

JAR - 8 / 2

E-ISSN: 2687-3338

AUGUST 2026



JOURNAL OF
AVIATION
RESEARCH

HAVACILIK ARAşTIRMALARI DERGİSİ





JOURNAL OF
AVIATION
RESEARCH

HAVACILIK ARAşTIRMALARI DERGİSİ

8 / 2



JOURNAL OF
**AVIATION
RESEARCH**
HAVACILIK ARAşTIRMALARI DERĐİSİ

Yılda iki sayı olarak yayımlanan uluslararası hakemli,
açık erişimli ve bilimsel bir dergidir.

Cilt: 8
Sayı: 2
Yıl: 2026

2019 yılından itibaren yayımlanmaktadır.

© Telif Hakları Kanunu çerçevesinde makale sahipleri ve
Yayın Kurulu'nun izni olmaksızın hiçbir şekilde
kopyalanamaz, çoğaltılamaz. Yazıların bilim,
dil ve hukuk açısından sorumluluğu
yazarlarına aittir.

Elektronik ortamda yayınlanmaktadır.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/jar>
Ulaşmak için tarayınız:

This is a scholarly, international, peer-reviewed, open-access
journal published international journal published twice a year.

Volume: 8
Issue: 2
Year: 2026

Published since 2019.

© The contents of the journal are copyrighted and may not
be copied or reproduced without the permission of the
publisher. The authors bear responsibility for the
statements or opinions of their
published articles.

This journal is published digitally.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/jar>
Scan for access:



Yazışma Adresi:
Göller Bölgesi Teknokent
Isparta - Türkiye

E-Posta:
journalofaviationresearch@gmail.com

Telefon:
+90 246 211 85 00

Dahili:
8505

Correspondence Address:
Göller Bölgesi Teknokent
Isparta - Türkiye

E-Mail:
journalofaviationresearch@gmail.com

Telephone:
+90 246 211 85 00

Ext:
8505



JOURNAL OF AVIATION RESEARCH

HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERGİSİ

Yayın Sahibi
Prof. Dr. İnan Eryılmaz

Baş Editör
Prof. Dr. İnan Eryılmaz

Editör Kurulu
Dr. Öğr. Üyesi Şener Odabaşoğlu
Prof. Dr. Deniz Dirik
Doç. Dr. Tamer Saraçyakupoğlu
Dr. Öğr. Üyesi Leyla Adiloğlu Yalçinkaya
Prof. Dr. Yasin Şöhret
Doç. Dr. Mesut Öztürk
Doç. Dr. Gökhan Tanrıverdi
Dr. Öğr. Üyesi K. Gülnaz Bülbül
Dr. Arif Tuncal
Doç. Dr. Alper Dalkıran
Dr. Ali Dinç
Doç. Dr. Ayşe Aslı Yılmaz
Doç. Dr. İnci Polat Sesliokuyucu
Prof. Dr. Vahap Önen
Prof. Dr. Vedat Veli Çay

Dil Editörleri
Prof. Dr. Deniz Dirik
Araş. Gör. Büşra Yıldırım

Mizanpaj Editörü
Dr. Öğr. Üyesi Rıza Gürler Akgün

Yayın ve Danışma Kurulu
Prof. Dr. Ender Gerede
Doç. Dr. Vildan Durmaz
Prof. Dr. Hakkı Aktaş
Doç. Dr. Eyüp Bayram Şekerli
Doç. Dr. Semih Soran
Prof. Dr. Rüstem Barış Yeşilay
Prof. Dr. Engin Kanbur
Prof. Dr. Hasan Hüseyin Uzunbacak
Doç. Dr. Akansel Yalçinkaya
Doç. Dr. Nazmiye Ülkü Pekkan
Prof. Dr. Didem Rodoplu Şahin

Owner
Prof. İnan Eryılmaz, Ph.D.

Editor in Chef
Prof. İnan Eryılmaz, Ph.D.

Editorial Board
Asst. Prof. Şener Odabaşoğlu, Ph.D.
Prof. Deniz Dirik, Ph.D.
Assoc. Prof. Tamer Saraçyakupoğlu, Ph.D.
Asst. Prof. Leyla Adiloğlu Yalçinkaya, Ph.D.
Prof. Yasin Şöhret, Ph.D.
Assoc. Prof. Mesut Öztürk, Ph.D.
Assoc. Prof. Gökhan Tanrıverdi, Ph.D.
Asst. Prof. K. Gülnaz Bülbül, Ph.D.
Arif Tuncal, Ph.D.
Assoc. Prof. Alper Dalkıran
Ali Dinç, Ph.D.
Assoc. Prof. Ayşe Aslı Yılmaz, Ph.D.
Assoc. Prof. İnci Polat Sesliokuyucu, Ph.D.
Prof. Vahap Önen, Ph.D.
Prof. Vedat Veli Çay, Ph.D.

Language Editors
Prof. Deniz Dirik, Ph.D.
Res. Asst. Büşra Yıldırım

Layout Editor
Asst. Prof. Rıza Gürler Akgün, Ph.D.

Editorial and Advisory Board
Prof. Ender Gerede, Ph.D.
Assoc. Prof. Vildan Durmaz, Ph.D.
Prof. Hakkı Aktaş, Ph.D.
Assoc. Prof. Eyüp Bayram Şekerli, Ph.D.
Assoc. Prof. Semih Soran, Ph.D.
Prof. Rüstem Barış Yeşilay, Ph.D.
Prof. Engin Kanbur, Ph.D.
Prof. Hasan Hüseyin Uzunbacak, Ph.D.
Assoc. Prof. Akansel Yalçinkaya, Ph.D.
Assoc. Prof. Nazmiye Ülkü Pekkan, Ph.D.
Prof. Didem Rodoplu Şahin, Ph.D.



JOURNAL OF
**AVIATION
RESEARCH**
HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERGİSİ

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Articles

ÖYKÜM YILMAZ

Türkiye Hava Kargo Trafiğinin Zaman Serisi Analizi: ARIMA Modeli ile 2026-2030 Dönemi Öngörüsü

Forecasting Air Cargo Traffic in Türkiye with the ARIMA Model: A Projection for the 2026-2030 Period 158 - 171

FATİH ŞAHİN

Düşük Maliyetli ve Tam Hizmet Havayollarında Finansal Risk Yönetimi: Karşılaştırmalı Bir Analiz

Financial Risk Management in Low-Cost and Full-Service Airlines: A Comparative Analysis 172 - 193

YALÇIN PAMUK

Türk Sivil Havacılık Yolcu Taşımacılığı Sektöründe İç Hat Fiyatlandırması: Tarihsel Açıdan Bir İnceleme

Domestic Pricing in the Turkish Civil Aviation Passenger Transport Sector: A Historical Review 194 - 222

BEYZA NUR DUMAN - METEHAN ATAY

Türkiye İç Hat Havayolu Ağında Rota Kritikliği ve Yapısal Dayanıklılık: Edge Betweenness Centrality, Network Efficiency Loss ve Hedefli Kesinti Analizi

Route Criticality and Structural Resilience in the Turkish Domestic Airline Network: Edge Betweenness Centrality, Network Efficiency Loss, and Targeted Disruption Analysis 223 - 236

İLKER HAKAN ÖZARSLAN - BURAK KÜÇÜK

Sınıf-1 Kamikaze İHA Seçimi İçin Ahp ve Topsis Tabanlı Çok Kriterli Karar Verme Modeli

Ahp- And Topsis-Based Multi-Criteria Decision-Making Model for The Selection of Class-1 Kamikaze Uavs 237 - 261



Türkiye İç Hat Havayolu Ağında Rota Kritikliği ve Yapısal Dayanıklılık: Edge Betweenness Centrality, Network Efficiency Loss ve Hedefli Kesinti Analizi

Beyza Nur DUMAN¹ 

Metehan ATAY² 

Araştırma Makalesi	DOI: 10.51785/jar.1986740
Gönderi Tarihi: 04.07.2026	Kabul Tarihi: 12.08.2026
	Online Yayın Tarihi: 30.08.2026

Öz

Bu çalışma, Türkiye iç hat havayolu ağında kritik uçuş rotalarını ve rota kesintilerinin ağ verimliliği üzerindeki etkisini yönlü ve ağırlıklı bir ağ modeliyle incelemektedir. Araştırmada 13 havalimanı ve 147 yönlü rota içeren, Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü'nün 2024 yılı havalimanı yolcu istatistikleri temelinde araştırmacılar tarafından oluşturulan rota-talep matrisi kullanılmıştır. Ağustos ve şubat dönemleri yıllık rota talebinin sırasıyla %12 ve %6'sı olarak tanımlanan yüksek ve düşük talep senaryolarıdır. Yolcu hacmi bağlantı gücünü temsil ettiğinden, en kısa yol hesaplamalarında kenar maliyeti yolcu hacminin tersi olarak tanımlanmıştır. Kritik rotalar normalize Edge Betweenness Centrality (EBC) ile belirlenmiş, her rotanın tekil çıkarılması sonucunda yüzde Network Efficiency Loss (NEL) hesaplanmış ve kümülatif EBC-hedefli kesintiler 1.000 tekrarlı rastgele rota çıkarma simülasyonlarıyla karşılaştırılmıştır. Ağ yoğunluğu 0,9423, karşılıklık 0,9932 ve en büyük güçlü bağlı bileşen oranı 1,000 olarak bulunmuştur. Ankara-Sabiha Gökçen ve Sabiha Gökçen-Ankara rotaları en yüksek EBC değerlerine sahip olmuş; tekil çıkarılmaları ağ verimliliğinde sırasıyla %3,755 ve %3,761 kayıp oluşturmuştur. İlk 5, 10 ve 20 kritik rotanın hedefli çıkarılması sırasıyla %9,224, %13,746 ve %26,918 kayıp üretirken rastgele çıkarma ortalamaları %1,293, %2,730 ve %5,886 olmuştur. EBC ile NEL arasında güçlü pozitif ilişki bulunmuştur (Spearman $\rho=0,983$; $p<0,001$). Ağustos ve şubat senaryoları aynı rota seti ve oransal ağırlık yapısına sahip olduğundan yapısal kritiklik değişmemiş; dönem farkı yapısal dayanıklılıktan çok yolcu maruziyetinde ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Karmaşık ağ analizi, Edge betweenness xentrality, network efficiency loss, hedefli kesinti, havayolu ağı, Türkiye.

JEL Sınıflandırma: L93, R41, C61

Route Criticality and Structural Resilience in the Turkish Domestic Airline Network: Edge Betweenness Centrality, Network Efficiency Loss, and Targeted Disruption Analysis

Abstract

This study examines critical flight routes and the effects of route disruptions on network efficiency in the Turkish domestic airline network using a directed and weighted graph. The analysis uses a researcher-constructed route-demand matrix comprising 13 airports and 147 directed routes, based on 2024 airport passenger statistics published by the General Directorate of State Airports Authority. August and February are defined as high- and low-demand scenarios representing 12% and 6% of annual route demand, respectively. Because passenger volume represents connection strength, edge cost is defined as the inverse of passenger volume. Critical routes are identified using normalized Edge Betweenness Centrality (EBC); percentage Network Efficiency Loss (NEL) is calculated after individual route removal; and cumulative EBC-targeted

¹ Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Dr. Arş. Gör., bnur.duman@hku.edu.tr

² Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Dr. Öğr. Üyesi, metehan.atay@hku.edu.tr

disruptions are compared with 1,000-replication random route-removal simulations. Network density, reciprocity, and the share of the largest strongly connected component are 0.9423, 0.9932, and 1.000. The Ankara–Sabiha Gökçen and Sabiha Gökçen–Ankara routes have the highest EBC values; their individual removal reduces network efficiency by 3.755% and 3.761%. Removing the first 5, 10, and 20 critical routes produces losses of 9.224%, 13.746%, and 26.918%, compared with random-removal means of 1.293%, 2.730%, and 5.886%. EBC and NEL are strongly correlated (Spearman's $\rho=0.983$, $p<0.001$). Since August and February have identical route sets and proportional edge weights, structural criticality remains unchanged; the seasonal difference concerns passenger exposure rather than structural resilience.

Keywords: Air transport network, complex network analysis, edge betweenness centrality, network efficiency loss, targeted disruption, Türkiye.

JEL Classification: L93, R41, C61

GİRİŞ

Hava taşımacılığı; ekonomik, ticari ve toplumsal etkileşimi destekleyen stratejik bir ulaştırma sistemidir. Serbestleşme politikaları, düşük maliyetli taşıyıcıların yaygınlaşması, altyapı yatırımları ve artan yolcu talebi, havayolu ağlarını daha büyük ve birbirine bağımlı yapılara dönüştürmüştür. Bu nedenle havayolu sistemlerinin yalnızca kapasite ve trafik hacmi bakımından değil; bağlantısallık, erişilebilirlik, merkezilik ve dayanıklılık açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir. COVID-19 pandemisi, doğal afetler, aşırı meteorolojik olaylar ve hava sahası kısıtlamaları, kritik bileşenlerdeki kesintilerin ağ genelinde yayılabileceğini açık biçimde göstermiştir (Barabási, 2016; Newman, 2010; Sun vd., 2021).

Karmaşık ağ yaklaşımında havalimanları düğüm, doğrudan uçuş rotaları ise kenar olarak modellenmektedir. Bu çerçevede, ağların küçük dünya ve ölçekten bağımsız özelliklerini, merkezileşme eğilimlerini ve kritik bileşenlerini nicel olarak incelemeye olanak sağlamaktadır. Dünya ve bölgesel havayolu ağlarına ilişkin çalışmalar, bazı havalimanı ve rotaların yalnızca yüksek trafik hacimleri nedeniyle değil, farklı ağ toplulukları arasında köprü işlevi görmeleri nedeniyle de stratejik önem taşıdığını göstermektedir (Albert vd., 2000; Guida ve Maria, 2007; Guimerà vd., 2005; Zanin ve Lillo, 2013). Bağlantısallığın değerlendirilmesinde yalnız uçuş sayısının değil, bağlantıların ağ içindeki konumunun da dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır (Burghouwt ve Redondi, 2013).

Havayolu ağlarının önemli bir bölümü merkez-çevre (*hub-and-spoke*) mantığıyla örgütlenmektedir. Bu yapı filo kullanımı, aktarma olanakları ve maliyet yönetimi açısından önemli avantajlar sağlarken, trafiğin belirli merkezler ve koridorlar üzerinde yoğunlaşmasına yol açabilmektedir (Bryan ve O'Kelly, 1999; O'Kelly, 1998). Merkezileşmiş ağlar rastgele arızalara karşı görece dirençli olsa da kritik merkez veya bağlantılara yönelik hedefli kesintiler altında daha hızlı performans kaybedebilmektedir (Lordan vd., 2014). Büyük havalimanlarının geçici olarak kapanmasının alternatif erişilebilirlik ve ağ bütünlüğü üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu da ampirik olarak gösterilmiştir (Voltes-Dorta vd., 2017).

Kritik bağlantıların belirlenmesinde merkezilik göstergeleri temel araçlardır. Freeman'ın (1977, 1979) merkezilik yaklaşımından türeyen Edge Betweenness Centrality (EBC), bir rotanın ağdaki en kısa yolların ne kadarında aracılık yaptığını ölçmektedir. Bununla birlikte yüksek EBC, ilgili rotanın kaldırılması hâlinde oluşacak performans kaybını tek başına göstermez. Bu nedenle küresel verimlilik yaklaşımına dayanan Network Efficiency Loss (NEL), bir rotanın devre dışı kalması sonrasında ağın erişilebilirlik ve verimlilik düzeyindeki

görelî azalmayı ölçen tamamlayıcı bir göstergedir (Girvan ve Newman, 2002; Latora ve Marchiori, 2001). EBC ile NEL'in birlikte kullanılması, yapısal aracılık ile sistem düzeyindeki marjinal etkinin ayrıştırılmasını sağlamaktadır.

Güncel araştırmalar havayolu dayanıklılığını yalnız statik topoloji üzerinden değil; hedefli ve rastgele kesintiler, zamansal değişim ve akış ağırlıkları üzerinden ele almaktadır. Sistematik değerlendirmeler, ağ dayanıklılığı çalışmalarında bozulma senaryolarının ve performans temelli göstergelerin birlikte kullanılmasının önemini ortaya koymaktadır (Sun ve Wandelt, 2021). ABD ve Avrupa ağlarında yapılan ampirik analizler, benzer topolojik yapıya sahip sistemlerin kesinti türü ve operasyonel koşullara bağlı olarak farklı dayanıklılık profilleri sergileyebildiğini göstermiştir (Başpınar vd., 2023). Zamansal ağ çalışmalarında da gerçek dönemsel değişimin rota seti ve ağırlık yapısındaki heterojen değişimle ölçülmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Yang vd., 2023). *Global-efficiency* temelli kırılabilirlik göstergelerinin farklı ulaştırma türlerinde uygulanması, merkezilik ve performans kaybı ölçütlerinin ilişkili olmakla birlikte özdeş olmadığını desteklemektedir (Matsuo vd., 2022).

Türkiye iç hat havayolu ağına ilişkin çalışmalar daha çok havalimanı merkeziliği, trafik üretimi ve bağlantısalılık düzeylerine odaklanmıştır. Arıkan ve arkadaşları (2015), ağın İstanbul merkezli hiyerarşik yapısını ortaya koyarken, Güner ve arkadaşları (2024) havalimanı merkeziliği ile kaynak kullanım etkinliği arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Buna karşılık yönlü rotaların yapısal aracılığı, rota çıkarma sonucu oluşan verimlilik kaybı ve hedefli-rastgele kesinti farkını aynı çerçevede değerlendiren Türkiye odaklı çalışmalar sınırlıdır. Ayrıca talep ölçeğindeki değişim ile gerçek yapısal kırılabilirlik değişiminin birbirinden ayrılması, mevsimsel yorumların yöntemsel doğruluğu açısından önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye iç hat havayolu ağındaki kritik yönlü rotaları akış ağırlıklı EBC ile belirlemek, bu rotaların tekil çıkarılmasının küresel ağ verimliliği üzerindeki etkisini yüzde NEL ile ölçmek ve EBC'ye dayalı kümülatif hedefli kesintileri rastgele rota kesintileriyle karşılaştırmaktır. Çalışma ayrıca aynı rota yapısının farklı talep ölçekleri altında değerlendirilmesi yoluyla yapısal kırılabilirlik ile yolcu maruziyetini ayırtmaktadır. Bu kapsamda şu araştırma sorularına yanıt aranmaktadır: (i) ağın temel topolojik ve akış-ağırlıklı özellikleri nelerdir, (ii) en yüksek EBC ve NEL değerlerine sahip rotalar hangileridir, (iii) EBC ile NEL arasında anlamlı bir ilişki var mıdır, (iv) hedefli kesintiler rastgele kesintilere göre daha yüksek verimlilik kaybı üretmekte midir ve (v) yüksek ve düşük talep senaryoları yapısal kritik rota sıralamasını değiştirmekte midir?

2. YÖNTEM

Araştırmada Türkiye iç hat havayolu sistemi, Eşitlik (1)'de gösterildiği üzere $G=(V,E,W)$ biçiminde yönlü ve ağırlıklı bir ağ olarak modellenmiştir. V havalimanları, E doğrudan yönlü uçuş bağlantıları ve $W=\{w_{ij}\}$ rota talep ağırlıkları kümesini göstermektedir. Aynı havalimanı çiftindeki gidiş ve dönüş yönleri ayrı kenarlar olarak değerlendirilmiş; nihai ağ 13 düğüm ve 147 pozitif ağırlıklı yönlü kenardan oluşturulmuştur.

$$G = (V, E, W) \quad (1)$$

Yıllık rota-talep matrisi, Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü (DHMİ, 2024) tarafından yayımlanan havalimanı yolcu toplamaları temelinde araştırmacılar tarafından oluşturulmuştur. Havalimanı çifti düzeyindeki değerler doğrudan gözlenmiş köken-varış sayıları değil, tahmini rota ağırlıklarıdır. Ağustos ve şubat senaryoları, Eşitlik (2)'de gösterildiği üzere yıllık rota talebinin sırasıyla %12 ve %6'sı olarak tanımlanmıştır:

$$w_{ij}^{Aug} = 0,12w_{ij}^{Annual} ; w_{ij}^{Feb} = 0,06w_{ij}^{Annual} \quad (2)$$

Yolcu hacmi bağlantı gücünü temsil ettiğinden, yüksek hacimli rotaların daha düşük maliyetle gösterilmesi için kenar maliyeti Eşitlik (3)'teki ters ağırlık dönüşümüyle tanımlanmıştır:

$$c_{ij} = 1 / w_{ij} \quad (3)$$

Bir s-t yolu üzerindeki toplam maliyet, yolu oluşturan kenar maliyetlerinin toplamıdır. Yönlü ağırlıklı en kısa yol mesafesi d_{st} , Eşitlik (4)'te gösterildiği üzere tüm olası s-t yolları arasındaki en düşük toplam maliyet olarak hesaplanmıştır:

$$d_{st} = \min_{(P_{st})} \sum_{(i,j) \in P_{st}} c_{ij} \quad (4)$$

Ağın yapısal özelliklerini tanımlamak amacıyla düğüm ve kenar sayısı, yoğunluk, ortalama iç/dış derece, ağırlıklı düğüm gücü, karşılıklılık, güçlü bağlı bileşenler ve küresel verimlilik hesaplanmıştır. *Self-loop* içermeyen yönlü bir ağ için yoğunluk ve ortalama derece sırasıyla Eşitlik (5) ve Eşitlik (6) ile belirlenmiştir:

$$D = m / [n(n-1)] \quad (5)$$

$$\bar{k}^{in} = \bar{k}^{out} = m / n \quad (6)$$

Bir düğümün dış ve iç ağırlıklı gücü, Eşitlik (7)'de gösterildiği üzere ilgili düğümden çıkan ve düğüme gelen rota ağırlıklarının toplamıdır:

$$s_i^{out} = \sum_j w_{ij} ; s_i^{in} = \sum_j w_{ji} \quad (7)$$

Ağustos ve şubat rota kümelerinin yapısal benzerliği Eşitlik (8)'de verilen Jaccard katsayısıyla değerlendirilmiştir:

$$J(E_A, E_F) = |E_A \cap E_F| / |E_A \cup E_F| \quad (8)$$

Edge Betweenness Centrality (EBC), bir yönlü rotanın tüm kaynak-hedef çiftleri arasındaki en düşük maliyetli yollar üzerindeki aracılık düzeyini göstermektedir (Freeman, 1977, 1979; Girvan ve Newman, 2002). Normalize EBC, Eşitlik (9) ile hesaplanmıştır:

$$EBC(e) = [1 / ((n-1)(n-2))] \sum_{s \neq t} [\sigma_{st}(e) / \sigma_{st}] \quad (9)$$

Burada σ_{st} , s ile t arasındaki toplam en kısa yol sayısını; $\sigma_{st}(e)$, bu yolların e rotasından geçen bölümünü ifade etmektedir. Yüksek EBC değeri, rotanın ağın farklı bölümleri arasında daha güçlü bir köprü işlevi gördüğünü göstermektedir.

Küresel ağ verimliliği, Eşitlik (10)'da gösterildiği üzere tüm sıralı düğüm çiftleri arasındaki en kısa yol maliyetlerinin terslerinin ortalaması olarak hesaplanmıştır (Latora ve Marchiori, 2001). Erişilemeyen düğüm çiftleri toplam verimliliğe sıfır katkı sağlamıştır:

$$E(G) = [1 / n(n-1)] \sum_{i \neq j} (1 / d_{ij}) \quad (10)$$

Her yönlü rota başlangıç ağından ayrı ayrı çıkarılmış ve yeni ağın verimliliği yeniden hesaplanmıştır. Rotanın marjinal etkisi Eşitlik (11)'deki yüzde Network Efficiency Loss (NEL) ile ölçülmüştür:

$$NEL_e(\%) = \{[E(G) - E(G-e)] / E(G)\} \times 100 \quad (11)$$

Rotalar normalize EBC değerine göre azalan biçimde sıralanmış ve ilk k rota kümülatif olarak ağdan çıkarılmıştır. EBC-hedefli kümülatif verimlilik kaybı Eşitlik (12) ile hesaplanmıştır:

$$L_k^{target}(\%) = \{[E(G) - E(G-\{e_{(1)}, \dots, e_{(k)}\})] / E(G)\} \times 100 \quad (12)$$

Her k değeri için aynı sayıda rota rastgele seçilerek çıkarılmış ve işlem 1.000 kez tekrarlanmıştır. Rastgele çıkarma ortalaması Eşitlik (13) ile hesaplanmış; %2,5-%97,5 yüzdeliklerinden oluşan %95 simülasyon aralığı raporlanmıştır:

$$\bar{L}_k^{random} = (1/B) \sum_{\beta=1}^B L_{k,\beta}^{random}, \quad B = 1.000 \quad (13)$$

EBC ile NEL sıralamaları arasındaki ilişki ve ağustos-şubat dönemleri arasındaki sıra kararlılığı Eşitlik (14)'te verilen Spearman sıra korelasyon katsayısıyla değerlendirilmiştir:

$$\rho_s = 1 - [6\sum d_i^2 / m(m^2-1)] \quad (14)$$

Analiz mantığı ilk aşamada GAMS ortamında sınanmış, nihai hesaplamalar ve bağımsız doğrulamalar Python 3 ortamında NetworkX, NumPy ve SciPy paketleriyle yürütülmüştür (NetworkX Developers, 2024). Veri ön işleme ve sonuç tabloları Microsoft Excel ile mekânsal görselleştirmeler ise ArcGIS Pro kullanılarak hazırlanmıştır (Esri, 2024; Longley vd., 2015).

3. BULGULAR

3.1. Temel Ağ Özellikleri

Tablo 1. Ağustos ve şubat talep senaryolarının temel ağ göstergeleri

Gösterge	Ağustos	Şubat
Düğüm sayısı	13	13
Yönlü kenar sayısı	147	147
Ağ yoğunluğu	0,9423	0,9423
Ortalama iç/dış derece	11,3077	11,3077
Karşılıklılık	0,9932	0,9932
Güçlü bağlı bileşen sayısı	1	1
En büyük güçlü bileşen oranı	1,000	1,000
Ortalama yolcu gücü	494.287	247.143
Ağırlıklı küresel verimlilik	58.818,640	29.409,267
Rota seti Jaccard benzerliği	1,000	1,000

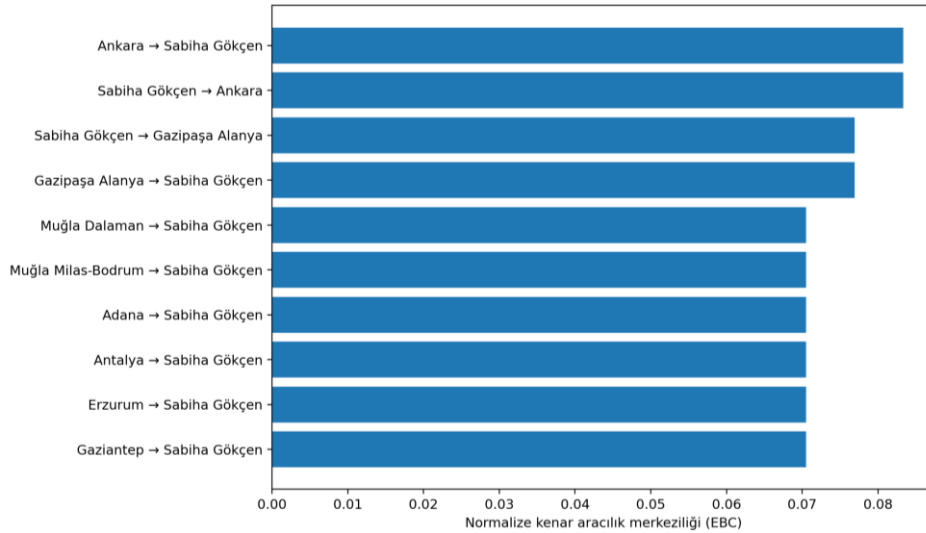
Her iki senaryoda 13 düğüm ve 147 yönlü rota bulunmuş, ağ yoğunluğu 0,9423 olarak hesaplanmıştır. Karşılıklılığın 0,9932 olması bağlantıların neredeyse tamamının çift yönlü olduğunu göstermektedir. Tüm düğümler tek bir güçlü bağlı bileşen içinde yer almıştır. Ağustos talebi şubat talebinin iki katı olduğu için ortalama yolcu gücü ve mutlak ağırlıklı küresel verimlilik de iki katına çıkmış; buna karşılık ağ topolojisi değişmemiştir.

3.2. EBC ve Tekil NEL Sonuçları

Tablo 2. En yüksek EBC değerine sahip ilk 12 rota ve tekil NEL sonuçları

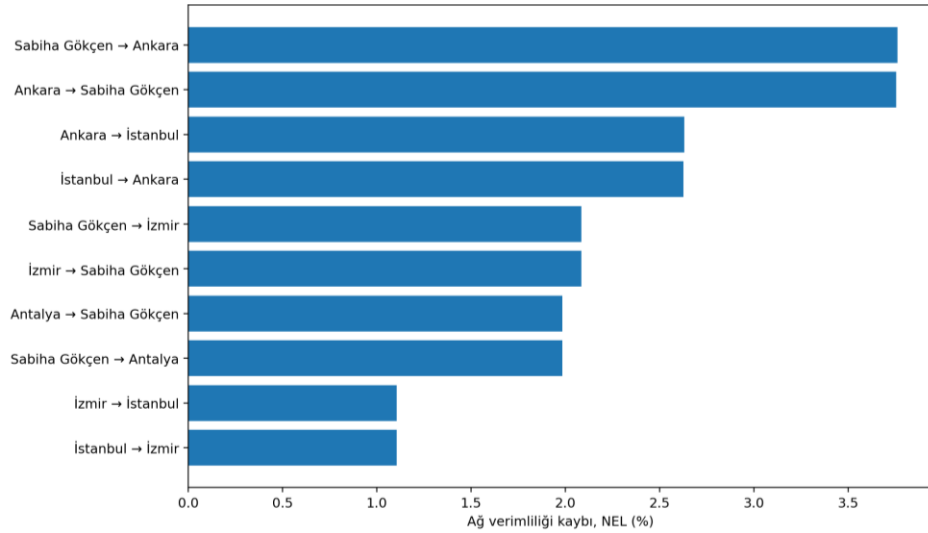
Sıra	Rota	Ağustos yolcu	Normalize EBC	NEL (%)
1	Ankara → Sabiha Gökçen	303.458	0,0833	3,755
2	Sabiha Gökçen → Ankara	303.458	0,0833	3,761
3	Gazipaşa Alanya → Sabiha Gökçen	14.584	0,0769	0,783
4	Sabiha Gökçen → Gazipaşa Alanya	14.584	0,0769	0,177
5	Adana → Sabiha Gökçen	77.144	0,0705	0,794
6	Antalya → Sabiha Gökçen	198.959	0,0705	1,984
7	Erzurum → Sabiha Gökçen	36.815	0,0705	0,403
8	Gaziantep → Sabiha Gökçen	80.466	0,0705	0,826
9	Muğla Dalaman → Sabiha Gökçen	58.256	0,0705	0,612
10	Muğla Milas-Bodrum → Sabiha Gökçen	74.705	0,0705	0,771
11	Sabiha Gökçen → İzmir	208.960	0,0705	2,084
12	İzmir → Sabiha Gökçen	208.960	0,0705	2,084

Ankara–Sabiha Gökçen ve Sabiha Gökçen–Ankara rotaları 0,0833 ile en yüksek normalize EBC değerlerine sahip olmuştur. Bu rotaların tekil çıkarılması ağ verimliliğinde sırasıyla %3,755 ve %3,761 kayıp yaratmıştır. Bazı rotalarda EBC ve NEL sıralamalarının ayrıştığı görülmüştür. Örneğin Gazipaşa Alanya–Sabiha Gökçen rotası yüksek EBC değerine karşın %0,783 NEL üretirken, daha düşük EBC değerine sahip Ankara–İstanbul rotası %2,630 NEL oluşturmıştır. Bu bulgu, rota aracılığı ile rota kaldırmanın sistem düzeyindeki etkisinin aynı kavram olmadığını göstermektedir.



Şekil 1. Normalize EBC değerine göre ilk 10 kritik rota

Şekil 1, ağın en yüksek aracılık değerlerine sahip rotalarının büyük ölçüde Sabiha Gökçen bağlantıları etrafında yoğunlaştığını göstermektedir. Ankara–Sabiha Gökçen koridoru ilk sırada yer alırken, Gazipaşa Alanya ve çeşitli bölgesel merkezlerden Sabiha Gökçen'e yönelen bağlantılar da yapısal köprü niteliği taşımaktadır.

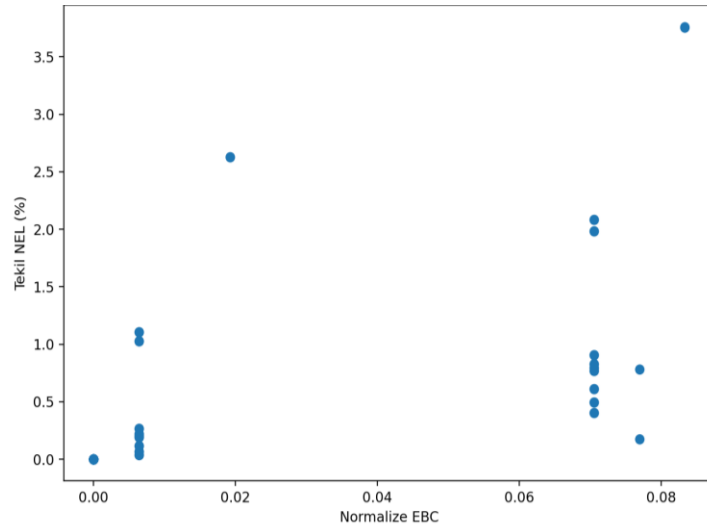


Şekil 2. Tekil rota çıkarma sonucunda en yüksek NEL (%) üreten ilk 10 rota

Şekil 2'de Ankara–Sabiha Gökçen çift yönlü koridorunun en yüksek tekil verimlilik kaybını oluşturduğu görülmektedir. Ankara–İstanbul rotalarının EBC sıralamasında daha geride olmasına rağmen yüksek NEL üretmesi, alternatif yol maliyetlerinin rota kritikliği üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

3.3. EBC ile NEL Arasındaki İlişki

Normalize EBC ile tekil yüzde NEL arasında güçlü ve pozitif bir sıra ilişkisi bulunmuştur (Spearman $\rho=0,983$; $p<0,001$). Bu sonuç, en kısa yollar üzerinde daha fazla aracılık yapan rotaların genel olarak daha yüksek verimlilik kaybı oluşturduğunu göstermektedir. Bununla birlikte bireysel rota sapmaları nedeniyle EBC ve NEL'in birlikte raporlanması gerekmektedir.



Şekil 3. Normalize EBC ile tekil NEL arasındaki ilişki

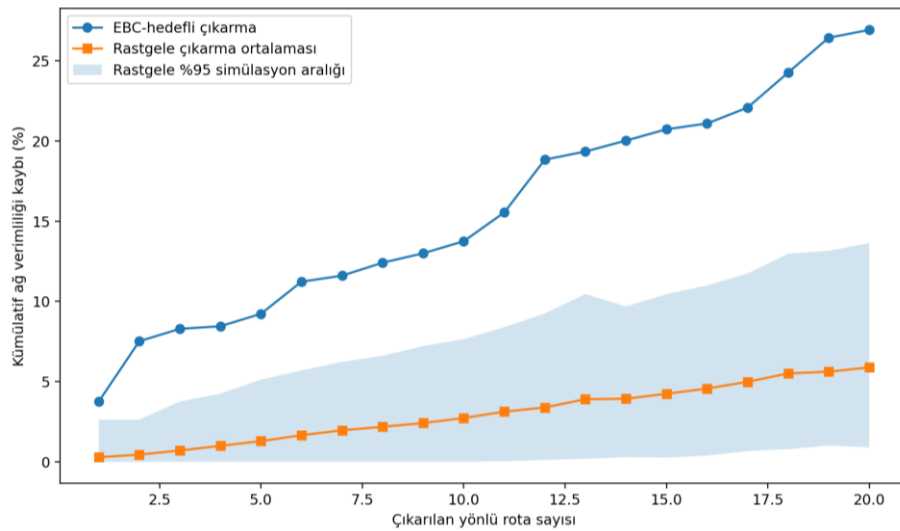
Şekil 3, EBC ile NEL arasındaki genel pozitif eğilimi görsel olarak doğrulamaktadır. Bununla birlikte aynı EBC düzeyinde farklı NEL değerlerinin gözlenmesi, yapısal aracılık ile rota çıkarma etkisinin tamamen eşdeğer olmadığını göstermektedir.

3.4. Hedefli ve Rastgele Rota Kesintileri

Tablo 3. Hedefli ve rastgele rota çıkarma sonuçlarının karşılaştırılması

Çıkarılan rota	Hedefli kayıp (%)	Rastgele ortalama (%)	Rastgele %2,5	Rastgele %97,5
1	3,755	0,262	0,000	3,761
3	7,878	0,785	0,000	4,399
5	9,224	1,293	0,000	5,122
10	13,746	2,730	0,000	7,645
15	20,938	4,243	0,338	10,367
20	26,918	5,886	0,898	13,633

EBC'ye göre hedefli çıkarma, incelenen tüm kesinti düzeylerinde rastgele çıkarma ortalamasından daha yüksek kayıp oluşturmıştır. İlk 5 kritik rotanın çıkarılması %9,224 kayıp yaratırken rastgele çıkarma ortalaması %1,293 olmuştur. İlk 10 rotada hedefli kayıp %13,746, rastgele ortalama %2,730; ilk 20 rotada ise hedefli kayıp %26,918, rastgele ortalama %5,886 olarak hesaplanmıştır. Buna göre hedefli kesinti etkisi, sırasıyla rastgele ortalamanın yaklaşık 7,13, 5,03 ve 4,57 katıdır. Bu sonuç, ağına rastgele rota kesintilerine kıyasla yüksek EBC'li rotalara yönelik hedefli kesintilere belirgin biçimde daha duyarlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Hedefli ve rastgele rota kesintileri altında kümülatif verimlilik kaybı

Şekil 4'te hedefli çıkarma eğrisinin rastgele çıkarma ortalamasından ve çoğu kesinti düzeyinde rastgele %95 simülasyon aralığından belirgin biçimde ayrıldığı görülmektedir. Hedefli kaybın k değeri arttıkça rastgele kayba göre daha hızlı büyümesi, kritik rotaların birbirini tamamlayan ağ işlevlerine sahip olduğunu ve ardışık kayıpların doğrusal olmayan bir performans bozulması oluşturduğunu göstermektedir.

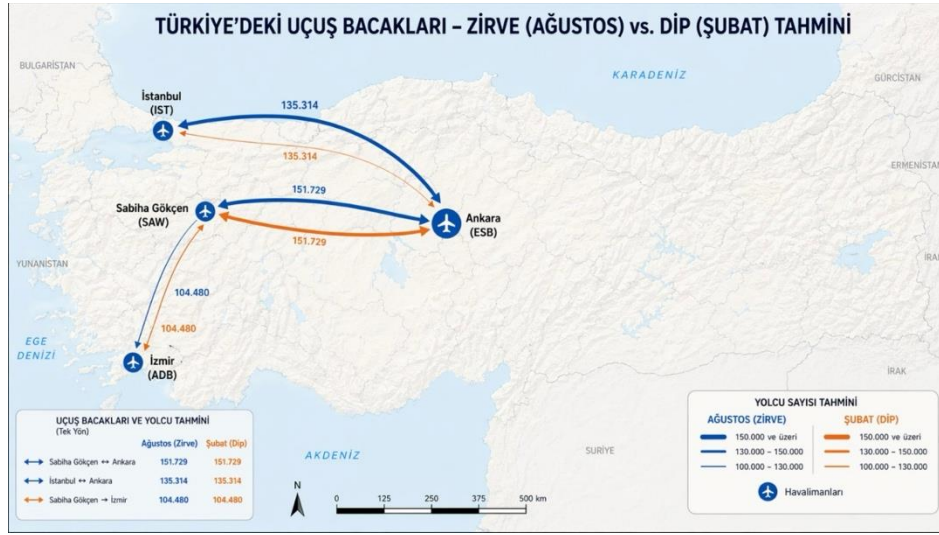
3.5. Ağustos ve Şubat Senaryolarının Karşılaştırılması

Ağustos ve şubat rota setlerinin Jaccard benzerliği 1,000 olarak bulunmuştur. EBC sıralamaları tamamen aynı kalmış (Spearman $\rho=1,000$; $p<0,001$), NEL sıralamaları da pratik olarak özdeş bulunmuştur ($\rho=0,99999$; $p<0,001$). Bunun nedeni şubat değerlerinin ağustos değerlerinin sabit bir oranı olması ve her iki senaryoda aynı rota setinin kullanılmasıdır. Tüm

kenar maliyetlerinin aynı sabit katsayıyla ölçeklenmesi en kısa yol yapısını ve yüzde NEL değerlerini değiştirmemektedir. Dolayısıyla mevcut senaryolar ağustos döneminde yapısal kırılmanın arttığını değil, aynı kritik rotalarda kesintiye maruz kalabilecek yolcu hacminin iki katına çıktığını göstermektedir.

şubat ve ağustos aylarına ait analiz sonuçları karşılaştırıldığında, mevsimsel talep değişimlerinin Türkiye iç hat havayolu ağının yapısal yük dağılımını önemli ölçüde etkilediği görölmektedir. Özellikle yaz sezonunu temsil eden ağustos ayında kritik uçuş rotalarında taşınan yolcu sayısının belirgin biçimde arttığđ, buna karşılık bağlantı yapısının büyük ölçüde değişmediği belirlenmiştir. Başka bir ifadeyle, ağın topolojik yapısı korunurken mevcut bağlantılar üzerindeki operasyonel yük önemli ölçüde yükselmektedir.

şekil 5'te ağustos ve şubat aylarına ait uçuş bağlantıları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



şekil 5. Ağustos ve şubat dönemlerine ait kritik uçuş bağlantılarının karşılaştırılması

şekil 5 incelendiğinde, ağustos döneminde özellikle İstanbul, İstanbul Sabiha Gökçen ve Ankara merkezli bağlantıların daha yoğun bir trafik oluşturduğu görölmektedir. Buna karşın şubat döneminde aynı bağlantılar korunmasına rağmen yolcu hacminin önemli ölçüde azaldığđ dikkat çekmektedir. Bu durum, mevsimsel talep artışının yeni bağlantılar oluşturmaktan ziyade mevcut kritik rotalar üzerindeki yoğunluğu artırdığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, Türkiye iç hat havayolu ağının mevsimsel talep değişimlerine rağmen benzer bir topolojik yapı sergilediğini, ancak yüksek sezonlarda ağın belirli merkez havalimanlarına bağımlılığının arttığını ortaya koymaktadır. Özellikle İstanbul ve Ankara merkezli uçuş koridorlarının her iki dönemde de ağın temel omurgasını oluşturması, bu bağlantıların operasyonel süreklilik açısından stratejik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

4. TARTIŞMA

4.1. Ağ Yapısı ve Kritik Koridorlar

Türkiye iç hat ağı yüksek yoğunluk, neredeyse tam karşılıklılık ve tek güçlü bağlı bileşen ile bağlantısal açıdan güçlü bir yapı göstermektedir. Bununla birlikte yüksek bağlantı yoğunluğu kritik akış koridorlarına bağımlılığı ortadan kaldırmamaktadır. Ankara–Sabiha Gökçen koridorunun hem EBC hem de NEL bakımından ilk sırada yer alması, bağlantı seçenekleri fazla olan yoğun bir ağda dahi belirli koridorların toplam verimlilik üzerinde orantısız rol oynayabileceğini göstermektedir. Bu bulgu, havalimanı trafik üretimi ile ağ merkeziliğinin ilişkili ancak özdeş olmadığını ortaya koyan Türkiye odaklı güncel çalışmalarla uyumludur (Güner vd., 2024).

Havayolu ağları üzerine yapılan araştırmalar, merkezileşmiş yapıların rastgele kesintilere karşı görece dayanıklı, kritik düğüm veya bağlantılara yönelik hedefli kesintilere karşı ise kırılgan olabildiğini göstermektedir (Lordan vd., 2014; Sun ve Wandelt, 2021). Bu çalışmada EBC'ye dayalı hedefli çıkarma kayıplarının rastgele çıkarma dağılımını açık biçimde aşması, bu genel örüntünün Türkiye iç hat ağı için rota düzeyinde de geçerli olduğunu göstermektedir.

4.2. EBC ve NEL'in Tamamlayıcı Rolü

EBC ile NEL arasındaki güçlü ilişki, en kısa yollar üzerinde köprü rolü üstlenen rotaların ağ verimliliğinin korunmasında da önemli olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte bazı rotalarda EBC ve NEL sıralamaları ayrılmıştır. EBC yapısal aracılığı ölçerken NEL, alternatif yolların maliyetleri dâhil olmak üzere rota kaldırmanın sistem düzeyindeki sonucunu ölçmektedir. Diğer ulaştırma ağlarında da merkezilik ve *global-efficiency* temelli kırılganlık göstergelerinin ilişkili fakat farklı kritik bileşenler üretebildiği bildirilmiştir (Matsuo vd., 2022).

Bu nedenle operasyonel önceliklendirme yalnız yolcu hacmine veya yalnız EBC değerine dayandırılmamalıdır. Yolcu hacmi kesintiden etkilenebilecek talep maruziyetini, EBC rotanın yapısal aracılığını, NEL ise rota kaybının sistem performansındaki marjinal etkisini temsil etmektedir. Üç göstergenin birlikte kullanılması yoğun, köprü ve sistem-kritik rotaların birbirinden ayrılmasına olanak sağlamaktadır.

4.3. Mevsimsellik ve Yolcu Maruziyeti

Revize analiz, aynı rota matrisinin sabit oranlarla ölçeklendiği ağustos ve şubat senaryoları arasında yapısal kırılganlık farkı bulunmadığını ortaya koymuştur. Topoloji, görelî rota ağırlıkları, EBC ve yüzde NEL değişmemiştir. Ağustos senaryosunda artan unsur, kritik rotalarda taşınan ve kesintiden etkilenebilecek yolcu hacmidir. Bu nedenle yüksek talep dönemi bulgusu “daha kırılgan ağ” yerine “aynı yapısal kritik rotalarda daha yüksek yolcu maruziyeti” olarak yorumlanmalıdır.

Gerçek zamansal yapısal değişimin test edilmesi için aylara göre rota açılış ve kapanışları, uçuş frekansı, koltuk kapasitesi, gecikme ve gerçek köken-varış (K-V) talep dağılımının kullanılması gerekmektedir. Zamansal ağ araştırmaları, dönemler arası dayanıklılık

değişiminin sabit ölçekleme yerine bağlantı ve ağırlık yapısındaki heterojen değişim üzerinden incelenmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Yang vd., 2023).

4.4. Kuramsal ve Uygulamalı Katkılar

Çalışmanın kuramsal katkısı, rota kritikliğini yapısal merkezilik, tekil marjinal verimlilik kaybı ve hedefli-rastgele bozulma karşılaştırması üzerinden bütünleştirmesidir. Bu yaklaşım yalnızca hangi rotanın merkezî olduğunu değil, ilgili rotanın kaybının ağ performansını ne ölçüde düşürdüğünü ve bu kaybın rastgele bir kesintiye kıyasla ne kadar yüksek olduğunu birlikte değerlendirmektedir.

Uygulama bakımından yüksek EBC ve yüksek NEL değerlerini birlikte taşıyan Ankara–Sabiha Gökçen, İstanbul-Ankara, Sabiha Gökçen–İzmir ve Sabiha Gökçen–Antalya yönleri kesinti izleme, geçici kapasite tahsisi ve alternatif bağlantı senaryoları açısından öncelikli inceleme adaylarıdır. Bununla birlikte bu çalışma belirli bir yeni rotanın açılmasını veya belirli miktarda kapasite tahsisini optimize etmemektedir. Bu nedenle sonuçlar doğrudan yatırım kararı değil, ileri senaryo ve optimizasyon modelleri için önceliklendirme girdisi olarak yorumlanmalıdır.

4.5. Araştırmanın Sınırlılıkları

Çalışmanın ilk sınırlılığı, rota ağırlıklarının doğrudan gözlenmiş K-V yolcu sayıları değil, DHMİ havalimanı toplamaları temelinde oluşturulmuş tahmini değerler olmasıdır. İkinci olarak ağustos ve şubat değerleri yıllık ağırlığın sabit oranlarıdır ve gerçek mevsimsel topoloji ve rota tercih değişimini yansıtmamaktadır. Üçüncü olarak yolcu hacminin tersi *shortest-path* maliyeti olarak kullanılmıştır; alternatif ağırlık dönüşümleri kritik rota sıralamasını değiştirebilir.

Dördüncü olarak analiz, rota kapanmasını tam kesinti olarak modellemekte; kısmi kapasite kaybı, yolcu yeniden yönlendirmesi ve taşıyıcıların operasyonel tepkilerini dikkate almamaktadır. Beşinci olarak ağ 13 seçili havalimanıyla sınırlıdır ve tüm Türkiye iç hat havalimanlarını kapsamamaktadır. Son olarak gecikme yayılımı, uçak ve ekip rotasyonları, zaman çizelgesi bağlantıları ve havayolu katmanları modele dâhil edilmemiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışma, Türkiye iç hat havayolu ağındaki rota kritikliğini akış ağırlıklı Edge Betweenness Centrality, tekil Network Efficiency Loss ve hedefli-rastgele kesinti analizlerini bütünleştirerek değerlendirmiştir. Ağın 0,9423 yoğunluk, 0,9932 karşılıklılık ve tek güçlü bağlı bileşen ile yüksek düzeyde bağlantılı olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte yüksek bağlantısallık, tüm rotaların ağ performansına eşit katkı sunduğu anlamına gelmemektedir. Ankara–Sabiha Gökçen koridoru hem yapısal aracılık hem de tekil verimlilik kaybı bakımından en kritik bağlantı olarak öne çıkmış; İstanbul-Ankara ve Sabiha Gökçen–İzmir koridorları da ağın bütünlüğünü koruyan başlıca rotalar arasında yer almıştır.

Çalışmanın temel ampirik sonucu, hedefli rota kayıplarının rastgele kesintilerden belirgin ölçüde daha yıkıcı olmasıdır. İlk 5, 10 ve 20 yüksek EBC'li rotanın kümülatif çıkarılması ağ verimliliğini sırasıyla %9,224, %13,746 ve %26,918 azaltırken, aynı sayıda rastgele rotanın çıkarılmasındaki ortalama kayıplar %1,293, %2,730 ve %5,886 düzeyinde kalmıştır. Hedefli

kesinti etkisinin bu üç düzeyde rastgele ortalamanın yaklaşık 7,13, 5,03 ve 4,57 katı olması, ağın genel olarak yoğun ve güçlü bağlı olmasına rağmen kritik koridorlara yönelik eşzamanlı kesintilere karşı seçici bir kırılabilirlik taşıdığını göstermektedir.

EBC ile NEL arasında saptanan güçlü ilişki, yapısal merkeziliğin rota kaybı sonrasında oluşan performans düşüşünü büyük ölçüde açıkladığını göstermektedir. Bununla birlikte bazı rotalarda EBC ve NEL sıralamalarının ayrışması, yapısal aracılık ile alternatif yol maliyetlerini içeren sistem etkisinin tamamen eşdeğer olmadığını ortaya koymuştur. Dolayısıyla yolcu hacmi, EBC ve NEL birbirinin yerine kullanılabilecek ölçütler değil; talep maruziyetini, yapısal köprü rolünü ve rota kaybının marjinal sistem etkisini birlikte değerlendiren tamamlayıcı göstergelerdir.

Ağustos ve şubat senaryolarına ilişkin sonuçlar, mevsimsel talep artışı ile yapısal kırılabilirlik arasında kavramsal ayrım yapılması gerektiğini göstermiştir. İki senaryoda rota seti ve göreceli ağırlık yapısı aynı olduğundan EBC ve yüzde NEL sıralamaları değişmemiştir. Dolayısıyla ağustos döneminde artan temel risk, ağ yapısının daha kırılabilir hâle gelmesi değil, aynı kritik rotalarda kesintiye maruz kalabilecek yolcu hacminin iki katına çıkmasıdır. Bu sonuç, sabit oranlarla ölçeklenen talep senaryolarının gerçek zamansal yapısal değişim olarak yorumlanmaması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Uygulama açısından yüksek EBC ve yüksek NEL değerlerini birlikte taşıyan rotalar; kesinti izleme, geçici kapasite tahsisi, alternatif aktarma planlaması ve operasyonel yedeklilik senaryoları için öncelikli adaylar olarak değerlendirilebilir. Çalışmanın yöntemsel katkısı, rota merkeziliği ile performans kaybını hedefli-rastgele bozulma karşılaştırması içinde bütünleştirmesidir. Gelecek araştırmalarda gerçek aylık K-V, frekans, koltuk kapasitesi ve gecikme verilerinin kullanılması; kısmi kapasite kayıpları, adaptif yeniden yönlendirme, düğüm kesintileri, havayolu katmanları ve toparlanma süresinin modele eklenmesi, yapısal dayanıklılığın operasyonel dayanıklılıkla daha kapsamlı biçimde ilişkilendirilmesini sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Albert, R., Jeong, H., ve Barabási, A.-L. (2000). Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 406(6794), 378-382. <https://doi.org/10.1038/35019019>
- Arıkan, M. O., Gürel, S., ve Pankuş, M. S. (2015). Türkiye iç hat havayolu ağının yapısal analizi ve merkezilik ölçütleri. *Havacılık ve Uzak Teknolojileri Dergisi*, 8(2), 45-58.
- Barabási, A.-L. (2016). *Network science*. Cambridge University Press.
- Bryan, D. L., ve O'Kelly, M. E. (1999). Hub-and-spoke networks in air transportation: An analytical review. *Journal of Regional Science*, 39(2), 275-295. <https://doi.org/10.1111/0022-4146.00134>
- Burghouwt, G., ve Redondi, R. (2013). Connectivity in air transport networks: An assessment of models and applications. *Journal of Transport Economics and Policy*, 47(1), 35-53.
- Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü. (2024). 2024 yılı hava yolu istatistikleri. <https://www.dhmi.gov.tr>
- Esri. (2024). ArcGIS Pro [Computer software]. <https://www.esri.com>
- Freeman, L. C. (1977). A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, 40(1), 35-41. <https://doi.org/10.2307/3033543>
- Freeman, L. C. (1979). Centrality in social networks: Conceptual clarification. *Social Networks*, 1(3), 215-239. [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7)
- Girvan, M., ve Newman, M. E. J. (2002). Community structure in social and biological networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(12), 7821-7826. <https://doi.org/10.1073/pnas.122653799>
- Guida, M., ve Maria, F. (2007). Topology of the Italian airport network: A scale-free small-world network with a fractal structure? *Chaos, Solitons ve Fractals*, 31(3), 527-536. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2006.02.007>
- Guimerà, R., Mossa, S., Turtshi, A., ve Amaral, L. A. N. (2005). The worldwide air transportation network: Anomalous centrality, community structure, and cities' global roles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(22), 7794-7799. <https://doi.org/10.1073/pnas.0407994102>
- Latora, V., ve Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. *Physical Review Letters*, 87(19), 198701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.198701>
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., ve Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems* (4th ed.). Wiley.
- Lordan, O., Sallan, J. M., Simo, P., ve Gonzalez-Prieto, D. (2014). Robustness of the air transport network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 68, 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.05.011>
- Newman, M. E. J. (2010). *Networks: An introduction*. Oxford University Press.
- O'Kelly, M. E. (1998). A geographer's analysis of hub-and-spoke networks. *Journal of Transport Geography*, 6(3), 171-186. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(98\)00010-6](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(98)00010-6)

- Sun, X., Wandelt, S., ve Zhang, A. (2021). How did COVID-19 impact air transportation? A first peek through the lens of complex networks. *Journal of Air Transport Management*, 89, 101928. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101928>
- Voltes-Dorta, A., Rodríguez-Déniz, H., ve Suau-Sanchez, P. (2017). Vulnerability of the European air transport network to major airport closures from the perspective of passenger delays: Ranking the most critical airports. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 102, 50-63. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.12.009>
- Zanin, M., Lillo, F. Modelling the air transport with complex networks: A short review. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 215, 5–21 (2013). <https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01711-9>
- Başpınar, B., Gopalakrishnan, K., Koyuncu, E., ve Balakrishnan, H. (2023). An empirical study of the resilience of the U.S. and European air transportation networks. *Journal of Air Transport Management*, 106, 102303. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102303>
- Güner, S., Antunes, J. J. M., Seçkin Codal, K., ve Wanke, P. (2024). Network centrality driven airport efficiency: A weight-restricted network DEA. *Journal of Air Transport Management*, 116, 102551. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102551>
- Matsuo, Y., Yamaguchi, H., ve Miwa, T. (2022). Comparison between algebraic connectivity-based and global efficiency-based vulnerability for railway topology analysis: A case study of Kyushu, Japan. *Asian Transport Studies*, 8, 100074. <https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2022.100074>
- NetworkX Developers. (2024). NetworkX documentation. <https://networkx.org/documentation/stable/>
- Sun, X., ve Wandelt, S. (2021). Robustness of air transportation as complex networks: Systematic review of 15 years of research and outlook into the future. *Sustainability*, 13(11), 6446. <https://doi.org/10.3390/su13116446>
- Yang, H., Sun, X., Le, T., ve Zhang, A. (2023). The Chinese aviation network: An empirical temporal analysis on its structural properties and robustness. *Applied Sciences*, 13(21), 11627. <https://doi.org/10.3390/app132111627>

