

Türkiye'nin Hava Yolu İhracatında Sosyal ve Çevresel Sürdürülebilirlik için Yapay Zekâ Destekli Çok Amaçlı Optimizasyon Yaklaşımı

Nesrin Kolukırık¹, Bahadır Kopçasız^{2*}

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü / Hava Harp Okulu, Milli Savunma Üniversitesi, Türkiye

²Temel Bilimler Bölümü / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Türkiye

*(bkopcasiz@gelisim.edu.tr)

(Received: 25 September 2025, Accepted: 01 October 2025)

(5th International Conference on Frontiers in Academic Research ICFAR 2025, September 25-26, 2025)

ATIF/REFERENCE: Kolukırık, N. & Kopçasız, B. (2025). Türkiye'nin Hava Yolu İhracatında Sosyal ve Çevresel Sürdürülebilirlik için Yapay Zekâ Destekli Çok Amaçlı Optimizasyon Yaklaşımı, *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 9(10), 101-108.

Özet – Bu çalışma, Türkiye'nin hava yolu ihracatında sürdürülebilirliği hem sosyal hem de çevresel boyutlarıyla değerlendiren çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı sunmaktadır. Doğrusal programlama modeli, istihdamı artırmayı ve CO₂ emisyonlarını sınırlandırmayı amaçlamaktadır. 2000–2023 yıllarına ait TÜİK ihracat verileri, ülkeler arası hava mesafeleri ve dört farklı uçak tipine /taşımacılık türüne (Belly-hold taşımacılığı, Boeing 747F, Boeing 777F ve Airbus A330F) ilişkin katsayılar değerlendirilmiştir. Modelin çözümünde PuLP kütüphanesi kullanılmıştır. TÜİK'ten elde edilen 2000-2023 yıllarına ait veriler yapay sinir ağına aktarılmış ve gelecek yılların (2024-2025) tahmini için modelden yararlanılmıştır. Bulgular, istihdamın artış eğiliminde olduğunu göstermektedir. Emisyonların ise dönemsel dalgalanmalar sergilediğini göstermektedir. Tahmin sonuçlarına göre, 2024 ve 2025 yılları için istihdamda yaklaşık %4,1 oranında bir artış olduğu ve CO₂ emisyonlarında ise %5,0 düzeyinde bir yükseliş yaşanacağı öngörülmektedir. Bu çalışma, havayolu taşımacılığında toplumsal faydalar ile çevresel etkilerin ele alınmasına imkân tanımaktadır ve karar vericiler için de oldukça önemli uygulanabilir stratejik öneriler sunmaktadır. Ek olarak, bu araştırma hava yolu taşımacılığında sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için yol gösterici bir çerçeve ortaya koymaktadır. Çalışma, çevresel maliyetlerin azaltılmasıyla birlikte, toplumsal faydanın artmasına katkı sağlayacak politikaların tasarlanmasına destek olması beklenmektedir. Özellikle çevresel verimlilik ile sosyal kazanımların dengelenmesi gerektiğine vurgu yapılmakta ve mevcut uygulamaların yanı sıra gelecek kuşakların ihtiyaçlarını gözeterek stratejik adımlar için de sağlam bir temel sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Havayolu İhracatı, Sürdürülebilirlik, Makine Öğrenmesi, Çok Amaçlı Optimizasyon, Dinamik Araç Rotalama.

I. GİRİŞ

Günümüzde, küreselleşme ve ticaret hacminin hızlı bir şekilde artması ile hava yolu taşımacılığı uluslararası ticaretin önemli bir parçası haline gelmiştir. Türkiye gibi coğrafi konum açısından önem arz eden ülkeler, hava yolu ihracatının optimize edilmesi hususunda hem ekonomik büyümeyi desteklemek hem de çevresel ve sosyal sürdürülebilirliği desteklemek adına kritik bir öneme sahiptir. Hava

taşımacılığının hızla büyümesi, karbon emisyonlarının artışı ve istihdam dinamiklerinin değişimi gibi sorunları da beraberinde getirmektedir. Sürdürülebilir hava taşımacılığı stratejileri geliştirmek, karar vericiler için vazgeçilmez bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmada, Türkiye'nin hava yolu ihracatında makine öğrenmesi tabanlı optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Çalışmanın temel amacı, istihdamı maksimize etmek ve CO₂ emisyonlarını da minimize etmektir.

Hava yolu taşımacılığının sürdürülebilirliği üzerine yapılan çalışmalar, genellikle politika, teknoloji ve operasyonel optimizasyonuna odaklanmıştır. Sürdürülebilir havacılığın politika ve teknolojilerini inceleyen bir çalışma, politikaların teknolojik yeniliklerle entegrasyonunun çevresel etkileri azaltmada etkili olduğunu göstermiştir [1]. Hava trafiği akış yönetiminin optimizasyonu üzerine yapılan bir çalışma, son on yılda yayımlanan çalışmaları değerlendirmiş ve optimizasyon modellerinin trafik yoğunluğunu ve gecikmeleri azaltmada kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur[2]. Sürdürülebilir taşımacılık sistemlerinde simülasyon, optimizasyon ve makine öğrenmesinin entegrasyonu üzerine bir çalışma ise, bu yöntemlerin çevresel etkilerini azaltırken, verimliliğini de artırabileceğini göstermektedir [5].

Günümüzde, hava taşımacılığındaki makine öğrenmesi uygulamaları artan bir ilgi görmektedir. Uçak performansının iyileştirilmesi için makine öğrenmesi yöntemlerini inceleyen bir derleme, disiplinlerarası yaklaşımların havacılık mühendisliğinde önemli çıktılar yarattığını vurgulamaktadır. Sürdürülebilir havalimanı gelişimi üzerine yapılan bir literatür taraması çevresel, ekonomik ve sosyal faktörlerin eşzamanlı dikkate alınması gerektiğini savunmakta ve kapsamlı bir araştırma çerçevesi önermektedir [4]. Ayrıca, makine öğrenmesi destekli uçak yörünge optimizasyonu çalışmaları, gerçek dünya senaryolarında kısa ve uzun mesafeli uçuşlar için yakıt verimliliğini artıran algoritmalar geliştirmiştir.

Acil durum hava trafiği yönetiminde makine öğrenmesi ve optimizasyonun entegrasyonunu ele alan bir rapor, bu tekniklerin hava hareketliliğini iyileştirdiğini ortaya koymaktadır [6]. Lojistik optimizasyonunda yapay zekanın sürdürülebilir kriterlerle kullanımı üzerine yapılan bir incelemede çeşitli AI modellerinin çevresel etkilerini minimize etmede etkili olduğu belirtilmiştir [3]. ABD havayollarının çevresel sürdürülebilirlik performansını değerlendiren bir çalışmada veri zarflama analizi ve makine öğrenmesi entegrasyonunun sektöre özgü yenilikler getirdiği vurgulanmıştır [6]. Son olarak, iş havacılığında rota optimizasyonunda yapay zekanın yakıt tüketimini azaltma potansiyelini inceleyen bir çalışmada simülasyon ve optimizasyon yöntemlerinin sürdürülebilir taşımacılığa katkıları tartışılmıştır [8].

Bu literatür taraması, hava taşımacılığında optimizasyon ve makine öğrenmesinin yaygınlaşmasına rağmen, Türkiye gibi gelişmekte olan ekonomilere özgü veri tabanlı modellerin sınırlı kaldığını göstermektedir. Mevcut çalışmalar genellikle trafik yönetimi veya performans iyileştirmeye odaklanmıştır. İstihdam ve emisyon gibi çok boyutlu sürdürülebilirlik unsurlarını entegre eden yaklaşımlar ise oldukça yetersizdir.

Bu çalışma kapsamında, bu boşluğu doldurmak için TÜİK verilerine dayalı doğrusal programlama ve yapay sinir ağı modeli ile Türkiye'nin hava yolu ihracatını optimize etmek hedeflenmiştir. Amacımız, sosyal ve çevresel faydaları maksimize etmektir. Bulguların karar vericilere stratejik öneriler sunması beklenmektedir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Kullanılan Veriler

Bu çalışma, Türkiye'nin hava yoluyla yaptığı ihracatı, yılları ve ülkeler arası mesafeleri dikkate alarak uçak tiplerine göre dağıtmayı hedeflemektedir. Kullanılan veri seti; yıl, ülke, hava yolu ile gerçekleştirilen toplam ihracat büyüklüğü, Türkiye'nin yaptığı ithalat, ülkeler arası ortalama hava mesafesi ve taşımanın yapılacağı dört uçak tipini içermektedir. Bu uçaklar/taşıma türü, Belly-hold taşımacılığı, Boeing 747F, Boeing 777F ve Airbus A330F'dir. Her uçak türüne göre çevresel etkisini temsilen bir emisyon katsayısı, istihdam etkisini temsilen de bir istihdam katsayısı atanmıştır. Mesafeye göre emisyonların daha gerçekçi ölçeğe taşınması için bir dönüşüm katsayısı kullanılmıştır.

Matematiksel Model

Bu çalışma kapsamında Türkiye'nin hava yolu ihracatını optimize etmek için lineer (doğrusal) çok amaçlı matematiksel model kurulmuştur. Çalışmanın amacı, sosyal sürdürülebilirlik kapsamında ele alınan istihdamı artırırken aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik için CO₂ emisyonlarını azaltmaktır. Türkiye'nin TÜİK'ten alınan ihracat verilerini dikkate alarak her yıl için ayrı ayrı çözüm üretilmiştir.

Kümeler

Y: Yıllar (2000-2025)

C:Ülkeler (Örneğin: Almanya, ABD, ...)

K:Uçak tipleri/ taşıma türü = {Belly-hold taşımacılığı, Boeing 747F, Boeing 777F, Airbus A330F}.

Parametreler

Cap_{y,c} : y yılı, c ülkesi için Türkiye'den ilgili ülkeye toplam ihracat

TotExp_y : y yıl için Türkiye'nin havayolu ile toplam ihracatı

d_c : c ülkesine hava mesafesi

e_k : Uçak tipine göre emisyon katsayısı

a_k : Uçak tipine göre istihdam katsayısı

λ : CO₂ ceza ağırlığı

conv : Dönüşüm katsayısı

Karar Değişkenleri

x_{y,c,k} ≥ 0: y yılı, c ülkesi ve k uçak tipi için ayrılan ihracat miktarı

Amaç Fonksiyonu

$$\max Z = \sum_{c \in C} \sum_{k \in K} (a_k x_{y,c,k}) - \lambda \cdot \sum_{c \in C} \sum_{k \in K} (\text{conv} \cdot d_c \cdot e_k \cdot x_{y,c,k})$$

Çalışmanın amacı, ilk terim için toplam istihdamın artırılması, ikinci terim için CO₂ emisyonlarının ceza olarak azaltılmasıdır.

Kısıtlar

1. Ülke bazında kapasite kullanımı:

$$\sum_{k \in K} x_{y,c,k} \leq \text{Cap}_{y,c} \quad \forall c \in C \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} x_{y,c,k} \geq 0.05 \cdot \text{Cap}_{y,c} \quad \forall c \in C \quad (2)$$

(1) Her ülke için toplam akışın ,üst kapasite sınırını aşmamasını sağlar.

(2) Kapasitenin en az %5'i kullanılması gerekmektedir.

2. Toplam ihracat üst sınırı (yıl):

$$\sum_{c \in C} \sum_{k \in K} x_{y,c,k} \leq 5 \cdot \text{TotExp}_y \quad (3)$$

(3) Bir yıl içinde tahsis edilen ihracat miktarı, o yılki hava yolu ihracat büyüklüğünü aşmamasını sağlar.

3. Uçak tipi taban kullanımı (yıl):

$$\sum_{c \in C} x_{y,c,k} \geq 0.10 \cdot (5 \cdot \text{TotExp}_y) \quad \forall k \in K \quad (4)$$

(4) Her uçak tipinin en az %10 payla kullanılmasını zorunlu kılar.

4. İşaret kısıtları:

$$x_{y,c,k} \geq 0 \quad \forall c \in C, \forall k \in K \quad (5)$$

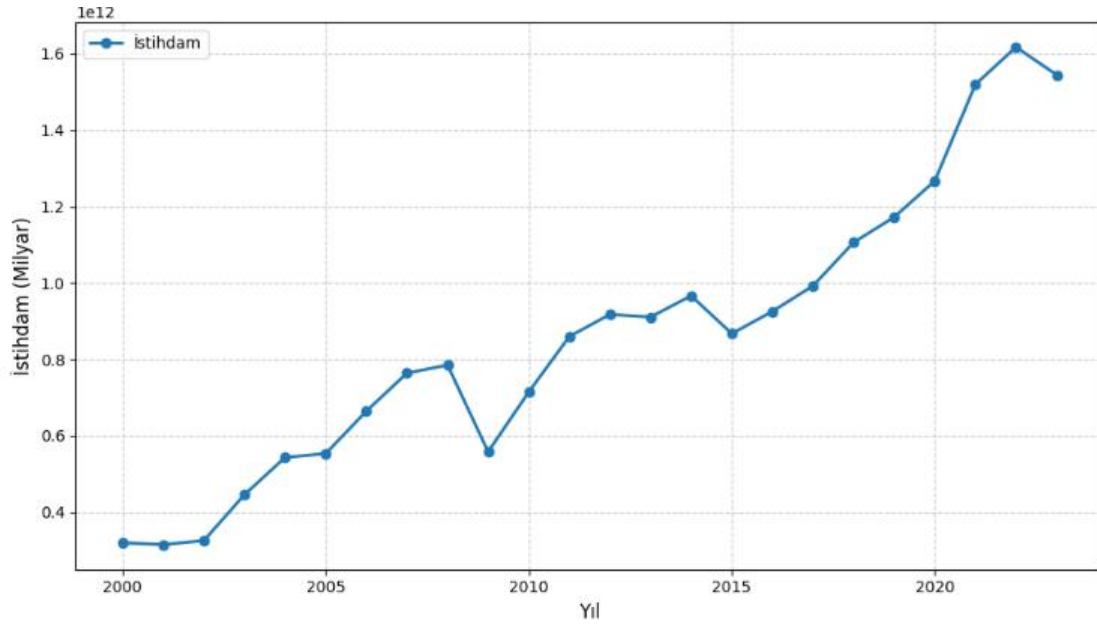
Optimizasyon Yöntemi

Bu çalışmada birbiri ile çelişen iki amaç fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlar, istihdamı artırmak ve karbon etkisini azaltmaktır. Ayrıca, doğrusal programlama modeli çözümü için çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinden biri olan ağırlıklı toplam yöntemi kullanılmaktadır. Hava yolu taşıma miktarı, PuLP kütüphanesi kullanılarak belirlenmiştir.

Optimizasyon modelinden elde edilen çıktılar sonraki yılların öngörüsü için yapay sinir ağından destek alınarak belirlenmiştir. Bu ağ, PyTorch kullanılarak iki gizli katmanlı tam bağlantılı bir yapı olarak kurulmuş, ReLU aktivasyonları, dropout düzenleme ve Adam iyileştirici ile eğitilmiştir. Girdi olarak yıl, ülke, hava mesafesi ve toplam ihracat büyüklüğü, çıktı olarak ise dört uçak tipine ayrılan tahsis miktarları kullanılmıştır. Ön işleme ve eğitim–test ayrımı için scikit-learn kütüphanesi tercih edilmiştir.

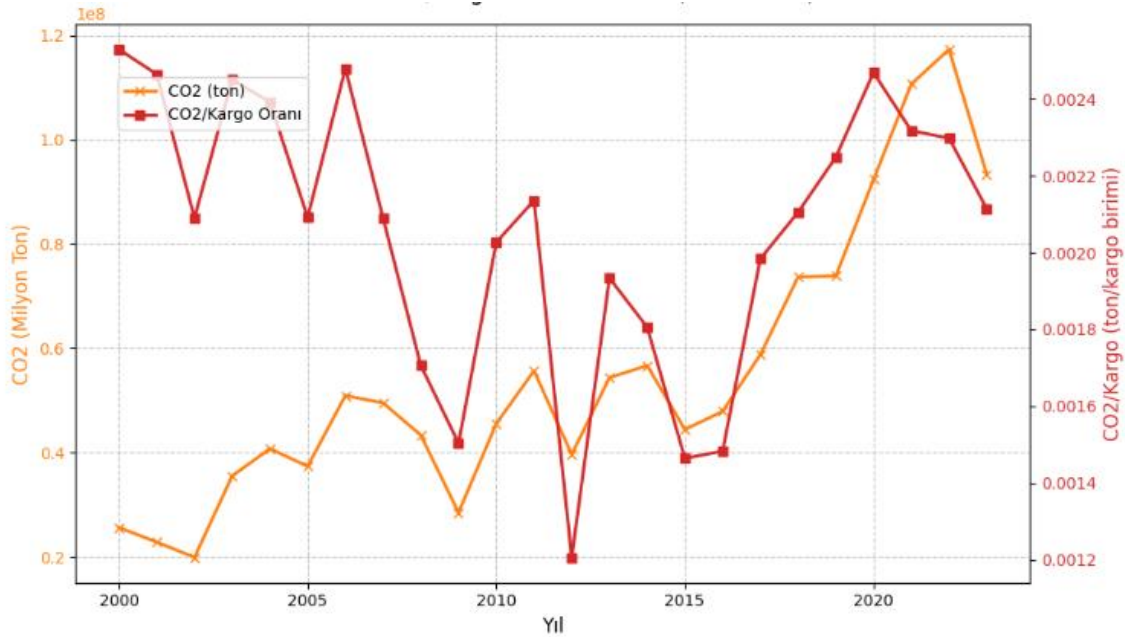
III. BULGULAR

Bu bölümde, geliştirilen model aracılığıyla elde edilen sonuçlar sunulmaktadır ve Türkiye'nin hava yolu ihracatında istihdam ile çevresel etkilerin yıllar içerisindeki değişimi ayrıntılı olarak değerlendirilmektedir.



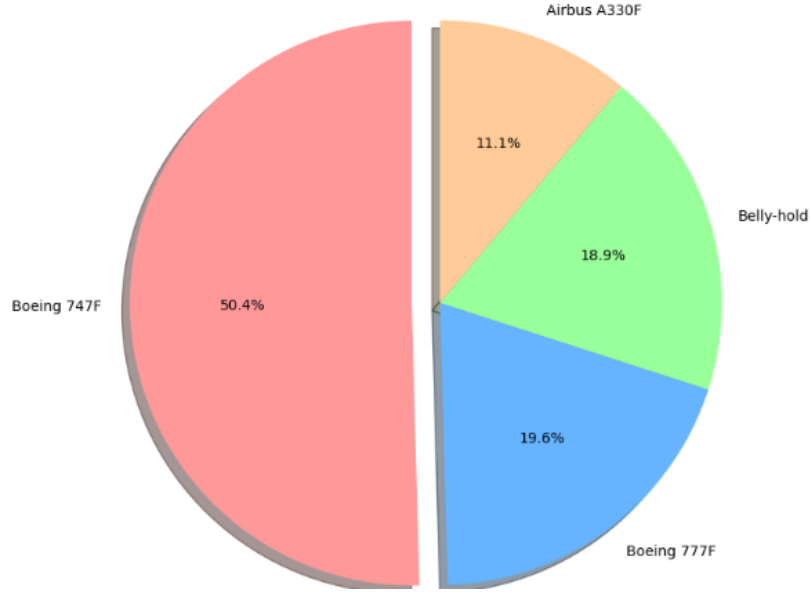
Şekil 1. İstihdam Trendleri (2000-2023)

Şekil 1, 2000–2023 yıllarına ait istihdam dağılımını göstermektedir. İstihdamın uzun vadede artış eğilimi gösterdiği görülmektedir. İlk yıllarda 0,3 trilyon düzeyinde olan istihdam, yıllar içerisinde 1,6 trilyon'a kadar ulaşmıştır. Bununla birlikte, küresel ve ekonomik koşullar bazı dönemlerde gerilemelere yol açarken, 2009'da küresel kriz sırasında yaşanan düşüş ve 2020 sonrasında gözlenen hızlı artış, bu eğilimin kayda değer dönüm noktaları olmuştur.

Şekil 2. CO₂ ve CO₂ / Kargo Oranı Trendleri (2000-2023)

Şekil 2, toplam CO₂ salınımı ile kargo başına düşen emisyon oranındaki değişimi göstermektedir. Toplam emisyonlar, yıllar içinde genel bir artış göstermektedir. 2000'li yıllarda 0,2 milyon ton olan emisyon miktarı, 2022 yılına kadar 1 milyon tonun üzerine çıktığı gözlemlenmiştir. Başlangıçta, kargo başına emisyon oranları yüksekken, sonraki yıllarda ise dalgalanmalar yaşanmış, 2010 sonrasına gelindiğinde daha istikrarlı bir bandta ilerlediği görülmüştür. 2009 ve 2014 yıllarında toplam salınımda ve oranlarında dikkat çekici düşüşler görülmüştür. Bu durum, küresel kriz ve ekonomik yavaşlama ile açıklanabilir. 2016 yılı sonrasında toplam emisyonlarda bir artış kaydedilmiştir. Buna karşın, kargo başına emisyon aynı hızda

yükselmemiştir. Bu durumun pozitif tarafı, belli başlı verimlilik kazanımlarına işaret etmektedir. 2020 sonrasında ise toplam emisyon ve oranlarında en yüksek seviyelere çıkmıştır. Bu eğilim, pandemi sonrası artan hava yolu taşımacılığı talebiyle ilişkilendirilebilir.



Şekil 3. Uçak Tipi / Taşımacılığı Dağılımı

Şekil 3, kargo taşımacılığında kullanılan uçak tiplerinin dağılımını göstermektedir. Toplamın %50,4'ünü oluşturan Boeing 747F tipi uçağı en çok tercih edilen uçak türüdür. 2. sırada %19,6 ile Boeing 777F ve %18,9 ile "Belly-hold" taşımacılığı takip etmektedir. En düşük oran ise %11,1 ile Airbus A330F'e aittir. Kargo taşımacılığında büyük kapasiteli Boeing 747F tipi uçağın öne çıktığı ve diğer uçak türlerinin ise daha sınırlı oranlarda katkı sağladığı tespit edilmiştir.

2024 ile 2025 yıllarının tahmini için sinir ağı yöntemi kullanılmıştır. Bu verilerin eğitim kaybı:

- Epoch 50: Kayıp = 0.1114
- Epoch 100: Kayıp = 0.1213
- Epoch 150: Kayıp = 0.0974
- Epoch 200: Kayıp = 0.0452
- Test Kaybı: 0.0726

şeklindedir. Eğitim kaybı genel olarak azalmaktadır. Bu, modelin öğrendiğini göstermektedir.

2024:

- Toplam İstihdam: 1.540.266.393.600
- Toplam CO₂: 99.509.200 ton,

2025:

- Toplam İstihdam: 1.603.130.490.880
- Toplam CO₂: 104.498.032 ton

elde edilmiştir. Hem toplam istihdam hem de toplam CO₂ emisyonları 2024'ten 2025'e artmaktadır. İstihdam yaklaşık %4,1 büyürken, CO₂ emisyonları ise yaklaşık %5,0 oranında artmıştır.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada hava yolu ihracatı için makine öğrenmesi ve doğrusal programlama temelli bir optimizasyon modeli sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, hava yolu taşımacılığının çevresel maliyetleri ve sosyal faydaları arasındaki ilişkiyi açıkça göstermektedir. Hava taşımacılığında sürdürülebilirlik üzerine yapılan çalışmalar genellikle çevresel etkilere ve operasyonel verimliliğe odaklanmaktadır. Bu çalışma, sosyal (istihdam) ve çevresel (emisyonlar) sürdürülebilirliği dikkate alarak çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı sunmaktadır. Matematiksel model, TÜİK verilerine dayalı olarak Türkiye'nin hava yolu ihracatını uçak tipleri ve ülkelere göre optimize etmektedir. Bulgular, istihdam artışı ile emisyon artışı arasında bir gerilim olduğunu göstermektedir. Örneğin, 2020 sonrası emisyonların hızlı yükselişi, pandemi sonrası artan hava taşımacılığı talebiyle ilişkilendirilebilir. Yapay sinir ağı ile desteklenen tahmin sonuçları, eğitim kaybının azalmasıyla modelin öğrenme kapasitesinin iyi olduğunu doğrulamaktadır.

Sonuç olarak, hava yolu ihracatında sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik arasında bir denge kurmak mümkündür. Karar vericilerin filo modernizasyonu, düşük emisyon teknolojileri ve kapasite planlamasında çevresel kriterlere öncelik vermesi gerekmektedir. Bu stratejiler istihdamı desteklerken karbon ayak izini azaltabilir ve ülkelerin küresel ticaretteki rekabet gücünü artırabilir. Bu çalışma ile hem akademik literatüre hem de sektör uygulamalarına yön gösterici bir çerçeve sunulmuştur.

V. SONUÇLAR

Günümüzde küreselleşmeyle birlikte sürdürülebilirlik oldukça önemli bir hale gelmektedir. Hava yolu taşımacılığı için uçak tiplerine göre ülke ve yıl bazında taşıma miktarları hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda istihdamın düzenli bir artış gösterdiği görülmektedir. Emisyonlar ise daha dalgalı bir trend izlemiştir. 2024–2025 tahminleri, istihdamda yaklaşık %4,1'lik, emisyonlarda ise %5,0'lik bir artış olacağını işaret etmektedir. Büyüme genelde toplumsal faydayı artırırken, çevresel baskıyı da artırmaktadır.

Bu çalışma, politikacılar ve sektör çalışanları için istihdamı destekler niteliktedir. Ayrıca, karbon ayak izini azaltacak yeni stratejilerin gerekliliğini de açıkça ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, filo çeşitliliğinin artması, düşük emisyon teknolojilerine geçilmesi ve kapasite planlanmasında çevresel kriterlere öncelik verilmesinin sürdürülebilir hava taşımacılığı için oldukça önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma yalnızca mevcut duruma ilişkin kapsamlı bir değerlendirmeyi ortaya koymakla kalmayıp, aynı zamanda da gelecekte uygulanabilecek bütüncül, veri temelli ve sürdürülebilir politika tasarımları için yön gösterici bir çerçeve sunmaktadır.

TEŞEKKÜR

“Bu çalışma İstanbul Gelişim Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FGA-2025-208 nolu proje kapsamında desteklenmiştir”

KAYNAKLAR

[1] Adler, N., Martini, G., & Volta, N. (2013). Measuring the environmental efficiency of the global aviation fleet. *Transportation Research Part B: Methodological*, 53, 82-100.

[2] Agustín, A., Escudero, L., & Pizarro, C. (2008). Mathematical Optimization models for Air Traffic Flow Management. A review. Dept. of Statistics and Operations Research Universidad Rey Juan Carlos.

[3] Chen, W., Men, Y., Fuster, N., Osorio, C., & Juan, A. A. (2024). Artificial intelligence in logistics optimization with sustainable criteria: A review. *Sustainability*, 16(21), 9145.

- [4] Couto, J., & Baltazar, M. E. (2025). Sustainable Airport Development: A Literature Review.
- [5] de la Torre, R., Corlu, C. G., Faulin, J., Onggo, B. S., & Juan, A. A. (2021). Simulation, optimization, and machine learning in sustainable transportation systems: Models and applications. *Sustainability*, 13(3), 1551.
- [6]Eurocontrol(2021). AI/ML Based Augmented 4D Trajectory. Executive Report.
<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-10/Eurocontrol-Ai-Ml-Augmented-4d-Trajectory-Executive-Report.pdf>
- [7] Kaffash, S., Chomachaei, F., & Aktas, E. (2024). Environmental sustainability performance of US airlines: implications of financial performance and technical efficiency. *Journal of the Operational Research Society*, 1-21.
- [8] Mgbachi, V. (2024). AI in Business Aviation Route Optimization: Reducing Fuel Consumption and Environmental Impact. *Journal of Business and Strategic Management*, 9(5), 48-82.