

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.

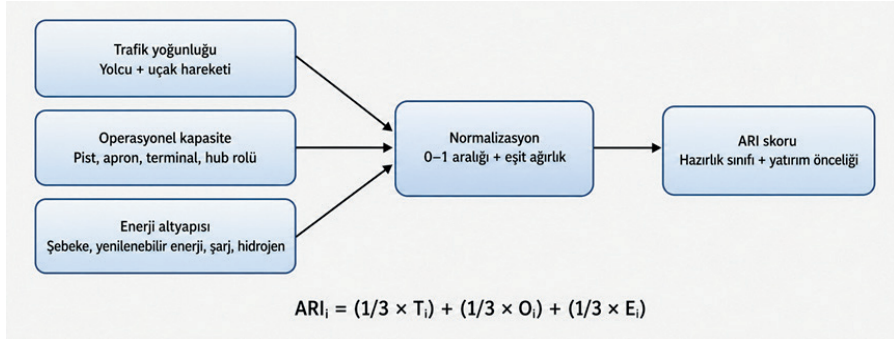
4.1. Araştırma tasarımı ve Havalimanı Hazırlık Endeksi (ARI)

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.

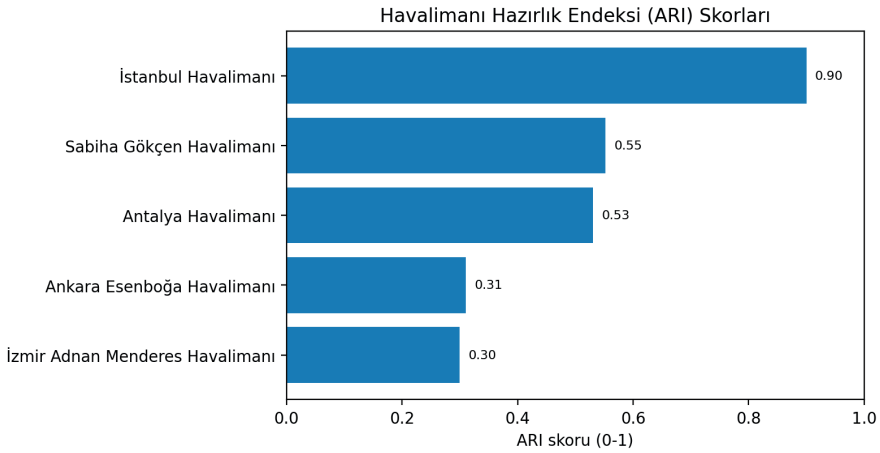
Tablo 4, İstanbul Havalimanı'nın hem yolcu sayısı hem de uçak hareketi bakımından örnekleme açık biçimde en yoğun havalimanı olduğunu göstermektedir. Sabiha Gökçen ve Antalya havalimanları da yüksek trafik hacimleri nedeniyle sıfır emisyonlu operasyon dönüşümünde öncelikli altyapı planlamasına ihtiyaç 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.

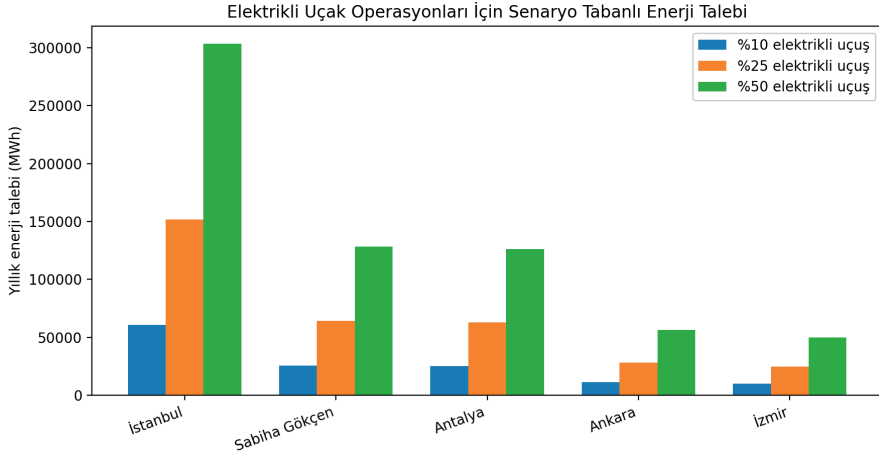
5.3. Senaryo tabanlı yıllık enerji talebi

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>