M., Christidis, P., & Purwanto, A. (2020). The expansion of low-cost carriers and its implications for the aviation industry. *Transport Policy*, 88, 1–13.
- Adiloğlu Yalçınkaya, L. (2021). *Havayolu iş modellerinin değişimi: Türk Hava Yolları ve Pegasus Havayolları üzerine bir araştırma*. Nobel Bilimsel Eserler.
- Alpman, E., & Göğüş, A. Y. (2017). Havacılıkta sürdürülebilir gelişme göstergeleri. *Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi*, 2(1), 1–11.
- ASTM International. (2022). *ASTM D7566: Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons*. ASTM International.
- Berry, S., Carnall, M., & Spiller, P. T. (1996). Airline hubs: Costs, markups and the implications of customer heterogeneity (NBER Working Paper No. 5618). National Bureau of Economic Research.
- Bitzan, J. D., & Peoples, J. (2016). A comparative analysis of cost structures in low-cost and legacy airlines. *Journal of Transport Economics and Policy*, 50(2), 197–216.
- Brueckner, J. K., & Zhang, Y. (2001). A model of scheduling in airline networks. *Journal of Transport Economics and Policy*, 35(2), 195–222.
- Button, K., & Ison, S. (2008). The economics of low-cost airlines. *Journal of Air Transport Management*, 14(5), 276–283.
- Chopra, S., & Lisiak, A. (2006). Labor cost differences in airline business models. *Journal of Air Transport Studies*, 2(1), 33–48.
- Delfmann, W., Baum, H., Auerbach, S., & Albers, S. (2005). Moving targets: Strategic trends in the aviation sector. In W. Delfmann, H. Baum, S. Auerbach, & S. Albers (Eds.), *Strategic management in the aviation industry* (pp. 1–15). Ashgate.
- European Commission. (2023). *ReFuelEU Aviation initiative*. European Commission.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *Biofuels and food security report*. FAO.
- Franke, M. (2004). Competition between network carriers and low-cost carriers: Retreat battle or breakthrough to a new level of efficiency? *Journal of Air Transport Management*, 10(1), 15–21.
- Gillen, D., & Lall, A. (2018). Airline distribution systems and cost efficiency. *Transport Policy*, 31, 45–56.
- Gössling, S., & Humpe, A. (2020). The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change. *Global Environmental Change*, 65, 102194.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change (AR6 WGIII report)*. Cambridge University Press.

- International Air Transport Association. (2025). *Sustainable aviation fuel roadmap and policy considerations*. IATA.
- International Air Transport Association. (2025). *Sustainable aviation fuel roadmap report*. IATA.
- International Air Transport Association. (2026a). *Net zero 2050: Sustainable aviation fuels (SAF)*. IATA.
- International Air Transport Association. (2026b). *Fuel fact sheet*. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-fuel/>
- International Air Transport Association. (2026c). *SAF handbook*. <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-handbook.pdf>
- International Air Transport Association. (2025). *SAF and sustainability*. IATA.
- International Civil Aviation Organization. (2023). *Sustainable aviation fuels (SAF) guidance framework*. ICAO.
- International Civil Aviation Organization. (2023). *Third conference on aviation and alternative fuels (CAAF/3): Outcomes and recommendations*. ICAO.
- International Energy Agency. (2023). *Net zero roadmap: Aviation sector*. IEA.
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., et al. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000–2018. *Atmospheric Environment*, 244, 117834.
- Mariyam, S., Alherbawi, M., McKay, G., & Al-Ansari, T. (2026). Converting waste into sustainable aviation fuel (SAF): A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116380.
- Mason, K. J., & Morrison, W. G. (2008). Towards a means of consistently comparing airline business models with an application to the “low cost” airline sector. *Research in Transportation Economics*, 24(1), 75–84.
- Smith, A., & Cox, B. (2012). Airline network structures and operational efficiency. *Journal of Air Transport Management*, 23, 45–52.
- Staples, M. D., Malina, R., Olcay, H., Pearlson, M. N., Hileman, J. I., & Barrett, S. R. H. (2018). Aviation biofuel from biomass: Techno-economic analysis and sustainability implications. *Nature Energy*, 3, 1–9.
- Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü. (2025). *Sürdürülebilir havacılık yakıtı (SAF) harmonizasyon aksiyon planı (HAP) bilgi notu*. <https://www.shgm.gov.tr/>
- Şengür, F. K., & Şengür, Y. (2017). Havayolu iş modelleri: Kavramsal bir analiz. In *Ulusal Yönetim ve Organizasyon Kongresi Bildirileri*. İzmir, Türkiye.
- Teece, D. J. (2010). Business models, business strategy and innovation. *Long Range Planning*, 43(2–3), 172–194.
- U.S. Department of Energy. (2023). *Sustainable aviation fuel grand challenge roadmap*. U.S. Department of Energy.

- Wang, B., Zhao, J. T., & Zhao, M. (2024). Sustainable aviation fuels: Key opportunities and challenges in lowering carbon emissions for aviation industry. *Carbon Capture Science & Technology*, 13, 100263. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100263>
- Wang, X., Guo, L., Lv, J., Li, M., Huang, S., Wang, Y., & Ma, X. (2023). Process design, modeling and life cycle analysis of energy consumption and GHG emission for jet fuel production from bioethanol in China. *Journal of Cleaner Production*, 389, 136027. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136027>
- Watson, M. J., Machado, P. G., Da Silva, A. V., Saltar, Y., Ribeiro, C. O., Nascimento, C. A. O., & Dowling, A. W. (2024). Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141472>
- Wei, H., Liu, W., Chen, X., Yang, Q., Li, J., & Chen, H. (2019). Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review. *Fuel*, 254, 115599.
- Xu, Y., Zhang, Y., Deng, X., Lee, S., Wang, K., & Li, L. (2025). Bibliometric analysis and literature review on sustainable aviation fuel (SAF): Economic and management perspective. *Transport Policy*, 162, 296–312. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.11.014>
- Yang, Q., & Chen, F. (2022). Life cycle assessment of biojet fuels. In *Sustainable alternatives for aviation fuels* (pp. 215–236). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85715-4.00004-5>
- Yaşar, G., & Onat, B. (2024). Derleme: Sürdürülebilir havacılık yakıtları üretimi ve çevresel etkileri. *Anadolu Çevre ve Hayvancılık Bilimleri Dergisi*, 10(2), 182–190. <https://doi.org/10.35229/jaes.1626339>
- Yu, G., et al. (2019). Operational efficiency in low-cost carriers. *Transportation Research Part A*, 124, 1–15.

Türkiye’deki Büyük Havalimanlarının Sıfır Emisyonlu Havacılık Dönüşümüne Hazırlığının ARI Modeli ile Değerlendirilmesi

Hamza Ceylan¹

Eren Sezer²

Özet

Türkiye’deki büyük havalimanlarının sıfır emisyonlu uçak operasyonlarına yönelik altyapı hazırlık düzeyini karşılaştırmalı ve senaryo temelli bir yaklaşımla değerlendirmektedir. Araştırmada İstanbul Havalimanı, Sabiha Gökçen Havalimanı, Antalya Havalimanı, Ankara Esenboğa Havalimanı ve İzmir Adnan Menderes Havalimanı örneklem olarak ele alınmıştır. Çalışmanın temel amacı, elektrikli, hibrit elektrikli ve hidrojen temelli uçak teknolojilerinin yaygınlaşması durumunda havalimanlarının hangi altyapı gereksinimleriyle karşılaşılabileceğini ortaya koymaktır. Bu doğrultuda trafik yoğunluğu, operasyonel kapasite ve enerji altyapısı boyutlarını bütünleştiren Havalimanı Hazırlık Endeksi (Airport Readiness Index- ARI) kullanılmıştır. Endeks modelinde yolcu sayısı, uçak hareketi, hub rolü, operasyonel kapasite, elektrik şebekesi, yenilenebilir enerji entegrasyonu, apron şarj alanı potansiyeli, yer hizmetleri elektrifikasyonu ve hidrojen depolama olasılığı birlikte değerlendirilmiştir. Farklı ölçeklerdeki değişkenlerin karşılaştırılabilir hale getirilmesi için min-maks normalizasyon yöntemi uygulanmış ve üç temel endeks bileşeni eşit ağırlıkla modele dahil edilmiştir. Bulgular, İstanbul Havalimanı’nın çok yüksek hazırlık önceliğine sahip olduğunu; Sabiha Gökçen ve Antalya havalimanlarının ise orta-yüksek düzeyde hazırlık potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Senaryo analizi, toplam uçuşların %10, %25 ve %50’sinin elektrikli uçuşa dönüşmesi durumunda yıllık enerji talebinin özellikle yüksek trafik hacmine sahip havalimanlarında belirgin biçimde artacağını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, sıfır emisyonlu havacılık dönüşümünün yalnızca uçak teknolojisiyle sınırlı olmadığını; havalimanı

- 1 Öğr. Gör., Kapadokya Üniversitesi, Sivil Hava Ulaştırma İşletmeciliği (İngilizce) Programı, 50400, hamza.ceylan@kapadokya.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4242-0217
- 2 Öğr. Gör., Kapadokya Üniversitesi, Uçak Teknolojisi Programı, 50400, eren.sezer@kapadokya.edu.tr, ORCID: 0009-0004-2137-8018

enerji planlaması, apron düzenlemeleri, şebeke kapasitesi, yenilenebilir enerji yatırımları ve çok paydaşlı politika tasarımıyla birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir. Modelin keşfedici niteliği, mühendislik projelendirmesi yerine stratejik önceliklendirme ve politika geliştirme amacı taşıdığı için özellikle kamuya açık veri sınırlılıkları bulunan pazarlarda uygulanabilir bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır.

1. GİRİŞ

Havacılık sektörü, küresel ulaşım ağının temel bileşenlerinden biri olarak ekonomik büyüme, uluslararası ticaret, turizm ve bölgesel kalkınma üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Ancak artan hava trafiği, sektörün karbon emisyonları ve enerji tüketimi bakımından daha sürdürülebilir bir yapıya dönüştürülmesini zorunlu kılmaktadır. Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından kabul edilen uzun vadeli küresel aspirasyonel hedef (LTAG), uluslararası havacılığın 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonu hedefine yönelmesini öngörmektedir (ICAO, 2026). Benzer şekilde IATA, hava taşımacılığı sektörünün net sıfır hedefi için sürdürülebilir havacılık yakıtları, yeni uçak teknolojileri, operasyonel verimlilik ve karbon giderim mekanizmalarının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (IATA, 2026).

Sürdürülebilir havacılık yakıtları kısa ve orta vadede önemli bir seçenek olmakla birlikte, elektrikli, hibrit elektrikli ve hidrojen temelli uçak teknolojileri uzun vadeli karbonsuzlaşma stratejilerinin merkezinde yer almaktadır. Elektrikli tahrik sistemleri özellikle kısa menzilli ve bölgesel operasyonlarda emisyon azaltımı potansiyeli taşıırken, hidrojen temelli çözümler daha uzun vadeli ve daha yüksek altyapı gerektiren bir dönüşüm alanı olarak değerlendirilmektedir (Brelje & Martins, 2019; Gnadt et al., 2019; Verstraete, 2013).

Sıfır emisyonlu uçak teknolojilerinin yaygınlaşması yalnızca uçak üreticilerinin teknik ilerlemesine bağlı değildir. Bu dönüşümün başarılı olabilmesi için havalimanlarının elektrik şebekesi kapasitesi, hızlı şarj altyapısı, apron yerleşimi, enerji yönetim sistemi, yenilenebilir enerji kullanımı, hidrojen depolama/dağıtım olanakları ve yer hizmetleri ekipmanlarının elektrifikasyonu gibi alanlarda hazır hale gelmesi gerekmektedir. Bu nedenle havalimanı altyapısı, sıfır emisyonlu havacılık dönüşümünün pasif bir destek unsuru değil, dönüşümün doğrudan belirleyici bileşendir.

Literatürde elektrikli ve hidrojen temelli uçak teknolojilerine ilişkin çalışmalar önemli ölçüde artmış olsa da havalimanlarının bu teknolojilere yönelik altyapı hazırlık düzeyini karşılaştırmalı olarak değerlendiren araştırmalar görece sınırlıdır. Özellikle gelişmekte olan havacılık pazarlarında,

büyük havalimanlarının bu dönüşüme hangi düzeyde hazır olduğu ve enerji altyapısının hangi senaryolarda ne ölçüde zorlanacağı konusu daha fazla açıklığa ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışma, Türkiye'deki büyük havalimanlarını trafik yoğunluğu, operasyonel kapasite ve enerji altyapısı göstergeleri çerçevesinde değerlendirecek literatürdeki bu boşluğa katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Havacılıkta karbonsuzlaşma literatürü genel olarak üç eksen üzerinde yoğunlaşmaktadır: sürdürülebilir havacılık yakıtları, operasyonel verimlilik uygulamaları ve alternatif tahrik teknolojileri. Sürdürülebilir havacılık yakıtları mevcut uçak ve yakıt altyapısıyla uyumlu olması nedeniyle kısa vadede uygulanabilir bir seçenek sunarken, elektrikli ve hidrojen temelli sistemler daha yapısal bir dönüşümü temsil etmektedir (Lee et al., 2021; Schäfer et al., 2019).

Elektrikli uçak teknolojilerine ilişkin çalışmalar, bu araçların özellikle kısa menzilli ve bölgesel uçuşlarda çevresel fayda sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Gnadt ve arkadaşları (2019), küçük kapasiteli tamamen elektrikli banliyö uçaklarının teknik ve çevresel potansiyelini incelerken, Brelje ve Martins (2019) elektrikli, hibrit ve turbo elektrik sabit kanatlı uçakların tasarım yaklaşımlarını kapsamlı biçimde değerlendirmiştir. Ancak bu teknolojiler batarya enerji yoğunluğu, şarj süresi, menzil ve faydalı yük sınırlılıkları nedeniyle henüz tüm ticari operasyon profillerini kapsayacak olgunlukta değildir.

Hidrojen temelli uçak teknolojileri ise enerji yoğunluğu açısından önemli avantajlar sunsa da sıvı hidrojen depolama, güvenlik, yakıt ikmal altyapısı ve havalimanı operasyon prosedürleri bakımından ciddi hazırlık gerektirmektedir. Hidrojenin üretimi, depolanması, taşınması ve uçağa aktarılması, havalimanlarının mevcut yakıt altyapısının ötesinde yeni bir enerji ekosistemi kurmasını zorunlu kılmaktadır (Brewer, 1991; Verstraete, 2013).

Havalimanı altyapısı literatüründe enerji yönetimi, operasyonel kapasite, apron planlaması ve sürdürülebilirlik stratejileri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Havalimanları, yüksek enerji tüketimi, yoğun yolcu hareketleri ve karmaşık yer operasyonları nedeniyle sürdürülebilir havacılık politikalarının uygulanmasında kritik düğüm noktalarıdır (Graham, 2014; Upham, 2003). Elektrikli uçak operasyonlarının yaygınlaşması durumunda şarj gereksinimleri, uçuş çizelgeleme, pik güç talebi ve apron kaynak yönetimi üzerinde doğrudan etki yaratacaktır (Hou et al., 2021).

Mevcut çalışmaların önemli bir kısmı Avrupa ve Kuzey Amerika havalimanlarına odaklanmaktadır. Türkiye gibi hızlı büyüyen havacılık pazarlarında ise büyük havalimanlarının sıfır emisyonlu uçak operasyonlarına

yönelik hazırlık düzeyini inceleyen çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışma, Türkiye'deki büyük havalimanlarını karşılaştırmalı bir endeks ve senaryo temelli enerji analizi ile ele alarak hem akademik literatüre hem de havalimanı planlaması ve politika geliştirme süreçlerine katkı sunmaktadır.

3. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

3.1. Sıfır emisyonlu havacılık

Sıfır emisyonlu havacılık, uçuş operasyonlarından kaynaklanan karbon emisyonlarının azaltılmasını veya ortadan kaldırılmasını hedefleyen teknolojik, operasyonel ve altyapısal yaklaşımları ifade etmektedir. Bu kavram yalnızca uçak teknolojisiyle sınırlı değildir; enerji üretimi, havalimanı altyapısı, yer operasyonları ve düzenleyici çerçeveleri de kapsayan bütüncül bir dönüşüm sürecidir.

3.2. Havalimanı elektrifikasyonu

Havalimanı elektrifikasyonu; elektrikli uçak şarj sistemleri, elektrikli yer hizmetleri ekipmanları, apron enerji dağıtımı, terminal enerji yönetimi, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve depolama sistemlerini kapsayan çok boyutlu bir dönüşüm alanıdır. Elektrikli uçakların operasyonel hale gelmesi durumunda havalimanlarının yalnızca toplam elektrik tüketimi değil, aynı zamanda kısa süreli pik güç talebi de artacaktır. Bu nedenle elektrikli uçak altyapısı planlamasında enerji miktarı kadar şarj gücü, şebeke bağlantısı ve operasyon zamanlaması da dikkate alınmalıdır.

3.3. Havalimanı hazırlık düzeyi

Havalimanı hazırlık düzeyi, bir havalimanının yeni nesil sıfır emisyonlu uçak teknolojilerine uyum sağlayabilme kapasitesini ifade etmektedir. Bu kapasite; trafik yoğunluğu, operasyonel kapasite ve enerji altyapısı olmak üzere üç temel boyutta değerlendirilebilir. Trafik yoğunluğu gelecekteki enerji talebinin ölçeğini; operasyonel kapasite yeni teknolojilerin mevcut operasyonlara entegrasyon kabiliyetini; enerji altyapısı ise elektrik ve hidrojen temelli sistemlerin uygulanabilirliğini belirlemektedir.

3.4. Değerlendirme mantığı

Bu çalışmada hazırlık düzeyi, tek başına yüksek trafik hacmiyle eşitlenmemiştir. Yüksek trafik yoğunluğu, sıfır emisyonlu uçak teknolojilerine geçişte daha büyük enerji gereksinimi doğurabileceği için hem fırsat hem de altyapı baskısı anlamına gelmektedir. Bu nedenle endeks, trafik yoğunluğu

yanında operasyonel kapasite ve enerji altyapısı göstergelerini birlikte değerlendirmektedir.

4. YÖNTEM

Bu çalışma, Türkiye'deki büyük havalimanlarının sıfır emisyonlu uçak operasyonlarına yönelik altyapı hazırlık düzeyini değerlendirmek amacıyla nicel, karşılaştırmalı ve senaryo temelli bir araştırma tasarımına dayanmaktadır. Yöntem kapsamında endeks formülü, değişken tanımları, ağırlıklandırma yaklaşımı, sınıflandırma eşikleri ve enerji senaryosu varsayımları açık biçimde tanımlanmıştır.

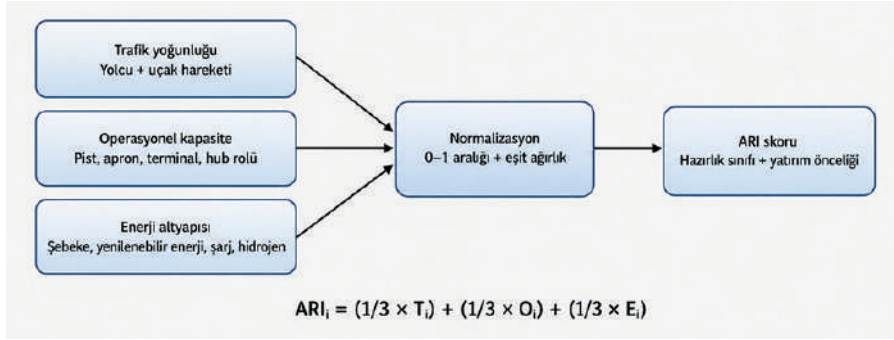
4.1. Araştırma tasarımı ve Havalimanı Hazırlık Endeksi (ARI)

Araştırmada havalimanlarının sıfır emisyonlu uçak operasyonlarına uyum sağlayabilme potansiyelini karşılaştırmak amacıyla Havalimanı Hazırlık Endeksi (Airport Readiness Index- ARI) kullanılmıştır. Endeks, üç ana bileşenden oluşmaktadır:

$$ARI_i = (w_T \times T_i) + (w_O \times O_i) + (w_E \times E_i)$$

Bu formülde ARI_i , i havalimanının hazırlık endeksini; T_i trafik yoğunluğu skorunu, O_i operasyonel kapasite skorunu; E_i enerji altyapısı skorunu, w_T , w_O ve w_E ise ilgili kriter ağırlıklarını göstermektedir. Bu çalışmada $w_T = w_O = w_E = 1/3$ olarak alınmıştır.

Eşit ağırlıklandırma tercihinin temel gerekçesi, Türkiye'deki havalimanları için şebeke kapasitesi, apron şarj alanı, trafo kapasitesi ve hidrojen depolama altyapısı gibi göstergelerin kamuya açık standartlaştırılmış veri setleri halinde bulunmamasıdır. Bu nedenle çalışma, ilk aşama karşılaştırmalı tarama ve önceliklendirme amacı taşıyan keşfedici bir model olarak kurgulanmıştır. Gelecek çalışmalarda uzman görüşüne dayalı Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), Entropi, CRITIC veya çok kriterli karar verme yöntemleriyle farklı ağırlıklandırmalar yapılabilir.



Şekil 1. Havalimanı Hazırlık Endeksi (ARI) değerlendirme modeli

Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

4.2. Araştırma örnekleme

Araştırmanın örneklemini Türkiye’de yüksek yolcu ve uçak trafiğine sahip beş büyük havalimanı oluşturmaktadır: İstanbul Havalimanı, Sabiha Gökçen Havalimanı, Antalya Havalimanı, Ankara Esenboğa Havalimanı ve İzmir Adnan Menderes Havalimanı. Bu havalimanlarının seçilmesinin nedeni, Türkiye’deki yolcu trafiğinin ve büyük ölçekli operasyonel hareketliliğin önemli bir bölümünü temsil etmeleridir.

4.3. Veri kaynakları ve değişkenler

Araştırmada kullanılan yolcu sayısı ve uçak hareketi değişkenleri Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü’nün havalimanları karşılaştırmalı istatistiklerinden derlenmiştir (DHMI, 2023). Enerji talebi senaryoları ise literatürdeki elektrikli uçak enerji tüketimi çalışmalarından hareketle oluşturulmuştur. Bu bölümde kullanılan veriler, mühendislik tasarım verisi değil; havalimanlarının dönüşüm önceliğini karşılaştırmak için kullanılan ikincil ve gösterge niteliğinde verilerdir.

Tablo 1. Analizde kullanılan değişkenler ve ölçüm yaklaşımı

Değişken	Ölçüm/hesaplama	Açıklama
Yolcu sayısı	Yıllık toplam yolcu	Trafik yoğunluğunun talep boyutunu gösterir.
Uçak hareketi	Yıllık toplam uçak hareketi	Operasyon ve enerji gereksiniminin doğrudan göstergesidir.
Trafik yoğunluğu skoru (T)	$0.50 \times \text{normalize yolcu} + 0.50 \times \text{normalize uçak hareketi}$	Yolcu ve uçak hareketi birlikte değerlendirilir.
Operasyonel kapasite skoru (O)	0-1 arası kapasite/işlevsellik puanı	Pist, apron, terminal, hub rolü ve operasyonel karmaşıklık dikkate alınır.
Enerji altyapısı skoru (E)	0-1 arası altyapı olgunluğu puanı	Şebeke, yenilenebilir enerji, apron şarj potansiyeli, yer hizmetleri elektrifikasyonu ve hidrojen olasılığı içerir.
Enerji talebi	$M_i \times s \times e_f$	M_i : uçak hareketi; s : elektrikli uçuş oranı; e_f : uçuş başına enerji tüketimi.

Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

4.4. Veri normalizasyonu ve sınıflandırma

Farklı ölçeklerdeki değişkenleri karşılaştırılabilir hale getirmek için min-max normalizasyon yöntemi kullanılmıştır:

$$X_i^* = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

Normalizasyon sonrasında her değişken 0 ile 1 arasında değer almıştır. Nitel sınıflandırmaların öznel görünmesini engellemek amacıyla hazırlık düzeyleri aşağıdaki sayısal eşiklere göre belirlenmiştir.

Tablo 2. ARI skorlarına göre hazırlık sınıfları

ARI skoru	Hazırlık sınıfı	Yorum
0,80-1,00	Çok yüksek	Öncelikli pilot uygulama ve yüksek ölçekli yatırım adayı
0,60-0,79	Yüksek	Kısa/orta vadede altyapı yatırımıyla güçlü uyum potansiyeli
0,50-0,59	Orta-yüksek	Seçilmiş altyapı yatırımlarıyla uyum potansiyeli
0,40-0,49	Orta	Kademeli dönüşüm ve kapasite geliştirme ihtiyacı
0,20-0,39	Orta-düşük	Altyapı planlaması ve veri toplama önceliği
0,00-0,19	Düşük	Temel hazırlık ve fizibilite aşaması

Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

4.5. Enerji altyapısı göstergeleri

Enerji altyapısı, yalnızca yolcu sayısı veya uçak hareketi üzerinden değerlendirilemeyeceği için elektrik şebekesi kapasitesi, yenilenebilir enerji entegrasyonu, apron şarj alanı potansiyeli, yer hizmetleri elektrifikasyonu ve hidrojen depolama/dağıtım olasılığı gibi alt göstergelerle birlikte ele alınmıştır. Bu göstergeler, kamuya açık ayrıntılı mühendislik verileri sağlandığında nicel hale getirilebilir.

Tablo 3. Enerji altyapısı alt göstergeleri

Alt gösterge	Önerilen ağırlık	Değerlendirme mantığı
Elektrik şebekesi ve trafo kapasitesi	%40	Yüksek güçlü uçak şarj sistemlerinin temel ön koşuludur.
Yenilenebilir enerji entegrasyonu	%20	Elektrikli uçuşların gerçek çevresel faydası için düşük karbonlu elektrik önemlidir.
Apron şarj alanı ve yerleşim potansiyeli	%15	Şarj ekipmanının uçak dönüş süresiyle uyumlu konumlandırılması gerekir.
Yer hizmetleri elektrifikasyonu	%15	Elektrikli GSE kullanımı, havalimanının elektrifikasyon olgunluğunu gösterir.
Hidrojen depolama/dağıtım olasılığı	%10	Uzun vadeli hidrojen uçak operasyonları için stratejik hazırlık unsurudur.

Kaynak: ACRP/elektrikli uçak altyapısı literatürü ve havalimanı enerji planlama yaklaşımı temel alınarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

4.6. Senaryo tabanlı enerji analizi

Elektrikli uçak operasyonlarının havalimanı enerji altyapısı üzerinde yaratabileceği olası yükü değerlendirmek amacıyla üç senaryo oluşturulmuştur: toplam uçuşların %10, %25 ve %50'sinin elektrikli uçuşa dönüşmesi. Enerji talebi aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$E_{s,i} = M_i \times s \times e_f$$

Bu formülde $E_{s,i}$, i havalimanının s senaryosundaki yıllık enerji talebini; M_i yıllık uçak hareketi sayısını, s elektrikli uçuş oranını; e_f ise uçuş başına ortalama enerji tüketimini göstermektedir. Çalışmada $e_f = 1,2$ MWh olarak alınmıştır. Bu değer, 1,0-1,5 MWh aralığında varsayılan küçük/bölgesel elektrikli uçak operasyonları için ortalama bir senaryo değeridir. Hesaplama, uzun menzilli dar gövdeli ticari uçakları değil, ilk aşamada elektrikli veya hibrit elektrikli bölgesel uçakların havalimanı altyapısı üzerindeki ölçek etkisini göstermeyi amaçlamaktadır.

Bu analizde şarj verim kaybı, pik güç talebi, uçak tipi farklılığı, batarya çevrim ömrü, dönüş süresi kısıtı ve eş zamanlı şarj sayısı ayrı ayrı modellenmemiştir. Dolayısıyla bulgular mühendislik projelendirmesi değil, altyapı planlaması için önceliklendirme ve senaryo okuması olarak değerlendirilmelidir.

4.7. Veri analizi

Veriler tanımlayıcı istatistikler, min-maks normalizasyon, endeks tabanlı karşılaştırma ve senaryo analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Endeks sonuçları havalimanlarının görece hazırlık düzeyini; senaryo analizi ise elektrikli uçak operasyonlarının yıllık enerji talebi üzerindeki potansiyel etkisini göstermektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Trafik yoğunluğu ve operasyonel hareketlilik

Araştırma kapsamında incelenen havalimanlarının yolcu sayısı ve uçak hareketi verileri Tablo 4'te sunulmaktadır. Bu iki gösterge hem mevcut operasyonel yoğunluğu hem de gelecekte elektrikli uçak şarj altyapısı için ortaya çıkabilecek enerji gereksiniminin ölçeğini göstermektedir.

Tablo 4. Türkiye'deki seçilmiş büyük havalimanlarının 2023 trafik göstergeleri

Havalimanı	Yolcu sayısı (2023)	Uçak hareketi (2023)
İstanbul Havalimanı	76.236.980	505.968
Sabiha Gökçen Havalimanı	37.107.847	214.000
Antalya Havalimanı	35.589.000	210.000
Ankara Esenboğa Havalimanı	12.912.000	94.000
İzmir Adnan Menderes Havalimanı	10.493.000	83.000

Kaynak: DHMİ havalimanları karşılaştırmalı istatistikleri temel alınarak yazarlar tarafından düzenlenmiştir.

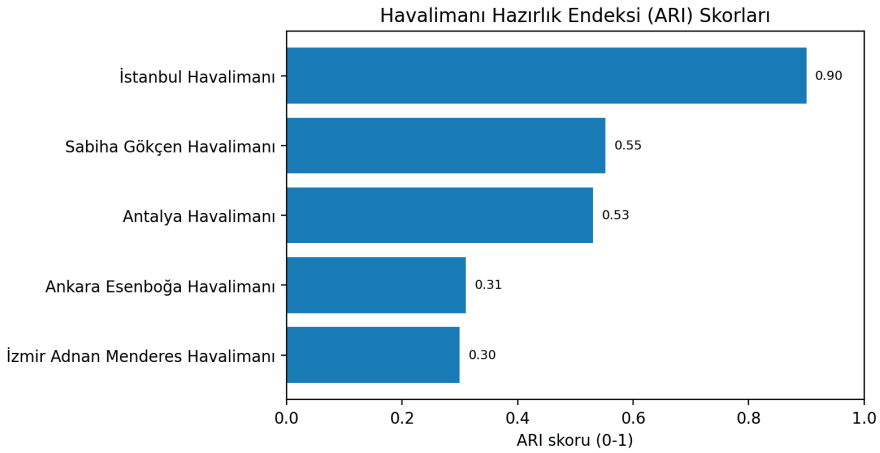
Tablo 4, İstanbul Havalimanı'nın hem yolcu sayısı hem de uçak hareketi bakımından örnekleme açık biçimde en yoğun havalimanı olduğunu göstermektedir. Sabiha Gökçen ve Antalya havalimanları da yüksek trafik hacimleri nedeniyle sıfır emisyonlu operasyon dönüşümünde öncelikli altyapı planlamasına ihtiyaç duyabilecek havalimanlarıdır. Ankara Esenboğa ve İzmir Adnan Menderes ise daha orta ölçekli trafik yapısına sahip olmakla birlikte, kademeli dönüşüm ve bölgesel elektrikli uçuş denemeleri için uygun alanlar sunabilir.

5.2. Havalimanı Hazırlık Endeksi (ARI) bulguları

Tablo 5. ARI bileşenleri ve hazırlık sınıfları

Havalimanı	Trafik skoru (T)	Operasyonel kapasite (O)	Enerji altyapısı (E)	ARI	Hazırlık sınıfı
İstanbul Havalimanı	1.00	1.00	0.70	0.90	Çok yüksek
Sabiha Gökçen Havalimanı	0.36	0.75	0.55	0.55	Orta-yüksek
Antalya Havalimanı	0.34	0.75	0.50	0.53	Orta-yüksek
Ankara Esenboğa Havalimanı	0.03	0.45	0.45	0.31	Orta-düşük
İzmir Adnan Menderes Havalimanı	0.00	0.45	0.45	0.30	Orta-düşük

Kaynak: Yazarlar tarafından hesaplanmıştır. Not: Enerji altyapısı skoru, kamuya açık ayrıntılı mühendislik verisi bulunmadığından gösterge/proxy yaklaşımıyla değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Havalimanı Hazırlık Endeksi (ARI) skorları

Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

ARI bulguları, İstanbul Havalimanı'nın çok yüksek hazırlık sınıfında yer aldığı göstermektedir. Bu sonuç, havalimanının yüksek trafik yoğunluğu ve operasyonel ölçeğiyle ilişkilidir. Bununla birlikte, yüksek ARI skoru altyapının tamamen hazır olduğu anlamına gelmemektedir; tersine, yüksek

trafik hacmi nedeniyle elektrikli uçak ve hidrojen altyapısı yatırımlarının daha büyük ölçekli planlanması gerektiğini göstermektedir. Sabiha Gökçen ve Antalya havalimanları orta-yüksek hazırlık sınıfında yer almakta; bu havalimanları için elektrik şebekesi kapasitesi, apron şarj noktaları ve yer hizmetleri elektrifikasyonu öncelikli yatırım alanları olarak öne çıkmaktadır.

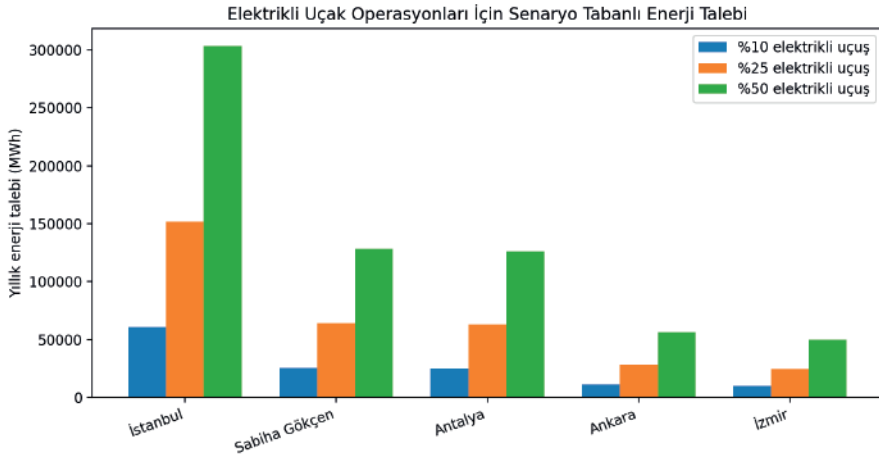
5.3. Senaryo tabanlı yıllık enerji talebi

Senaryo analizi, toplam uçuşların belirli oranlarda elektrikli uçuşa dönüşmesi durumunda havalimanlarının karşılaşılabileceği yıllık enerji talebini göstermektedir. Tablo 6'da %10, %25 ve %50 dönüşüm senaryoları sunulmuştur.

Tablo 6. Elektrikli uçak operasyonları için senaryo tabanlı yıllık enerji talebi

Havalimanı	Yıllık uçak hareketi	%10 elektrikli uçuş	Enerji (MWh)	%25 elektrikli uçuş	Enerji (MWh)	%50 elektrikli uçuş	Enerji (MWh)
İstanbul Havalimanı	505.968	50.597	60.716	126.492	151.790	252.984	303.581
Sabiha Gökçen Havalimanı	214.000	21.400	25.680	53.500	64.200	107.000	128.400
Antalya Havalimanı	210.000	21.000	25.200	52.500	63.000	105.000	126.000
Ankara Esenboğa Havalimanı	94.000	9.400	11.280	23.500	28.200	47.000	56.400
İzmir Adnan Menderes Havalimanı	83.000	8.300	9.960	20.750	24.900	41.500	49.800

Kaynak: Yazarlar tarafından hesaplanmıştır. Not: Uçuş başına ortalama 1,2 MWh enerji tüketimi varsayılmıştır.



Şekil 3. Elektrikli uçak operasyonları için senaryo tabanlı enerji talebi

Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 3, %10, %25 ve %50 elektrikli uçuş senaryolarını aynı grafikte göstermektedir. Buna göre %50 elektrikli uçuş senaryosunda İstanbul Havalimanı için yıllık enerji talebi yaklaşık 303.581 MWh düzeyine ulaşmaktadır. Sabiha Gökçen ve Antalya havalimanlarında da aynı senaryoda sırasıyla yaklaşık 128.400 MWh ve 126.000 MWh düzeyinde ek enerji gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Bu değerler, elektrikli uçak şarj altyapısının yalnızca toplam enerji tüketimi olarak değil, aynı zamanda eş zamanlı şarj kapasitesi ve pik güç yönetimi açısından da planlanması gerektiğini göstermektedir.

5.4. Enerji altyapısı açısından tartışma

Bulgular, sıfır emisyonlu uçak operasyonlarına hazırlık düzeyinin yalnızca trafik hacmiyle ölçülemeyeceğini göstermektedir. Bir havalimanı yüksek yolcu ve uçak trafiğine sahip olsa bile elektrik şebekesi kapasitesi, apron içi enerji dağıtımı, yenilenebilir enerji üretimi, enerji depolama ve hidrojen altyapısı gibi bileşenlerde yeterli hazırlık yoksa dönüşüm sürecinde darboğazlar oluşabilir.

Bu nedenle İstanbul Havalimanı gibi çok yüksek trafik yoğunluğuna sahip havalimanlarında kısa vadede elektrikli yer hizmetleri ekipmanları, güneş enerjisi entegrasyonu, enerji izleme sistemleri ve yüksek güçlü şarj pilot alanları öncelik kazanmalıdır. Sabiha Gökçen ve Antalya havalimanları için apron kapasitesi, yoğun sezon operasyonları ve pik saatlerde enerji yönetimi kritik önemdedir. Ankara ve İzmir gibi orta ölçekli havalimanları ise bölgesel elektrikli uçak pilot uygulamaları, düşük ölçekli şarj altyapısı testleri ve yer hizmetleri elektrifikasyonu açısından uygun geçiş alanları olarak değerlendirilebilir.

Hidrojen altyapısı ise elektrikli uçak altyapısına kıyasla daha uzun vadeli ve daha karmaşık bir yatırım alanıdır. Hidrojenin depolanması, güvenlik alanlarının belirlenmesi, yakıt ikmal prosedürleri ve düzenleyici çerçevenin netleşmesi gerektiğinden, bu alanda öncelikle fizibilite, risk analizi ve havalimanı master planlarına entegrasyon çalışmaları yapılmalıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Türkiye'deki büyük havalimanlarının sıfır emisyonlu uçak operasyonlarına yönelik altyapı hazırlık düzeyini Havalimanı Hazırlık Endeksi ve senaryo temelli enerji analizi aracılığıyla değerlendirmiştir. Kullanılan yöntem, ARI formülünü, değişkenleri, ağırlıklandırma yaklaşımını, sınıflandırma eşiklerini ve enerji senaryosu varsayımlarını açık biçimde ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgulara göre İstanbul Havalimanı'nın çok yüksek hazırlık önceliğine sahip olduğunu; Sabiha Gökçen ve Antalya havalimanlarının ise orta-yüksek düzeyde hazırlık potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Ankara Esenboğa ve İzmir Adnan Menderes havalimanları, daha düşük trafik yoğunlukları nedeniyle büyük ölçekli enerji baskısıyla daha geç karşılaşılabılır; ancak bu durum onları pilot uygulamalar için daha uygun ve yönetilebilir test alanları haline getirebilir. Çalışmanın en önemli sonucu, sıfır emisyonlu havacılık dönüşümünün yalnızca uçak teknolojisiyle sınırlandırılmayacağıdır. Elektrikli ve hidrojen temelli uçakların yaygınlaşması, havalimanlarının enerji altyapısının yeniden tasarlanmasını, apron operasyonlarının dönüştürülmesini ve çok paydaşlı yatırım stratejilerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu stratejiler havalimanlarında sıfır emisyonlu hava taşımacılığına geçişin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için aşamalı ve planlı bir dönüşüm sürecinin benimsenmesi gerekmektedir. Kısa vadede (1–3 yıl), enerji tüketiminin mevcut durumunu ortaya koymak amacıyla enerji envanterlerinin hazırlanması, elektrikli yer hizmetleri ekipmanlarının kullanımının yaygınlaştırılması, apronlarda şarj altyapısına yönelik pilot uygulamaların başlatılması ve güneş enerjisi yatırımlarının fizibilite çalışmalarının gerçekleştirilmesi öncelikli adımlar olarak öne çıkmaktadır. Orta vadede (3–7 yıl), artan elektrik talebini karşılayabilmek amacıyla yüksek güçlü şarj altyapılarının kurulması, trafo ve şebeke kapasitesinin güçlendirilmesi, enerji depolama sistemlerinin devreye alınması ve elektrikli bölgesel uçuşlara yönelik pilot uygulamaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu aşamada havalimanı işletmecileri, enerji dağıtım şirketleri ve havayolları arasında güçlü bir iş birliği sağlanması kritik önem taşımaktadır. Uzun vadede ise (7 yıl ve üzeri), hidrojen yakıtlı hava araçlarının kullanım potansiyeline yönelik depolama ve ikmal fizibilite çalışmalarının yürütülmesi, sıfır emisyonlu uçaklara yönelik altyapı gereksinimlerinin havalimanı master planlarına entegre edilmesi ve ulusal düzeyde teknik standartların geliştirilmesi hedeflenmelidir.

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, SHGM, DHMİ ve enerji otoritelerinin koordineli çalıştığı dönüşüm sürecinde, Türkiye'nin sürdürülebilir ve düşük karbonlu havacılık hedeflerine ulaşmasında belirleyici rol oynayacaktır. Gelecek çalışmalarda havalimanlarına ait gerçek elektrik şebekesi kapasitesi, trafo gücü, terminal enerji tüketimi, apron alanı, yenilenebilir enerji üretim kapasitesi ve hidrojen depolama fizibilitesi gibi ayrıntılı verilerle daha hassas birçok kriterli karar verme modeli kurulabilir. Ayrıca uçak tipi, rota mesafesi, doluluk oranı, şarj süresi ve pik güç talebi gibi operasyonel değişkenlerin dahil edildiği mühendislik tabanlı modeller, havalimanı altyapı planlamasının doğruluğunu artıracaktır.

Kaynakça

- Airbus. (2020). ZEROe: Towards the world's first zero-emission commercial aircraft. Airbus. <https://www.airbus.com/>
- Brelje, B. J., & Martins, J. R. R. A. (2019). Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: A review of concepts, models, and design approaches. *Progress in Aerospace Sciences*, 104, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.06.004>
- Brewer, G. D. (1991). *Hydrogen aircraft technology*. CRC Press.
- DHMI. (2023). Havalimanları karşılaştırmalı istatistikleri: Yolcu, uçak ve yük istatistikleri. Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü. <https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/Istatistikler.aspx>
- Gnadt, A. R., Speth, R. L., Sabnis, J. S., & Barrett, S. R. H. (2019). Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 105, 1-30.
- Graham, A. (2014). *Managing airports: An international perspective* (4th ed.). Routledge.
- Hepperle, M. (2012). Electric flight: Potential and limitations. In AVT-209 Workshop on Energy Efficient Technologies and Concepts Operation. NATO Science and Technology Organization.
- Hou, B., Bose, S., Marla, L., & Haran, K. (2021). Impact of aviation electrification on airports: Flight scheduling and charging. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2108.08963>
- IATA. (2026). Fly Net Zero. International Air Transport Association. <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/flynetzero/>
- ICAO. (2026). Long-term global aspirational goal (LTAG) for international aviation. International Civil Aviation Organization. <https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG>
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglestedt, J., Gettelman, A., De Leon, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J. E., Pitari, G., Prather, M. J., ... Wilcox, L. J. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
- Schäfer, A. W., Barrett, S. R. H., Doyme, K., Dray, L. M., Gnadt, A. R., Self, R., O'Sullivan, A., Synodinos, A. P., & Torija, A. J. (2019). Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft. *Nature Energy*, 4, 160-166. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0294-x>
- Upham, P. (2003). *Towards sustainable aviation*. Earthscan.

Verstraete, D. (2013). Long range transport aircraft using hydrogen fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(34), 14824-14831. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.021>

Helikopter Operasyonlarında Sürdürülebilirlik Paradoksu: Offshore ve Acil Sağlık Perspektifi

Hamza Ceylan¹

Özet

Helikopter operasyonlarında sürdürülebilirlik tartışmasını offshore enerji taşımacılığı ve helikopter acil sağlık hizmetleri (HEMS) bağlamında ele almaktadır. Helikopterler; dikey kalkış ve iniş, düşük irtifa uçuşu, askıda kalma kabiliyeti ve görev esnekliği sayesinde kritik hizmetlerin yürütülmesinde vazgeçilmez araçlardır. Bununla birlikte, bu operasyonel avantajlar yüksek enerji tüketimi, karbon emisyonu, gürültü etkisi ve toplumsal kabul sorunlarıyla birlikte değerlendirildiğinde sürdürülebilirlik açısından paradoksal bir yapı ortaya çıkmaktadır. Çalışmada sistematik literatür taraması yaklaşımı kullanılmış; Web of Science, Scopus ve TR Dizin veri tabanlarında 2010-2025 dönemine ait çalışmalar PRISMA 2020 akış mantığı doğrultusunda incelenmiştir. Tarama süreci; helikopter operasyonları, döner kanatlı hava araçları, sürdürülebilirlik, karbon emisyonu, enerji yoğunluğu, gürültü, offshore, HEMS, acil sağlık hizmetleri, kentsel hava hareketliliği ve elektrikli dikey kalkış-iniş araçları gibi anahtar kavramlar üzerinden yapılandırılmıştır. Analize dahil edilen 41 çalışma çevresel, operasyonel ve sosyal boyutlar altında tematik olarak değerlendirilmiştir. Bulgular, helikopter operasyonlarında çevresel sürdürülebilirlik hedeflerinin operasyonel zorunluluklarla sürekli etkileşim içinde olduğunu göstermektedir. Özellikle HEMS operasyonlarında hayat kurtarma önceliği, offshore operasyonlarda ise güvenlik ve zorlu çevresel koşullar sürdürülebilirlik uygulamalarının sınırlarını belirlemektedir. Çalışma, helikopter operasyonları için teknolojik dönüşüm, operasyonel optimizasyon ve sosyal kabul politikalarının birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

1 Öğr. Gör., Kapadokya Üniversitesi, Sivil Hava Ulaştırma İşletmeciliği (İngilizce), 50400, hamza.ceylan@kapadokya.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4242-0217

1. GİRİŞ

Havacılık sektörü, küresel hareketlilik ve ekonomik faaliyetler açısından stratejik bir rol üstlenirken, karbon emisyonları, gürültü kirliliği ve enerji tüketimi nedeniyle sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezinde yer almaktadır. Uluslararası iklim hedefleri, havacılığın yalnızca ticari yolcu taşımacılığı açısından değil, tüm operasyonel alt sistemleriyle birlikte çevresel etkilerini azaltmasını gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda sürdürülebilir havacılık, yakıt dönüşümü, operasyonel verimlilik, filo modernizasyonu, gürültü yönetimi ve yeni nesil tahrik teknolojilerini kapsayan bütüncül bir dönüşüm alanı olarak değerlendirilmektedir (Lee et al., 2021; Schäfer et al., 2019).

Sürdürülebilir havacılık literatürü büyük ölçüde sabit kanatlı hava araçları ve ticari yolcu taşımacılığı üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmalar çoğunlukla sürdürülebilir havacılık yakıtı (SAF), net sıfır hedefleri, elektrikli uçak teknolojileri ve operasyonel verimlilik uygulamalarını merkeze almaktadır. Buna karşılık, havacılık sisteminin kritik bir bileşeni olan helikopter operasyonları görece sınırlı biçimde ele alınmıştır. Oysa helikopterler, offshore enerji faaliyetlerinde personel ve ekipman taşımacılığı, acil sağlık hizmetlerinde hasta transferi, arama-kurtarma, afet yönetimi ve kamu güvenliği gibi yüksek toplumsal fayda üreten görevlerde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Helikopterlerin sürdürülebilirlik açısından özgün bir konuma sahip olmasının temel nedeni, operasyonel kabiliyetleri ile çevresel etkileri arasındaki gerilimdir. Dikey kalkış ve iniş, düşük irtifa uçuşu ve askıda kalma kabiliyeti, helikopterleri sabit kanatlı uçaklardan ayıran temel avantajlardır. Ancak bu kabiliyetler, özellikle askıda kalma ve kısa mesafeli görev profillerinde enerji tüketimini artırmakta; yakıt verimliliği, karbon emisyonu ve gürültü bakımından önemli sınırlılıklar ortaya çıkarmaktadır (Babikian et al., 2002; Filippone, 2012).

Offshore helikopter operasyonları, açık deniz petrol, doğal gaz ve yenilenebilir enerji tesislerine erişim sağlama işlevi nedeniyle güvenlik ve süreklilik açısından kritik bir hizmet sunmaktadır. Bu operasyonlar çoğu zaman uzun menzil, sınırlı alternatif iniş alanı, değişken meteorolojik koşullar ve yüksek güvenlik gereksinimleri altında yürütülmektedir. HEMS operasyonları ise zaman baskısı, hayat kurtarma önceliği ve şehir içi ya da bölgesel erişim gereksinimleri nedeniyle sürdürülebilirlik uygulamalarının en zor dengelendiği alanlardan biridir. Bu iki operasyon tipi, helikopter operasyonlarında sürdürülebilirlik paradoksunu görünür hale getirmektedir.

Bu bölüm, offshore ve HEMS operasyonlarını karşılaştırmalı biçimde ele alarak helikopter operasyonlarının çevresel, operasyonel ve sosyal

sürdürülebilirlik boyutlarını sistematik literatür taraması aracılığıyla değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, helikopter operasyonlarının yalnızca teknik bir emisyon sorunu olarak değil; görev profili, güvenlik önceliği, zaman baskısı, gürültü etkisi ve toplumsal kabul boyutlarıyla birlikte anlaşılması gerektiğini savunmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Havacılıkta sürdürülebilirlik literatürü, son yıllarda iklim değişikliği, karbon azaltımı ve enerji verimliliği tartışmalarıyla birlikte belirgin biçimde genişlemiştir. Lee ve arkadaşları (2021), havacılığın iklim etkisinin yalnızca karbon dioksit emisyonlarından ibaret olmadığını; azot oksitler, su buharı, partikül madde ve yoğunlaşma izleri gibi CO₂ dışı etkilerin de değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle havacılıkta sürdürülebilirlik, yalnızca yakıt tüketimini azaltma hedefiyle değil, daha geniş çevresel etki yönetimiyle ilişkilidir.

Helikopter operasyonları bu tartışmada özgün bir yere sahiptir. Sabit kanatlı hava araçlarıyla karşılaştırıldığında helikopterler, daha düşük aerodinamik verimlilik ve daha karmaşık görev profilleri nedeniyle enerji yoğunluğu yüksek operasyonlar gerçekleştirebilmektedir. Özellikle askıda kalma, dikey kalkış ve iniş ile düşük hızda manevra gerektiren görevler yakıt tüketimini artırmaktadır. Bu nedenle helikopter operasyonlarında sürdürülebilirlik, yalnızca daha temiz yakıt kullanımına indirgenemeyecek kadar çok boyutlu bir konudur (Filippone, 2012; Leishman, 2006).

Gürültü etkisi, helikopter operasyonlarında çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik arasındaki en belirgin kesişim alanlarından biridir. Helikopterler düşük irtifada çalıştıkları ve rotor kaynaklı karakteristik gürültü ürettikleri için özellikle şehir içi HEMS operasyonlarında ve yerleşim alanlarına yakın helikopter iniş-kalkış noktalarında toplumsal kabul sorunları yaratabilmektedir. Gürültünün uyku bozukluğu, stres ve kardiyovasküler sağlık riskleriyle ilişkisini ortaya koyan çalışmalar, helikopter operasyonlarının yalnızca teknik değil, halk sağlığı boyutuyla da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Basner et al., 2014; Guski et al., 2017).

Offshore operasyonlarda sürdürülebilirlik tartışması büyük ölçüde güvenlik, menzil, operasyon sürekliliği ve enerji tüketimi ekseninde gelişmektedir. Açık deniz tesislerine yapılan uçuşlar, hava koşullarına duyarlılık, sınırlı iniş alternatifi ve yüksek emniyet standartları nedeniyle yakıt optimizasyonunun her zaman öncelikli hedef olmasını engelleyebilmektedir. Bu nedenle offshore operasyonlarda sürdürülebilirlik, uçuş sayısının azaltılması ya da yalnızca

yakıt verimliliğiyle değil; görev planlaması, filo seçimi, bakım süreçleri, rota optimizasyonu ve helideck standartlarıyla birlikte ele alınmalıdır.

HEMS operasyonlarında ise sürdürülebilirlik tartışması daha karmaşıktır. Bu operasyonlarda temel amaç hızlı müdahale ve hasta yaşam şansını artırmaktır. Bu nedenle uçuşun gerekliliği, operasyon süresi, hastane helipadı erişimi, gürültü etkisi ve yakıt tüketimi birlikte değerlendirilmelidir. HEMS hizmetlerinin sosyal faydası yüksek olmakla birlikte, şehir merkezlerine yakın operasyonlarda gürültü ve emisyon etkileri daha görünür hale gelmektedir. Bu durum, sağlık hizmetlerine erişim ile çevresel-sosyal etkiler arasında hassas bir denge kurulmasını gerektirir.

Son yıllarda elektrikli ve hibrit tahrik sistemleri, elektrikli dikey kalkış-iniş araçları (eVTOL) ve kentsel hava hareketliliği (Urban Air Mobility - UAM) çalışmaları helikopter operasyonlarına alternatif ya da tamamlayıcı çözümler olarak değerlendirilmektedir. Bu teknolojiler daha düşük yerel emisyon ve potansiyel olarak daha düşük gürültü vaat etse de batarya enerji yoğunluğu, sertifikasyon, operasyon menzili, şarj altyapısı ve emniyet gereksinimleri gibi sınırlılıklar nedeniyle kısa vadede mevcut helikopter operasyonlarının tümünü ikame edebilecek olgunlukta değildir (Garrow et al., 2021; Straubinger et al., 2020).

Literatür genel olarak helikopter operasyonlarının sürdürülebilirlik açısından çevresel, operasyonel ve sosyal boyutların kesişiminde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Buna rağmen offshore ve HEMS operasyonlarını aynı analitik çerçevede karşılaştıran çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmak amacıyla sistematik literatür taraması ve tematik analiz yaklaşımını kullanmaktadır.

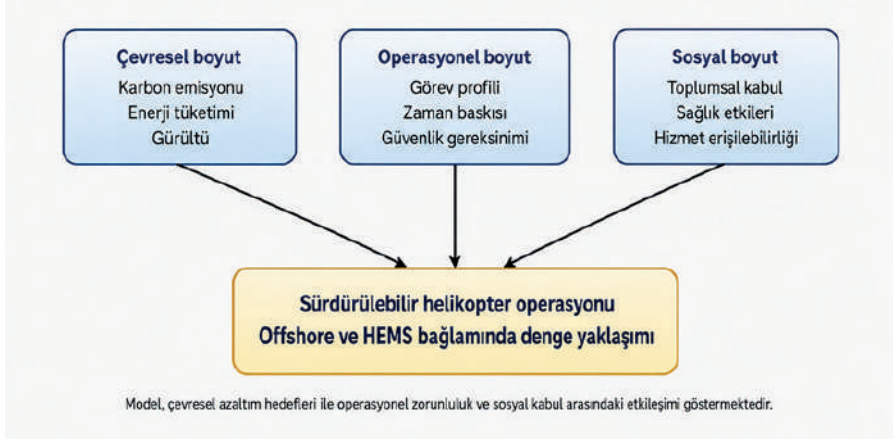
3. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Sürdürülebilirlik, yalnızca çevresel etkilerin azaltılmasıyla sınırlı olmayan; ekonomik uygulanabilirlik ve sosyal kabul boyutlarını da içeren çok boyutlu bir kavramdır. Üçlü performans yaklaşımı (triple bottom line), çevresel, ekonomik ve sosyal göstergelerin birlikte değerlendirilmesini vurgulamaktadır (Elkington, 1997). Helikopter operasyonları açısından bu yaklaşım; emisyon azaltımı, operasyonel maliyet, görev başarısı, emniyet ve toplumsal kabul arasında denge kurulmasını gerekli kılmaktadır.

Bu çalışmada helikopter operasyonlarının sürdürülebilirliği üç temel boyut üzerinden ele alınmaktadır. Birinci boyut çevresel boyuttur. Bu boyut karbon emisyonu, yakıt tüketimi, enerji yoğunluğu ve gürültü etkisini kapsamaktadır. İkinci boyut operasyonel boyuttur. Bu boyut görev profili, zaman baskısı, güvenlik gereksinimleri, rota planlaması, bakım ve filo uygunluğu gibi unsurları

içermektedir. Üçüncü boyut sosyal boyuttur. Bu boyut toplumsal kabul, sağlık etkileri, hizmete erişim ve operasyonların kamu yararıyla ilişkisini kapsamaktadır.

Helikopter operasyonlarında sürdürülebilirlik paradoksu, bu üç boyut arasındaki gerilimden doğmaktadır. Offshore operasyonlarda çevresel etkileri azaltma hedefi; menzil, güvenlik ve operasyon sürekliliği gereksinimleriyle sınırlanabilmektedir. HEMS operasyonlarında ise çevresel ve gürültü etkilerini azaltma hedefi; hayat kurtarma önceliği, hızlı müdahale ve sağlık hizmetine erişim gereksinimleriyle dengelenmek zorundadır.



Şekil 1. Helikopter Operasyonlarında Üç Boyutlu Sürdürülebilirlik Modeli

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 1'de görülen model, helikopter operasyonlarında sürdürülebilirliğin yalnızca emisyon azaltımı üzerinden açıklanamayacağını göstermektedir. Çevresel performans, operasyonel görev zorunlulukları ve sosyal kabul birlikte ele alındığında, offshore ve HEMS operasyonlarında farklı sürdürülebilirlik öncelikleri ortaya çıkmaktadır.

4. YÖNTEM

4.1. Araştırma Tasarımı

Helikopter operasyonlarının sürdürülebilirlik boyutlarını incelemek amacıyla sistematik literatür taraması yaklaşımıyla tasarlanmıştır. Araştırma süreci, PRISMA 2020 akış mantığına uygun olarak tanımlama, tarama, uygunluk değerlendirmesi ve dahil etme aşamalarından oluşmaktadır (Page

et al., 2021). Sistematik tarama sonucunda elde edilen çalışmalar tematik analiz yöntemiyle incelenmiştir.

4.2. Veri Tabanları ve Tarama Stratejisi

Literatür taraması Web of Science, Scopus ve TR Dizin veri tabanları üzerinden yürütülmüştür. Tarama dönemi 2010-2025 yılları arasındaki çalışmaları kapsamaktadır. İngilizce ve Türkçe yayınlar değerlendirmeye alınmıştır. Tarama stratejisinde hem helikopter operasyonlarını hem de sürdürülebilirlik boyutlarını yakalamak amacıyla genişletilmiş anahtar kelime seti kullanılmıştır.

Tablo 1. Literatür Tarama Stratejisi

Boyut	Kullanılan Anahtar Kelimeler
Araç/operasyon türü	helicopter operations, rotorcraft, rotary wing aircraft, medical helicopter, air ambulance, HEMS, helikopter operasyonları, döner kanatlı hava aracı
Sürdürülebilirlik boyutu	sustainability, environmental impact, carbon emission, energy intensity, energy efficiency, aviation noise, noise, gürültü, karbon emisyonu, enerji yoğunluğu
Operasyon bağlamı	offshore, emergency medical services, EMS, HEMS, urban air mobility, eVTOL, offshore operasyonlar, acil sağlık hizmetleri
Tarama aralığı	2010-2025; Türkçe ve İngilizce; hakemli dergi makaleleri ağırlıklı

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Temel arama dizgisi şu mantıkla yapılandırılmıştır: (helicopter operations OR rotorcraft OR rotary wing aircraft OR medical helicopter OR HEMS) AND (sustainability OR environmental impact OR carbon emission OR energy intensity OR aviation noise OR noise) AND (offshore OR emergency medical services OR EMS OR urban air mobility OR eVTOL). Türkçe literatürü kapsamak amacıyla helikopter operasyonları, döner kanatlı hava aracı, acil sağlık hizmetleri, gürültü ve karbon emisyonu gibi karşılıklar da taramaya dahil edilmiştir.

4.3. Dahil Etme ve Dışlama Kriterleri

Çalışmaların seçilmesinde aşağıdaki dahil etme ve dışlama kriterleri kullanılmıştır. Dahil etme kriterleri; hakemli dergilerde yayımlanmış çalışma olması, helikopter veya döner kanatlı hava araçlarıyla ilişkili olması, sürdürülebilirlik/çevresel etki/operasyonel verimlilik/gürültü boyutlarından en

az birini ele alması ve tam metnine erişilebilmesi olarak belirlenmiştir. Dışlama kriterleri ise yalnızca sabit kanatlı hava araçlarına odaklanan çalışmalar, konu ile doğrudan ilişkili olmayan yayınlar, konferans özetleri, editoryal yazılar, teknik broşürler ve tam metnine erişilemeyen çalışmalardır.

4.4. Kalite Değerlendirmesi

Tam metin incelemesine alınan çalışmalar metodolojik uygunluk ve içerik kalitesi açısından beş ölçüt üzerinden değerlendirilmiştir: (i) araştırma amacının açık tanımlanması, (ii) yöntem veya veri kaynağının şeffaf biçimde sunulması, (iii) helikopter/offshore/HEMS bağlamıyla doğrudan ilişki kurulması, (iv) çevresel, operasyonel veya sosyal sürdürülebilirlik boyutlarından en az birini analitik biçimde ele alması ve (v) bulguların veri, model ya da literatür dayanağıyla desteklenmiştir.

Tablo 2. Kalite Değerlendirme Ölçütleri

Ölçüt	Açıklama	Puan
Amaç açıklığı	Çalışmanın araştırma amacı ve kapsamı net biçimde belirtilmiştir.	0 = Hayır, 1 = Evet
Yöntem şeffaflığı	Kullanılan yöntem, veri kaynağı veya analiz yaklaşımı izlenebilir biçimde açıklanmıştır.	0 = Hayır, 1 = Evet
Konu uyumu	Çalışma helikopter, rotorcraft, offshore veya HEMS bağlamıyla doğrudan ilişkilidir.	0 = Hayır, 1 = Evet
Sürdürülebilirlik boyutu	Çevresel, operasyonel veya sosyal sürdürülebilirlik boyutlarından en az biri ele alınmıştır.	0 = Hayır, 1 = Evet
Bulguların dayanaklılığı	Sonuçlar veri, model, saha bulgusu veya güvenilir literatürle desteklenmiştir.	0 = Hayır, 1 = Evet

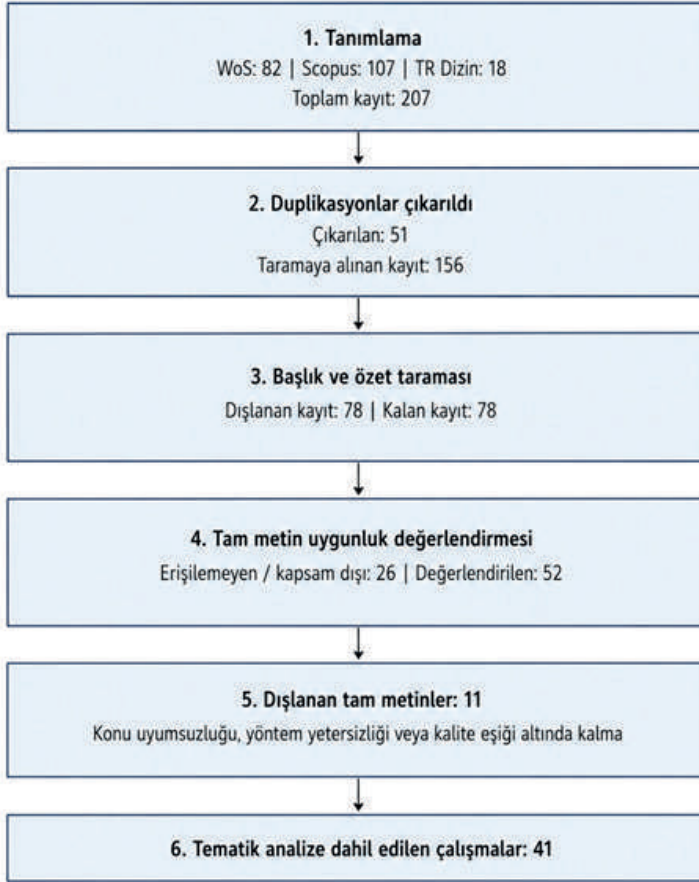
Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Her çalışma beş kalite ölçütü üzerinden değerlendirilmiştir. Ölçütün karşılanması durumunda 1, karşılanmaması durumunda 0 puan verilmiştir. Toplam puan 0 ile 5 arasında değişmektedir. Toplam puanı 4–5 olan çalışmalar yüksek kalite, 3 puan alan çalışmalar orta kalite, 0–2 puan alan çalışmalar ise düşük kalite olarak sınıflandırılmıştır.

4.5. PRISMA Süreci ve Veri Seçimi

Tarama sonucunda 207 kayıt belirlenmiştir. Duplikasyonların çıkarılmasının ardından 156 kayıt başlık ve özet düzeyinde incelenmiştir. Bu aşamada konu kapsamı dışında kalan 78 kayıt elenmiş ve 78 çalışma tam metin erişimi ve uygunluk açısından değerlendirilmiştir. Tam metnine erişilemeyen veya

kapsam dışı kalan 26 çalışma sonrasında 52 çalışma kalite değerlendirmesine alınmıştır. Kalite ve uygunluk değerlendirmesi sonucunda 41 çalışma tematik analize dahil edilmiştir.



Şekil 2. PRISMA 2020 Akış Diyagramı

Kaynak: Yazar tarafından PRISMA 2020 akış mantığı esas alınarak oluşturulmuştur.

Tablo 3. Literatür Tarama ve Seçim Süreci

Aşama	Açıklama	Sayı
Tanımlama	WoS veri tabanı sonuçları	82
Tanımlama	Scopus veri tabanı sonuçları	107
Tanımlama	TR Dizin sonuçları	18
Tanımlama	Toplam kayıt	207
Tarama	Duplikasyonlar çıkarıldıktan sonra kalan kayıt	156
Tarama	Başlık ve özet incelemesi sonrası kalan kayıt	78
Uygunluk	Kalite değerlendirmesine alınan çalışma	52
Dahil etme	Tematik analize dahil edilen çalışma	41

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

4.6. Tematik Analiz Süreci

Veri analizi sürecinde tematik analiz yöntemi kullanılmıştır. Kodlama süreci iki aşamalı olarak yürütülmüştür. İlk aşamada kavramsal çerçeveden hareketle tümdengelsel kodlar oluşturulmuş ve çalışmalar çevresel, operasyonel ve sosyal boyutlar altında sınıflandırılmıştır. İkinci aşamada çalışmaların bulgularından hareketle tümevarımsal alt kodlar geliştirilmiştir. Bu alt kodlar arasında karbon emisyonu, yakıt tüketimi, enerji yoğunluğu, rota optimizasyonu, görev esnekliği, zaman baskısı, gürültü etkisi, toplumsal kabul ve sağlık etkileri yer almaktadır. Kodlama süreci sonunda tekrar eden temalar birleştirilmiş ve offshore ile HEMS operasyonlarına ilişkin karşılaştırmalı değerlendirme yapılmıştır.

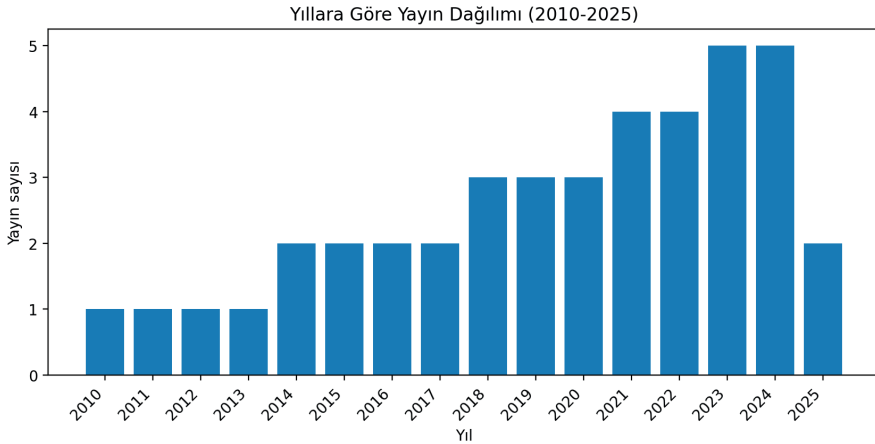
4.7. Araştırmanın Sınırlılıkları

Çalışma, WoS, Scopus ve TR Dizin veri tabanlarında yer alan Türkçe ve İngilizce çalışmalarla sınırlıdır. Ayrıca yalnızca tam metnine erişilebilen ve belirlenen kalite eşliğini karşılayan çalışmalar analize dahil edilmiştir. Helikopter teknolojileri, eVTOL sistemleri ve sürdürülebilir havacılık yakıtları hızla gelişen alanlar olduğundan, literatürdeki bulgular zaman içinde değişebilir. Bu nedenle sonuçlar, 2010-2025 dönemindeki literatürün sistematik bir sentezi olarak değerlendirilmelidir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Yıllara Göre Yayın Dağılımı

Analize dahil edilen çalışmaların yıllara göre dağılımı, helikopter operasyonları ve sürdürülebilirlik konularına yönelik akademik ilginin özellikle 2018 sonrasında arttığını göstermektedir. Bu artış, sürdürülebilir havacılık politikalarının güçlenmesi, kentsel hava hareketliliği ve eVTOL teknolojilerine yönelik araştırmaların çoğalmasıyla ilişkilendirilebilir.



Şekil 3. Yıllara Göre Yayın Dağılımı (2010-2025)

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

5.2. Tematik Analiz Bulguları

Tematik analiz sonucunda çalışmalar üç ana boyutta toplanmıştır: çevresel, operasyonel ve sosyal boyut. Çevresel boyut çalışmaların %70,7'sinde, operasyonel boyut %61,0'ında ve sosyal boyut %43,9'unda ele alınmıştır. Bu dağılım, literatürde çevresel boyutun daha güçlü temsil edildiğini; ancak sosyal boyutun görece sınırlı incelendiğini göstermektedir.

Tablo 4. Tematik Analiz Sonuçları

Tema	Alt Kategoriler	Çalışma Sayısı (n)	Yüzde (%)
Çevresel boyut	Karbon emisyonları, yakıt tüketimi, enerji yoğunluğu, gürültü	29	70,7
Operasyonel boyut	Görev esnekliği, zaman baskısı, operasyonel verimlilik, emniyet gereksinimi	25	61,0
Sosyal boyut	Toplumsal kabul, sağlık etkileri, hizmet erişilebilirliği, gürültü algısı	18	43,9

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

5.3. Çevresel Boyut

Çevresel boyut, incelenen çalışmalar içinde en yoğun biçimde ele alınan temadır. Bulgular, helikopter operasyonlarında yakıt tüketimi ve karbon emisyonunun özellikle kısa mesafeli, düşük irtifalı ve askıda kalma içeren görevlerde arttığını göstermektedir. Offshore operasyonlarda menzil ve hava koşulları, HEMS operasyonlarında ise hızlı müdahale gereksinimi enerji verimliliği uygulamalarının sınırlarını belirlemektedir.

Gürültü, çevresel boyutun sosyal etkilerle kesiştiği en kritik konudur. Helikopter gürültüsü, özellikle şehir içi HEMS operasyonlarında toplumsal kabulü azaltabilmektedir. Bu nedenle gürültü yönetimi yalnızca teknik bir emisyon azaltımı meselesi değil, aynı zamanda halk sağlığı ve hizmet kabulü açısından da stratejik bir konudur.

5.4. Operasyonel Boyut

Operasyonel boyut, helikopterlerin sağladığı görev esnekliği ile sürdürülebilirlik hedefleri arasındaki gerilimi açıklamaktadır. HEMS operasyonlarında zaman baskısı ve hayat kurtarma önceliği, yakıt optimizasyonu veya gürültü azaltımı gibi uygulamaların sınırlı düzeyde uygulanmasına neden olabilir. Offshore operasyonlarda ise zorlu meteorolojik koşullar, güvenlik prosedürleri ve uzak platformlara erişim gereksinimi operasyonel verimlilik üzerinde belirleyici olmaktadır.

Bu bulgu, helikopter operasyonlarında sürdürülebilirlik politikalarının standart ticari havacılık modellerinden farklı tasarlanması gerektiğini göstermektedir. Çünkü helikopter operasyonlarında uçuşların ertelenmesi, azaltılması veya farklı modlarla ikame edilmesi her zaman mümkün değildir. Bu nedenle sürdürülebilirlik yaklaşımı, görev iptali yerine görev planlaması,

rota optimizasyonu, filo uygunluğu, yakıt yönetimi ve bakım verimliliği gibi alanlarda geliştirilmelidir.

5.5. Sosyal Boyut

Sosyal boyut, literatürde çevresel ve operasyonel boyutlara kıyasla daha sınırlı ele alınmıştır. Ancak özellikle HEMS operasyonlarında sosyal boyut, çalışmanın en kritik tartışma alanlarından biridir. HEMS hizmetleri toplum sağlığı açısından yüksek fayda üretirken, şehir içi operasyonlarda gürültü ve yerleşim alanlarına yakın uçuşlar nedeniyle kabul sorunları oluşturabilir.

Offshore operasyonlarda sosyal boyut daha çok çalışan güvenliği, hizmet sürekliliği ve risk yönetimi üzerinden şekillenmektedir. Offshore personel taşımacılığında helikopterlerin sağladığı erişim avantajı, güvenli ve zamanında ulaşım bakımından önemli bir sosyal ve ekonomik değer üretmektedir. Bu nedenle sosyal boyut, yalnızca gürültü etkisiyle değil, kritik hizmetlerin sürekliliği ve toplumsal/kurumsal fayda ile değerlendirilmelidir.

5.6. Offshore ve HEMS Operasyonlarının Karşılaştırılması

Offshore ve HEMS operasyonları, helikopter sürdürülebilirliği açısından benzer çevresel sorunları paylaşmakla birlikte farklı operasyonel önceliklere sahiptir. Offshore operasyonlarda menzil, güvenlik ve hava koşulları öne çıkarken, HEMS operasyonlarında zaman baskısı, hasta yaşam şansı ve şehir içi toplumsal kabul daha belirleyicidir.

Tablo 5. Offshore ve HEMS Operasyonlarının Sürdürülebilirlik Açısından Karşılaştırılması

Karşılaştırma Boyutu	Offshore Operasyonlar	HEMS Operasyonları
Temel görev profili	Açık deniz platformlarına personel, ekipman ve lojistik erişim	Acil hasta transferi, olay yerine hızlı erişim ve kritik sağlık müdahalesi
Başlıca operasyonel baskı	Menzil, hava koşulları, helideck güvenliği, operasyon sürekliliği	Zaman baskısı, hayat kurtarma önceliği, hastane helipad erişimi
Çevresel baskı	Uzun uçuş segmentleri ve yüksek yakıt tüketimi	Kısa fakat yüksek frekanslı uçuşlar, şehir içi gürültü etkisi
Gürültü ve sosyal kabul	Genellikle açık deniz veya düşük nüfus yoğunluklu alanlarda daha sınırlı toplumsal etki	Yerleşim alanlarına yakın operasyonlar nedeniyle daha yüksek toplumsal duyarlılık

Teknolojik çözüm potansiyeli	Uzun menzil gereksinimi nedeniyle SAF, filo yenileme ve rota optimizasyonu daha uygulanabilir	Kısa menzil görevlerde hibrit-elektrik/eVTOL çözümleri daha erken uygulanabilir olabilir
Politika önceliği	Emniyet, bakım standardı, yakıt verimliliği ve platform erişim planlaması	Hizmet erişilebilirliği, gürültü yönetimi, uçuş gerekliliği değerlendirilmesi ve kamu iletişimi

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

5.7. Genel Değerlendirme

Bulgular, helikopter operasyonlarında sürdürülebilirlik hedeflerinin operasyonel gerçekliklerden bağımsız ele alınamayacağını göstermektedir. Sabit kanatlı ticari havacılıkta yakıt verimliliği, filo modernizasyonu ve SAF kullanımı gibi stratejiler merkezi bir konuma sahipken, helikopter operasyonlarında görev profili ve aciliyet düzeyi sürdürülebilirlik uygulamalarının sınırlarını doğrudan belirlemektedir.

Bu nedenle helikopter operasyonlarında sürdürülebilirlik dönüşümü çok katmanlı bir yaklaşım gerektirir. Kısa vadede rota optimizasyonu, bakım süreçlerinin iyileştirilmesi, yakıt yönetimi ve gürültü azaltıcı operasyon prosedürleri öne çıkmaktadır. Orta vadede hibrit-elektrik sistemler, SAF kullanımı ve düşük gürültülü rotor tasarımları önem kazanmaktadır. Uzun vadede ise eVTOL ve gelişmiş hava hareketliliği çözümleri belirli görev profillerinde mevcut helikopter operasyonlarını tamamlayıcı veya kısmen ikame edici rol üstlenebilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölüm, helikopter operasyonlarında sürdürülebilirlik paradoksunu offshore ve HEMS perspektifinden incelemiştir. Sistematik literatür taraması ve tematik analiz sonuçları, helikopter operasyonlarının çevresel, operasyonel ve sosyal boyutların kesişiminde şekillenen çok boyutlu bir sürdürülebilirlik yapısına sahip olduğunu göstermektedir.

Çevresel açıdan bakıldığında, yüksek yakıt tüketimi, karbon emisyonu ve gürültü etkisi helikopter operasyonlarının temel sorun alanlarıdır. Operasyonel açıdan ise görev esnekliği, zaman baskısı, emniyet gereksinimi ve erişilebilirlik helikopter kullanımını vazgeçilmez kılmaktadır. Sosyal açıdan ise HEMS operasyonlarının hayat kurtarma katkısı ve offshore operasyonlarının çalışan güvenliği açısından sağladığı değer, çevresel etkilerin tek başına karar kriteri olamayacağını göstermektedir.

Düzenleyici kurumlar için öneriler; helikopter operasyonlarına özgü emisyon ve gürültü izleme standartlarının geliştirilmesi, helipad ve helideck planlamasında sürdürülebilirlik ölçütlerinin güçlendirilmesi ve kritik görev operasyonlarında çevresel performansın emniyet gereksinimleriyle uyumlu biçimde ele alınmasıdır. Özellikle şehir içi HEMS operasyonlarında gürültü hassasiyet haritaları, uçuş koridorları ve kamu iletişim mekanizmaları önem taşımaktadır.

HEMS sağlayıcıları için öneriler; uçuş gerekliliği değerlendirme protokollerinin güçlendirilmesi, uygun vakalarda kara ambulansı-helikopter entegrasyonunun iyileştirilmesi, hastane helipad planlamasında gürültü azaltıcı yaklaşımın benimsenmesi ve görev sonrası yakıt/emisyon kayıtlarının düzenli izlenmesidir. Böylece hayat kurtarma önceliği korunurken çevresel ve sosyal etkiler daha sistematik biçimde yönetilebilir.

Offshore işletmeleri için öneriler; uçuş planlamasında rota ve yük optimizasyonunun artırılması, platform erişim planlarının meteorolojik risk ve yakıt verimliliğiyle birlikte değerlendirilmesi, filo yenileme süreçlerinde daha düşük emisyonlu helikopterlerin tercih edilmesi ve SAF kullanımının operasyonel uygunluk açısından pilot uygulamalarla test edilmesidir.

Helikopter operatörleri için öneriler; bakım süreçlerinde yakıt verimliliğini etkileyen performans göstergelerinin izlenmesi, pilot eğitimlerinde enerji verimli uçuş tekniklerine yer verilmesi, gürültü azaltıcı yaklaşma-kalkış prosedürlerinin geliştirilmesi ve hibrit-elektrik/eVTOL teknolojilerinin görev profili bazında değerlendirilmesidir.

Akademik çalışmalar açısından bakıldığında, helikopter operasyonlarının sosyal boyutuna ilişkin ampirik araştırmaların artırılması gerekmektedir. Özellikle HEMS operasyonlarında toplumsal kabul, gürültü algısı ve hizmet erişilebilirliği; offshore operasyonlarda ise güvenlik, çalışan refahı ve operasyonel sürdürülebilirlik konuları daha fazla incelenmelidir. Gelecekteki çalışmaların, offshore ve HEMS operasyonlarını karşılaştırmalı nicel modellerle değerlendirmesi ve eVTOL teknolojilerinin hangi görev profillerinde uygulanabilir olduğunu analiz etmesi literatüre önemli katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, helikopter operasyonlarının sürdürülebilirliği yalnızca teknolojik yeniliklerle çözülebilecek bir mesele değildir. Bu alan, operasyonel zorunlulukların, çevresel azaltım hedeflerinin, emniyet gereksinimlerinin ve toplumsal beklentilerin birlikte yönetildiği bütüncül bir dönüşüm sürecini gerektirmektedir.

Kaynakça

- Babikian, R., Lukachko, S. P., & Waitz, I. A. (2002). The historical fuel efficiency characteristics of regional aircraft from technological, operational, and cost perspectives. *Journal of Air Transport Management*, 8(6), 389-400. [https://doi.org/10.1016/S0969-6997\(02\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0969-6997(02)00020-0)
- Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., & Stansfeld, S. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925), 1325-1332. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)61613-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61613-X)
- Budd, L., & Ison, S. (2020). Responsible transport: A post-COVID agenda for transport policy and practice. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 6, 100151. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100151>
- Civil Aviation Authority. (2023). CAP 437: Standards for offshore helicopter landing areas. UK Civil Aviation Authority. <https://www.caa.co.uk/>
- Civil Aviation Authority. (2019). CAP 1264: Standards for helicopter landing areas at hospitals. UK Civil Aviation Authority. <https://www.caa.co.uk/>
- Dyllick, T., & Muff, K. (2016). Clarifying the meaning of sustainable business: Introducing a typology from business-as-usual to true business sustainability. *Organization & Environment*, 29(2), 156-174. <https://doi.org/10.1177/1086026615575176>
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. Capstone.
- European Commission. (2020). Reducing emissions from aviation. <https://climate.ec.europa.eu/>
- Filippone, A. (2012). *Advanced aircraft flight performance*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511996415>
- Garrow, L. A., German, B. J., & Leonard, C. E. (2021). Urban air mobility: A comprehensive review and comparative analysis with autonomous and electric ground transportation for informing future research. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 132, 103377. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103377>
- Gössling, S., & Humpe, A. (2020). The global scale, distribution and growth of aviation. *Global Environmental Change*, 65, 102194. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102194>
- Guski, R., Schreckenber, D., & Schuemer, R. (2017). WHO environmental noise guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and annoyance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1539. <https://doi.org/10.3390/ijerph14121539>
- International Air Transport Association. (2025). Sustainable aviation fuel. <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/sustainable-aviation-fuel/>

- International Civil Aviation Organization. (2022). Long-term global aspirational goal (LTAG) for international aviation. <https://www.icao.int/environmental-protection/>
- Larsson, J., Elofsson, A., Sterner, T., & Åkerman, J. (2019). International and national climate policies for aviation: A review. *Climatic Change*, 152, 381-395. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2311-3>
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglestedt, J., Gettelman, A., De León, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J. E., Pitari, G., Prather, M. J., ... Wilcox, L. J. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
- Leishman, J. G. (2006). *Principles of helicopter aerodynamics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Niemann, H., Linke, F., & Gollnick, V. (2022). Hybrid-electric propulsion in aviation: Concepts, challenges and opportunities. *Aerospace*, 9(4), 198. <https://doi.org/10.3390/aerospace9040198>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rutherford, D., & Zeinali, M. (2020). Efficiency trends for new commercial jet aircraft, 1960 to 2019. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/>
- Schäfer, A. W., Barrett, S. R. H., Doyme, K., Dray, L., Gnad, A. R., Self, R., O'Sullivan, A., Synodinos, A. P., & Torija, A. J. (2019). Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft. *Nature Energy*, 4, 160-166. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0294-7>
- Straubinger, A., Rothfeld, R., & Shamiyeh, M. (2020). An overview of current research and developments in urban air mobility: Setting the scene for UAM introduction. *CEAS Aeronautical Journal*, 11, 237-253. <https://doi.org/10.1007/s13272-019-00441-0>
- World Health Organization Regional Office for Europe. (2018). Environmental noise guidelines for the European Region. World Health Organization. <https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>

Düşük Maliyetli Havayollarının Karbon Ayak İzi ve Sürdürülebilir Turizm Üzerindeki Çelişkili Etkisi

Hamza Ceylan¹

Özet

Düşük maliyetli havayolu işletmeciliğinin bölgesel turizm talebi ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki çift yönlü etkisini Kapadokya örneği üzerinden incelemektedir. Düşük maliyetli havayolları, düşük fiyat, sık sefer ve noktadan noktaya ağ yapısı sayesinde destinasyon erişilebilirliğini artırmakta; bu durum özellikle denize kıyısı olmayan ve turizm talebi havayolu bağlantısına duyarlı olan iç bölge destinasyonlarında önemli bir ekonomik fırsat yaratmaktadır. Bununla birlikte, artan havayolu hareketliliği karbon emisyonu, yerel çevresel baskılar, ziyaretçi yoğunluğu ve taşıma kapasitesi tartışmalarını da beraberinde getirmektedir. Çalışmada Kayseri Erkilet (ASR) ve Nevşehir Kapadokya (NAV) havalimanlarının toplam yolcu trafiği, Kapadokya turizm talebini temsil eden ziyaretçi istatistikleri ve yolcu-kilometre temelli tahmini karbon emisyonu hesaplamaları birlikte değerlendirilmiştir. LCC etkisi, havayolu işletmeleri bazında ayrıştırılmış doğrudan bir etki olarak değil, bölgesel havayolu erişilebilirliğini temsil eden dolaylı bir gösterge olarak ele alınmıştır. COVID-19 pandemisinin olağan dışı etkisi nedeniyle 2020 ve 2021 yılları ana eğilim analizinin dışında tutulmuş, 2024 ve 2025 verileri ise eğilim değerlendirmesi kapsamında yorumlanmıştır. Bulgular, havayolu yolcu trafiği ile turizm talebi arasında paralel bir artış eğilimi olduğunu; ancak aynı dönemde tahmini karbon emisyonlarının da yükseldiğini göstermektedir. Bu sonuç, düşük maliyetli havayolu modelinin bölgesel turizm için erişilebilirlik avantajı yaratırken sürdürülebilir turizm yönetimi açısından çevresel ve yönetsel maliyetler oluşturabileceğine işaret etmektedir.

1 Öğr. Gör., Kapadokya Üniversitesi, Sivil Hava Ulaştırma İşletmeciliği (İngilizce), 50400, hamza.ceylan@kapadokya.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4242-0217

1. GİRİŞ

Havacılık sektörü, serbestleşme politikaları ve rekabetçi iş modellerinin yaygınlaşmasıyla birlikte küresel turizm hareketliliğinin en belirleyici bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Bu dönüşümün en görünür sonuçlarından biri, düşük maliyetli havayolu (Low-Cost Carrier - LCC) modelinin yaygınlaşmasıdır. LCC modeli; filo standardizasyonu, yüksek uçak kullanım oranı, doğrudan satış kanalları, hizmetlerin ayrıştırılması ve noktadan noktaya uçuş ağı gibi uygulamalarla maliyetleri azaltmakta ve daha geniş bir yolcu kitlesinin hava ulaşımına erişimini mümkün kılmaktadır (Button & Ison, 2008; Doganis, 2019; Francis et al., 2006).

Düşük maliyetli havayollarının turizm üzerindeki etkisi özellikle erişilebilirlik üzerinden açıklanmaktadır. Ulaşım maliyetlerinin düşmesi ve uçuş seçeneklerinin artması, daha önce sınırlı ulaşılabilirliğe sahip olan destinasyonların turizm pazarına daha güçlü biçimde dahil olmasına katkı sağlayabilmektedir. Bu süreç literatürde uyarılmış talep kavramı ile ilişkilendirilmekte; düşük fiyatların yalnızca mevcut talebi yeniden dağıtmadığı, aynı zamanda yeni seyahat talebi oluşturabildiği belirtilmektedir (Graham & Dennis, 2010).

Bununla birlikte, turizm talebindeki artış yalnızca ekonomik fayda üzerinden okunamaz. Havayolu bağlantısının güçlenmesi; karbon emisyonları, ziyaretçi yoğunluğu, yerel kaynak kullanımı, altyapı baskısı ve destinasyon taşıma kapasitesi gibi sürdürülebilirlik sorunlarını da görünür hale getirmektedir. Bu nedenle düşük maliyetli havayollarının etkisi, turizm büyümesi ile çevresel maliyet arasındaki denge üzerinden değerlendirilmelidir (Gössling & Peeters, 2007; Peeters et al., 2016).

Kapadokya bu tartışma için anlamlı bir örnek alan sunmaktadır. Bölge, denize kıyısı olmayan, kültürel miras ve doğa temelli turizm çekiciliklerine sahip, ulusal ve uluslararası ziyaretçi talebi yüksek bir destinasyondur. Kapadokya'ya erişimde Kayseri Erkilet ve Nevşehir Kapadokya havalimanları temel ulaşım düğümleri olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle havayolu erişilebilirliğindeki değişimler, destinasyonun turizm talebiyle yakından ilişkilidir. Ancak aynı erişilebilirlik artışı, karbon ayak izi ve sürdürülebilir turizm yönetimi açısından dikkatle ele alınması gereken bir büyüme baskısı yaratmaktadır.

Bu bölümün amacı, düşük maliyetli havayolu işletmeciliğinin bölgesel turizm talebi ve havayolu kaynaklı tahmini karbon emisyonları üzerindeki eş zamanlı etkilerini Kapadokya örneği üzerinden değerlendirmektir. Çalışmada LCC etkisi, havayolu işletmeleri bazında ayrıştırılmış kesin bir nedensel etki olarak değil, Kayseri Erkilet ve Nevşehir Kapadokya havalimanlarının toplam yolcu trafiği üzerinden temsil edilen bölgesel havayolu erişilebilirliği göstergesi

olarak ele alınmaktadır. Bu tercih, veri erişilebilirliği sınırlılığının açık biçimde tanımlandığı ölçülü bir analiz yaklaşımına dayanmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Düşük Maliyetli Havayolları ve Destinasyon Erişilebilirliği

Düşük maliyetli havayolu modeli, havacılık sektöründeki rekabetçi dönüşümün önemli bir sonucudur. Bu modelin temel mantığı, operasyonel süreçleri sadeleştirerek birim maliyetleri düşürmek ve bu maliyet avantajını yolculara daha düşük bilet fiyatları olarak yansıtmaktır. Filo homojenliği, yüksek uçak kullanım oranı, kısa dönüş süreleri, ikincil havalimanlarının kullanımı ve ek hizmetlerin ayrı ücretlendirilmesi LCC modelinin temel özellikleri arasında yer almaktadır (Francis et al., 2006).

Turizm literatüründe LCC'lerin en önemli etkisi destinasyon erişilebilirliğini artırmasıdır. Erişilebilirlik, bir destinasyona ulaşmanın zaman, maliyet ve bağlantı olanakları açısından ne ölçüde mümkün olduğunu ifade eder. Düşük bilet fiyatları ve daha fazla doğrudan bağlantı, özellikle fiyat duyarlılığı yüksek turist segmentleri için seyahat kararını kolaylaştırabilmektedir. Bu nedenle LCC modeli, yalnızca havacılık sektöründe bir maliyet stratejisi değil, aynı zamanda bölgesel turizm talebini şekillendiren yapısal bir faktör olarak değerlendirilmektedir (Dobruszkes, 2006; Vera-Rebollo & Ivars-Baidal, 2009).

Bununla birlikte, LCC etkisini ölçmek metodolojik olarak dikkat gerektirir. Bir havalimanının toplam yolcu trafiği, yalnızca düşük maliyetli havayolu yolcularından oluşmamaktadır. Tam hizmet veren havayolları, charter uçuşları, aktarmalı yolcular ve dönemsel tarifeli operasyonlar toplam yolcu verisinin içinde yer alabilir. Bu nedenle havalimanı toplam yolcu trafiği, LCC etkisinin doğrudan ölçümü olarak değil, bölgesel havayolu erişilebilirliği ve hava ulaşımı yoğunluğu için dolaylı bir gösterge olarak kullanılmalıdır.

2.2. Havacılık, Karbon Emisyonu ve Sürdürülebilir Turizm

Havacılık faaliyetleri, turizm sektörünün büyümesine katkı sağlamakla birlikte çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir baskı alanı oluşturmaktadır. Uçuş sayısı ve yolcu trafiği arttıkça yakıt tüketimi ve karbon emisyonu da artma eğilimi göstermektedir. Bu durum, özellikle havayolu erişilebilirliğine bağımlı destinasyonlarda turizm büyümesi ile çevresel maliyet arasındaki gerilimi güçlendirmektedir (Gössling & Peeters, 2007; Peeters et al., 2016).

Sürdürülebilir turizm yaklaşımı, ekonomik büyümenin çevresel koruma, sosyal denge ve kültürel mirasın korunmasıyla birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Bu bağlamda Kapadokya gibi kültürel miras yoğunluğu yüksek

destinasyonlarda havayolu kaynaklı talep artışı yalnızca ziyaretçi sayısı ve gelir üzerinden değil; taşıma kapasitesi, yerel yaşam kalitesi, doğal ve kültürel alanların korunması, atık yönetimi, su ve enerji kullanımı, trafik yoğunluğu ve aşırı turizm riski gibi çok boyutlu göstergeler üzerinden değerlendirilmelidir.

Bu nedenle düşük maliyetli havayollarının sürdürülebilir turizm üzerindeki etkisi çift yönlüdür. Bir yandan düşük fiyat ve erişilebilirlik avantajı turizm talebini destekleyebilir; diğer yandan yoğunlaşan ziyaretçi akışı çevresel baskıları ve karbon ayak izini artırabilir. Bu çift yönlü etki, LCC modelini sürdürülebilir turizm politikaları açısından kritik ancak dikkatle yönetilmesi gereken bir araç haline getirmektedir.

2.3. Araştırma Boşluğu

Mevcut literatürde LCC'lerin turizm talebi üzerindeki etkileri çoğunlukla erişilebilirlik, düşük fiyat ve bölgesel ekonomik katkılar çerçevesinde incelenmiştir. Havacılık kaynaklı karbon emisyonlarına ilişkin çalışmalar ise çoğu zaman turizm talebiyle bütünleşik bir çerçeve içinde ele alınmamaktadır. Bu durum, düşük maliyetli havayollarının yarattığı ekonomik fayda ile çevresel maliyet arasındaki ilişkinin birlikte değerlendirilmesi bakımından önemli bir boşluğa işaret etmektedir. Kapadokya özelinde daha önce yapılan çalışmada Ceylan ve Taş (2026), düşük maliyetli havayolu işletmeciliğinin Kayseri Erkilet (ASR) ve Nevşehir Kapadokya (NAV) havalimanları üzerinden destinasyon erişilebilirliğini artırdığını; sefer sıklığı ve rekabetçi fiyat yapısının bölgesel turizm talebini desteklediğini ortaya koymuştur. Ancak söz konusu çalışma, ağırlıklı olarak erişilebilirlik ve turizm talebi ilişkisine odaklanmış; havayolu kaynaklı karbon ayak izi, çevresel baskı ve sürdürülebilir turizm yönetimi boyutlarını sınırlı düzeyde ele almıştır. Bu nedenle mevcut bölüm, aynı destinasyon bağlamını korumakla birlikte önceki çalışmanın turizm gelişimi eksenli bulgularını karbon emisyonu ve erişilebilirlik-sürdürülebilirlik paradoksu üzerinden genişletmektedir.

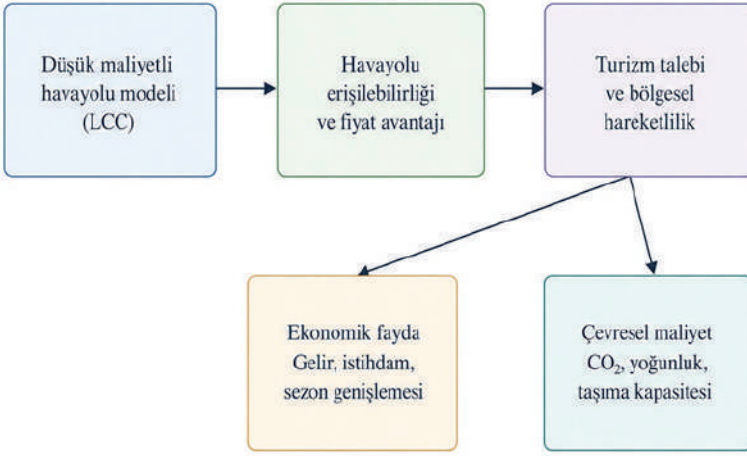
Bu çalışma, söz konusu boşluğu Kapadokya örneği üzerinden ele almakta ve havayolu erişilebilirliği, turizm talebi ve tahmini karbon emisyonu göstergelerini aynı analitik çerçevede değerlendirmektedir. Çalışmanın katkısı, LCC etkisini ölçülü bir yöntem diliyle ele alması ve nedensel iddialar yerine eğilimsel ve ilişkisel bir değerlendirme sunmasıdır.

3. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Bu çalışmanın kavramsal çerçevesi, düşük maliyetli havayolu modeli, destinasyon erişilebilirliği ve sürdürülebilir turizm arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. LCC modeli düşük maliyet ve fiyat avantajı aracılığıyla

havayolu erişilebilirliğini artırabilir. Artan erişilebilirlik, turizm talebi üzerinde destekleyici bir etki yaratabilir. Ancak aynı süreç, daha fazla yolcu hareketliliği ve uçuş yoğunluğu nedeniyle karbon emisyonu ve yerel çevresel baskıların artmasıyla sonuçlanabilir.

Bu bağlamda çalışmada ‘erişilebilirlik-sürdürülebilirlik paradoksu’ yaklaşımı benimsenmektedir. Bu paradoks, ulaşım erişilebilirliğinin artmasının destinasyon ekonomisini desteklemesi; buna karşılık aynı artışın çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik üzerinde baskı oluşturması durumunu ifade etmektedir. Kapadokya gibi hassas doğal ve kültürel miras alanlarında bu paradoks daha görünür hale gelmektedir.



Şekil 1. LCC Modeli, Erişilebilirlik ve Sürdürülebilir Turizm İlişkisi

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 1, LCC modelinin bu çalışmada doğrudan ayrıştırılmış bir nedensel değişken olarak değil, havayolu erişilebilirliği üzerinden yorumlanan bir mekanizma olarak ele alındığını göstermektedir. Bu yaklaşım, havalimanı toplam yolcu trafiği verilerinin sınırlılıklarını dikkate almakta ve bulguların daha ölçülü yorumlanmasına olanak sağlamaktadır.

4. YÖNTEM

4.1. Araştırma Tasarımı

Bu çalışma, Kapadokya bölgesinde havayolu erişilebilirliği, turizm talebi ve tahmini karbon emisyonu arasındaki ilişkileri incelemek amacıyla

nicel, tanımlayıcı ve karşılaştırmalı bir araştırma tasarımına dayanmaktadır. Araştırmada zaman serisi mantığıyla yıllık veriler kullanılmış; değişkenler arasındaki eğilimler tablo ve grafikler aracılığıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma nedensellik testi yapmamakta; bu nedenle bulgular korelasyonel/eğilimsel ilişkilere dayalı olarak yorumlanmaktadır.

4.2. Araştırma Alanı ve Kapsam

Araştırma alanı olarak Kapadokya destinasyonu seçilmiştir. Kapadokya, kültürel miras, doğa temelli turizm ve uluslararası tanınırlık açısından Türkiye'nin önemli iç bölge destinasyonlarından biridir. Bölgenin havayolu erişilebilirliği büyük ölçüde Kayseri Erkilet (ASR) ve Nevşehir Kapadokya (NAV) havalimanları üzerinden sağlanmaktadır. Bu nedenle çalışmada iki havalimanının toplam yolcu trafiği, Kapadokya'ya yönelik havayolu erişilebilirliği için bölgesel düzeyde bir gösterge olarak kullanılmıştır.

4.3. Değişkenler ve Ölçüm Yaklaşımı

Çalışmada üç temel değişken kullanılmaktadır: havayolu yolcu trafiği, turizm talebi ve tahmini karbon emisyonu. Havayolu yolcu trafiği, ASR ve NAV havalimanlarının toplam yolcu sayılarının yıllık toplamı olarak ele alınmıştır. Turizm talebi, Kapadokya bölgesindeki müze ve ören yeri ziyaretçi istatistikleri üzerinden temsil edilmiştir. Tahmini karbon emisyonu ise yolcu sayısı, ortalama uçuş mesafesi ve yolcu-kilometre başına emisyon faktörü kullanılarak hesaplanmıştır.

LCC etkisinin ölçümü konusunda veri sınırlılığı bulunmaktadır. Havalimanı düzeyindeki toplam yolcu verileri, düşük maliyetli havayolu yolcularını tam hizmet veren havayolu, charter veya diğer tarifeli yolculardan ayırmamaktadır. Bu nedenle bu çalışma, LCC etkisini doğrudan ayrıştırılmış bir değişken olarak değil; düşük maliyetli havayolu modelinin bölgesel erişilebilirliği artırma potansiyeli bağlamında, toplam havayolu erişilebilirliği üzerinden yorumlanmaktadır. Gelecek çalışmalarda havayolu şirketi, rota, frekans, fiyat ve koltuk kapasitesi düzeyinde veri kullanılarak LCC etkisi daha net ayrıştırılabilir.

Tablo 1. Araştırmada Kullanılan Değişkenler ve Operasyonel Tanımlar

Değişken	Operasyonel tanım	Yorum sınırı
Havayolu yolcu trafiği	ASR ve NAV havalimanlarının yıllık toplam yolcu sayısı	LCC etkisini doğrudan değil, bölgesel havayolu erişilebilirliğini dolaylı temsil eder.
Turizm talebi	Kapadokya müze/ören yeri ziyaretçi istatistikleri	Konaklama, günübirlik ziyaret ve harcama verilerini bütünüyle kapsamaz.
Tahmini karbon emisyonu	Yolcu sayısı \times ortalama mesafe \times emisyon faktörü	Uçak tipi, doluluk oranı ve rota bazlı operasyon farklarını ayrıntılı olarak içermez.

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

4.4. Veri Kaynakları

Havalimanı yolcu trafiği verileri Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMI) tarafından yayımlanan havalimanı istatistiklerinden derlenmiştir. Turizm talebine ilişkin ziyaretçi verileri ise T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı ve ilgili müze/ören yeri istatistikleri temel alınarak değerlendirilmiştir. Kullanılan veriler ikincil veri niteliğindedir. Bu nedenle çalışma, mevcut istatistiklerin kapsamı ve sınıflandırma biçimiyle sınırlıdır.

Ziyaretçi istatistikleri, Kapadokya'daki turizm hareketliliğini temsil eden anlamlı bir gösterge olmakla birlikte, bölgedeki tüm turistik hareketliliği eksiksiz biçimde yansıtmayabilir. Konaklama verileri, ortalama kalış süresi, harcama düzeyi ve ziyaretçi milliyeti gibi değişkenler bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Bu nedenle bulgular, turizm talebinin genel eğilimini açıklayan makro düzey göstergeler olarak değerlendirilmelidir.

Tablo 2. Veri Kaynakları ve Analiz Kapsamı

Veri türü	Kaynak	Kapsam
Yolcu trafiği	DHMI havalimanı istatistikleri	Kayseri Erkilet ve Nevşehir Kapadokya havalimanları yıllık toplam yolcu verileri
Turizm talebi	T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı / DÖSİM istatistikleri	Kapadokya müze ve ören yeri ziyaretçi eğilimleri
Karbon emisyonu	Literatürden uyarlanan yolcu-kilometre temelli hesaplama	Makro düzey tahmini CO ₂ emisyonu

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

4.5. Karbon Emisyonu Hesaplama Yöntemi

Tahmini karbon emisyonları aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$CO_2 \text{ Emisyonu (ton)} = [\text{Yolcu Sayısı} \times \text{Ortalama Uçuş Mesafesi (km)} \times \text{Emisyon Faktörü (kg CO}_2\text{/pkm)}] / 1000$$

Bu çalışmada ortalama uçuş mesafesi 800 km, emisyon faktörü ise 0,115 kg CO₂/yolcu-km olarak kabul edilmiştir. Emisyon faktörü yolcu-kilometre temelli olduğu için ortalama doluluk oranı katsayısı ayrıca formüle eklenmemiştir. Bununla birlikte, bu yaklaşım uçak tipi, motor verimliliği, uçuş doluluk oranı, rota profili, iniş-kalkış çevrimi ve aktarma yapısı gibi ayrıntıları kapsamadığından sonuçlar doğrudan ölçülmüş emisyonlar değil, karşılaştırmalı eğilim analizi için kullanılan tahmini değerlerdir.

Örneğin 2014 yılı için hesaplama şu şekildedir:

$$CO_2 = [2.042.846 \times 800 \times 0,115] / 1000 = 187.940 \text{ ton}$$

4.6. COVID-19 Dönemi ve Veri Sınırlılıkları

Araştırma dönemi 2014-2025 aralığını kapsamaktadır. Ancak COVID-19 pandemisinin havacılık ve turizm faaliyetlerinde olağan dışı kırılmalar yaratması nedeniyle 2020 ve 2021 yılları ana eğilim analizine dahil edilmemiştir. Bu yıllar, normal piyasa koşullarını temsil etmediği için karşılaştırmalı eğilimi bozabilecek uç değerler olarak değerlendirilmiştir. 2024 ve 2025 yıllarına ilişkin veriler ise mevcut istatistiklerin niteliğine göre eğilim bazlı yorumlanmış ve kesin nedensel sonuçlar üretmek amacıyla kullanılmamıştır.

4.7. Veri Analiz Yöntemi

Veri analizi sürecinde tanımlayıcı istatistikler, karşılaştırmalı tablo analizi ve grafiksel eğilim analizi kullanılmıştır. Havayolu yolcu trafiği ile turizm talebi arasındaki ilişki, paralel eğilimler üzerinden yorumlanmıştır. Bu nedenle çalışmada ‘neden olmuştur’, ‘kanıtlamaktadır’ veya ‘doğrudan artırmıştır’ gibi nedensellik ifade eden kesin yargılardan kaçınılmış; bunun yerine ‘ilişkili görünmektedir’, ‘paralel eğilim göstermektedir’ ve ‘desteklediği değerlendirilmektedir’ gibi ölçülü ifadeler tercih edilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Havayolu Trafiği ve Turizm Talebi Eğilimi

Kapadokya bölgesine hizmet veren Kayseri Erkilet ve Nevşehir Kapadokya havalimanlarının toplam yolcu trafiği ile bölgesel turizm talebini temsil eden

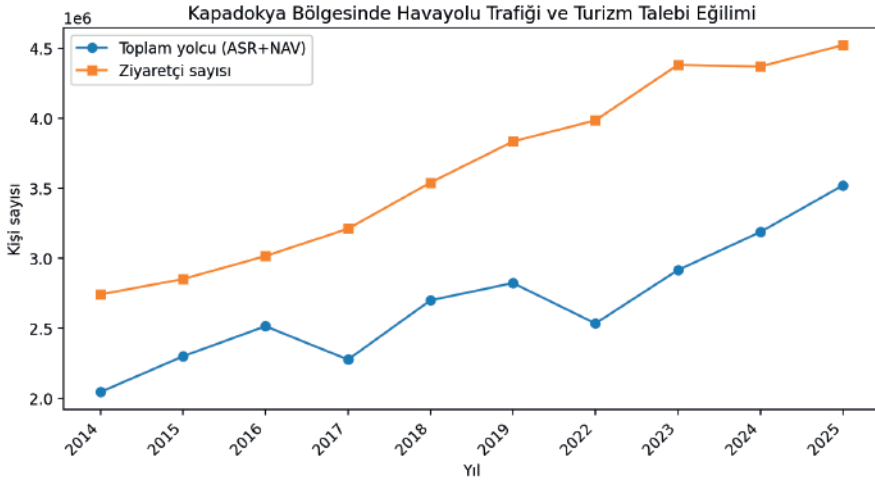
ziyaretçi sayıları Tablo 3'te sunulmaktadır. 2020 ve 2021 yılları, COVID-19 pandemisinin olağan dışı etkisi nedeniyle ana eğilim tablosuna dahil edilmemiştir.

Tablo 3. Kapadokya Bölgesi Hava yolu Trafiği ve Turizm Talebi (2014-2025)

Yıl	Toplam yolcu (ASR+NAV)	Ziyaretçi sayısı
2014	2.042.846	2.741.000
2015	2.298.123	2.850.000
2016	2.512.908	3.015.000
2017	2.274.320	3.210.000
2018	2.698.411	3.540.000
2019	2.821.863	3.834.000
2022	2.532.741	3.985.000
2023	2.914.629	4.382.000
2024	3.187.000	4.370.000
2025	3.519.751	4.523.000

Kaynak: DHMİ ve T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı/DÖSİM verilerinden yararlanılarak yazar tarafından oluşturulmuştur. 2020-2021 pandemi etkisi nedeniyle ana eğilim analizinden çıkarılmıştır.

Tablo 3 incelendiğinde, 2014-2019 döneminde hava yolu yolcu trafiği ile ziyaretçi sayılarının genel olarak artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Pandemi sonrası dönemde de her iki göstergede toparlanma gözlenmektedir. Bu durum, Kapadokya gibi hava yolu erişilebilirliğine duyarlı iç bölge destinasyonlarında hava yolu bağlantısının turizm talebiyle ilişkili olduğunu düşündürmektedir. Ancak bu bulgu doğrudan nedensellik olarak değil, makro düzeyde paralel bir eğilim olarak yorumlanmalıdır.



Şekil 2. Kapadokya Bölgesinde Havayolu Trafiği ve Turizm Talebi Eğilimi

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 2, havayolu yolcu trafiği ile ziyaretçi sayıları arasında genel olarak benzer yönlü bir hareket olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte ziyaretçi sayıları yalnızca havayolu trafiğiyle açıklanamaz. Karayolu erişimi, turizm tanıtımı, döviz kuru, konaklama kapasitesi, güvenlik algısı, uluslararası pazar koşulları ve kültürel miras çekicilikleri de turizm talebini etkileyen önemli faktörlerdir.

5.2. LCC Etkisinin Yorumlanması

Çalışmanın temel sınırlılıklarından biri, havalimanı toplam yolcu trafiği verilerinin LCC yolcularını diğer havayolu yolcularından ayırmamasıdır. Bu nedenle ASR ve NAV toplam yolcu verileri doğrudan LCC etkisi olarak değerlendirilmemelidir. Bunun yerine bu veriler, Kapadokya'nın havayolu erişilebilirliğindeki genel yoğunlaşmayı ve hava ulaşımının turizm talebiyle ilişkisini göstermektedir.

Bu yaklaşım, LCC modelinin kuramsal etkisini tamamen dışlamamakta; ancak ampirik yorumda daha dikkatli bir dil kullanılmasını gerektirmektedir. Düşük maliyetli havayollarının bölgesel turizm talebini destekleme potansiyeli, özellikle fiyat duyarlılığı yüksek yolcular ve kısa süreli kültür turizmi hareketleri açısından anlamlıdır. Ancak bu potansiyelin doğrudan ölçülebilmesi için rota bazlı uçuş frekansı, havayolu şirketi türü, koltuk kapasitesi, ortalama bilet fiyatı ve doluluk oranı gibi ayrıntılı verilere ihtiyaç bulunmaktadır.

5.3. Tahmini Karbon Emisyonları

Havayolu trafiğindeki artışın çevresel yansımalarını değerlendirmek amacıyla yolcu-kilometre temelli tahmini karbon emisyonları hesaplanmıştır. Tablo 4'te sunulan değerler doğrudan ölçülmüş emisyonlar değil, karşılaştırmalı eğilim analizi için kullanılan tahmini değerlerdir.

Tablo 4. Kapadokya Bölgesi Tahmini Karbon Emisyonları (2014-2025)

Yıl	Toplam yolcu	Ortalama mesafe (km)	Emisyon faktörü (kg CO ₂ /pkm)	Tahmini CO ₂ (ton)
2014	2.042.846	800	0,115	187.942
2015	2.298.123	800	0,115	211.427
2016	2.512.908	800	0,115	231.188
2017	2.274.320	800	0,115	209.237
2018	2.698.411	800	0,115	248.254
2019	2.821.863	800	0,115	259.611
2022	2.532.741	800	0,115	233.012
2023	2.914.629	800	0,115	268.146
2024	3.187.000	800	0,115	293.204
2025	3.519.751	800	0,115	323.817

Kaynak: Yazar tarafından yapılan hesaplamalara dayanmaktadır. Hesaplamalarda 800 km ortalama mesafe ve 0,115 kg CO₂/pkm emisyon faktörü varsayılmıştır.

Tablo 4'e göre, yolcu trafiğindeki artışa paralel olarak tahmini karbon emisyonları da artış eğilimi göstermektedir. 2014 yılında yaklaşık 187.940 ton olarak hesaplanan tahmini emisyon, 2025 eğilim verisinde yaklaşık 323.817 ton düzeyine yükselmektedir. Bu artış, havayolu erişilebilirliğinin turizm talebini destekleyici yönüyle birlikte çevresel maliyetleri de artırabileceğini göstermektedir.



Şekil 3. Kapadokya Bölgesi Havayolu Kaynaklı Tahmini Karbon Emisyonları

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 3, tahmini karbon emisyonlarının yıllar itibarıyla artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, düşük maliyetli havayolu modelinin sürdürülebilir turizm açısından yalnızca erişilebilirlik ve ekonomik katkı yönüyle değil, aynı zamanda karbon ayak izi ve çevresel baskı boyutuyla da değerlendirilmesi gerektiğini desteklemektedir.

5.4. Sürdürülebilir Turizm Açısından Değerlendirme

Kapadokya örneğinde havayolu erişilebilirliğinin artması, destinasyonun ziyaretçi çekme kapasitesini güçlendirebilir. Ancak sürdürülebilir turizm açısından temel mesele yalnızca ziyaretçi sayısının artması değildir. Ziyaretçi yoğunluğunun mekânsal dağılımı, kültürel miras alanlarının korunması, yerel halkın yaşam kalitesi, doğal peyzaj üzerindeki baskılar, ulaşım kaynaklı emisyonlar, atık yönetimi ve su kullanımı gibi göstergeler de turizm büyümesinin niteliğini belirlemektedir.

Bu çerçevede, düşük maliyetli havayollarının yarattığı erişilebilirlik avantajı taşıma kapasitesi yönetimiyle birlikte ele alınmalıdır. Aksi halde daha fazla uçuş ve daha fazla ziyaretçi, kısa vadede ekonomik canlılık yaratırken uzun vadede destinasyon kalitesi, kültürel mirasın korunması ve yerel çevresel sürdürülebilirlik üzerinde baskı oluşturabilir. Bu nedenle Kapadokya gibi hassas destinasyonlarda havayolu büyümesi ile destinasyon yönetimi arasında koordineli bir planlama yaklaşımı gereklidir.

Bulgular genel olarak, havayolu erişilebilirliği ile turizm talebi arasında anlamlı bir eğilimsel ilişki olduğunu; ancak bu ilişkinin çevresel maliyetlerle birlikte yönetilmesi gerektiğini göstermektedir. Dolayısıyla LCC modelinin bölgesel turizm için olumlu katkıları, karbon azaltım stratejileri, sürdürülebilir ulaşım entegrasyonu ve destinasyon bazlı ziyaretçi yönetimi politikalarıyla desteklenmelidir.

6. SONUÇ VE POLİTİKA ÖNERİLERİ

Bu bölüm, düşük maliyetli havayolu işletmeciliğinin bölgesel turizm talebi ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki çift yönlü etkisini Kapadokya örneği üzerinden değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, havayolu yolcu trafiği ile turizm talebi arasında genel olarak paralel bir eğilim bulunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte aynı dönemde tahmini karbon emisyonlarının da artması, havayolu kaynaklı turizm büyümesinin çevresel maliyetler üretebileceğini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın temel katkısı, LCC etkisini doğrudan nedensel bir sonuç gibi sunmak yerine havayolu erişilebilirliği bağlamında ölçülü biçimde tartışmasıdır. ASR ve NAV toplam yolcu trafiği, LCC yolcularını ayrı göstermediği için bulgular doğrudan LCC etkisi olarak değil, bölgesel havayolu erişilebilirliği ile turizm talebi arasındaki ilişkiyi gösteren makro düzey eğilimler olarak değerlendirilmelidir.

Sürdürülebilir turizm açısından bu sonuçlar, havayolu erişilebilirliğinin ekonomik faydalarının karbon azaltımı, ziyaretçi yönetimi ve yerel çevresel koruma politikalarıyla dengelenmesi gerektiğini göstermektedir. Kapadokya gibi hassas kültürel ve doğal miras destinasyonlarında turizm büyümesinin başarısı yalnızca ziyaretçi sayısındaki artışla değil, bu büyümenin yerel çevre, kültürel miras ve toplumsal yaşam üzerindeki etkilerinin yönetilmesiyle ölçülmelidir.

Tablo 5. Paydaşlara Göre Politika Önerileri

Paydaş	Öneri alanı	Somut politika/uygulama
Havayolları	Karbon azaltımı ve operasyonel verimlilik	Yakıt verimli filo kullanımı, sürdürülebilir havacılık yakıtı (SAF) kullanımının artırılması, rota ve doluluk optimizasyonu, şeffaf karbon bilgilendirmesi
Destinasyon yönetimi	Ziyaretçi akışı ve taşıma kapasitesi	Yoğun dönemlerde ziyaretçi dağılımı yönetimi, alternatif rota ve alanların geliştirilmesi, miras alanlarında kapasite temelli planlama
Yerel yönetimler	Entegre ulaşım ve çevre yönetimi	Havalimanı-kent-destinasyon arasında düşük emisyonlu toplu taşıma, atık/su/enerji yönetimi ve yerel çevresel izleme sistemleri
Turizm işletmeleri	Sürdürülebilir hizmet üretimi	Enerji verimliliği, yerel tedarik, çevre sertifikaları, ziyaretçi bilgilendirme ve sorumlu turizm uygulamaları
Politika yapımcılar	Veri şeffaflığı ve izleme	Havayolu türü, rota, frekans, yolcu profili ve emisyon verilerinin daha ayrıntılı raporlanması

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

6.1. Araştırmanın Sınırlılıkları ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. İlk olarak, LCC etkisi havayolu şirketi bazında ayrıştırılamamış; toplam havalimanı yolcu trafiği bölgesel erişilebilirlik göstergesi olarak kullanılmıştır. İkinci olarak, karbon emisyonları doğrudan ölçülmemiş, yolcu-kilometre temelli katsayı aracılığıyla tahmin edilmiştir. Üçüncü olarak, turizm talebi müze ve ören yeri ziyaretçi istatistikleri üzerinden temsil edilmiş; konaklama, harcama, ziyaretçi milliyeti ve kalış süresi gibi mikro düzey değişkenler analize dahil edilmemiştir.

Gelecek çalışmalarda havayolu şirketi türü, rota bazlı uçuş frekansı, koltuk kapasitesi, bilet fiyatları, uçak tipi, doluluk oranı ve ziyaretçi harcama verileri birlikte ele alınabilir. Ayrıca Kapadokya'da havayolu kaynaklı turizm büyümesinin taşıma kapasitesi, aşırı turizm algısı, yerel halkın yaşam kalitesi ve kültürel miras alanları üzerindeki etkileri karma yöntem araştırmalarıyla incelenebilir. Bu tür çalışmalar, havayolu erişilebilirliği ile sürdürülebilir turizm yönetimi arasındaki ilişkiyi daha güçlü ampirik kanıtlarla açıklamaya katkı sağlayacaktır.

Kaynakça

- Becken, S. (2007). Tourists' perception of international air travel's impact on the global climate and potential for mitigation. *Journal of Sustainable Tourism*, 15(4), 351-368. <https://doi.org/10.2167/jost710.0>
- Brueckner, J. K. (2010). Airline traffic and urban economic development. *Urban Studies*, 47(7), 1451-1466. <https://doi.org/10.1177/0042098009353073>
- Burghouwt, G., & de Wit, J. (2015). The role of low-cost carriers in the regional connectivity of Europe. *Journal of Air Transport Management*, 46, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2015.03.011>
- Button, K., & Ison, S. (2008). The economics of low-cost airlines: Introduction. *Journal of Air Transport Management*, 14(3), 117-118. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2008.03.001>
- Ceylan, H., & Taş, Ö. (2026). Düşük maliyetli havayolu işletmeciliğinin bölgesel turizmin gelişimi üzerine etkisi: Kapadokya destinasyonu ve çevre havalimanları örneği. U. Ongun (Ed.), *Turizmde Güncel Araştırmalar II* içinde (ss. 99-110). Özgür Yayınları. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1243.c5043>
- Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü. (2026). Havalimanları karşılaştırmalı istatistikleri. Erişim tarihi: 20 Haziran 2026, <https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/Istatistikler.aspx>
- Dobruszkes, F. (2006). An analysis of European low-cost airlines and their networks. *Journal of Transport Geography*, 14(4), 249-264. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2005.08.005>
- Doganis, R. (2019). *Flying off course: Airline economics and marketing* (5th ed.). Routledge.
- Donzelli, M. (2010). The effect of low-cost air transportation on the local economy: Evidence from Southern Italy. *Journal of Air Transport Management*, 16(3), 121-126. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2009.07.005>
- Francis, G., Humphreys, I., Ison, S., & Aicken, M. (2006). Where next for low cost airlines? A spatial and temporal comparative study. *Journal of Transport Geography*, 14(2), 83-94. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2005.05.005>
- Gössling, S., & Peeters, P. (2007). It does not harm the environment! An analysis of industry discourses on tourism, air travel and the environment. *Journal of Sustainable Tourism*, 15(4), 402-417. <https://doi.org/10.2167/jost711.0>
- Graham, A., & Dennis, N. (2010). The impact of low cost airline operations to Malta. *Journal of Air Transport Management*, 16(3), 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2009.07.006>
- ICAO. (2019). *ICAO environmental report 2019: Aviation and environment*. International Civil Aviation Organization. <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/envrep2019.aspx>

- O'Connell, J. F., & Williams, G. (2016). *Air transport in the 21st century: Key strategic developments*. Routledge.
- Page, S. J. (2009). *Transport and tourism: Global perspectives (3rd ed.)*. Pearson.
- Peeters, P., Higham, J., Kutzner, D., Cohen, S., & Gössling, S. (2016). Are technology myths stalling aviation climate policy? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 44, 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.02.004>
- Prideaux, B. (2000). The role of the transport system in destination development. *Tourism Management*, 21(1), 53-63. [https://doi.org/10.1016/S0261-5177\(99\)00079-5](https://doi.org/10.1016/S0261-5177(99)00079-5)
- Suau-Sanchez, P., Voltes-Dorta, A., & Cugueró-Escofet, N. (2020). An early assessment of the impact of COVID-19 on air transport: Connectivity and greenhouse gas emissions. *Global Transitions*, 2, 210-225. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2020.09.002>
- T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2026). Müze ve öğrenme yeri ziyaretçi istatistikleri. Erişim tarihi: 20 Haziran 2026, <https://www.ktb.gov.tr/>
- Vera-Rebollo, J. F., & Ivars-Baidal, J. A. (2009). Spread of low-cost carriers: Tourism and regional policy effects in Spain. *Regional Studies*, 43(4), 559-570. <https://doi.org/10.1080/00343400701874164>

Sürdürülebilir Havacılıkta Yeşil Dönüşüm

Editör:

Doç. Dr. Gülbeniz Akduman