

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



İÇ HAT UÇUŞLARDA HAVA ARACI YAKIT
VERİMLİLİĞİNİN ÇOKLU DOĞRUSAL
REGRESYON ANALİZİ
Ertuğrul Metehan SERTDEMİR

Yüksek Lisans Tezi
HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

MART 2025

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

İÇ HAT UÇUŞLARDA HAVA ARACI YAKIT VERİMLİLİĞİNİN ÇOKLU DOĞRUSAL REGRESYON ANALİZİ

Tez Yazarı
Ertuğrul Metehan SERTDEMİR

Danışman
Doç. Dr. Hülya KAFTELEN ODABAŞI

MART 2025
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	İç Hat Uçuşlarda Hava Aracı Yakıt Verimliliğinin Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi
Yazarı:	Ertuğrul Metehan SERTDEMİR
İlk Teslim Tarihi:	03.03.2025
Savunma Tarihi:	25.03.2025

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Doç. Dr. Hülya KAFTELEN ODABAŞI Fırat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Doç. Dr. Berat ÇİÇEK Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Zehra URAL BAYRAK Fırat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “ İç Hat Uçuşlarda Hava Aracı Yakıt Verimliliğinin Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

25.03.2025

Ertuğrul Metehan SERTDEMİR



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince akademik olarak bu yolda yürümeme vesile olan, gerek eğitim gerekse hayat tecrübeleri ile bana yön veren, desteğini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Hülya KAFTELEN ODABAŞI'na teşekkürlerimi sunarım.

Tez dönemi boyunca için vaktini ayırıp gösterdiği ilgi ve katkılarından dolayı, Sayın Ali ALTINOK'a teşekkürü borç bilirim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca benden desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Ertuğrul Metehan SERTDEMİR

ELAZIĞ, 2025



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÖZET	vii
ABSTRACT.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. AIRBUS A321 UÇAK TİPİNİN GENEL TANIMI.....	5
2.1. Gövde.....	6
2.2. Kanatlar.....	7
2.3. Motorlar.....	9
2.4. Kokpit.....	11
2.5. İniş Takımları.....	11
2.6. Kuyruk bölümü.....	12
3. AIRBUS UÇAKLARINDA YAPISAL İYİLEŞTİRMELER.....	14
3.1. Alüminyum-Lityum Alaşımlar ve Gelişmiş Kompozit Malzemeler.....	15
3.2. Yapısal Tasarım ve Mühendislik İyileştirmelerinin Çevresel ve Ekonomik Etkileri.....	16
3.3. Yakıt Verimliliği.....	17
3.4. Alternatif Yakıtlar ve Biyoyakıt Kullanımı.....	19
3.5. Operasyonel Stratejiler ve Yakıt Verimliliği.....	23
3.5.1. Uçuş Rotalarının ve Planlamasının Optimizasyonu.....	23
3.5.2. Uçuş Seviyelerinin Belirlenmesi ve Yük Yönetimi.....	24
3.5.3. Uçak İçi Ağırlık Azaltma Stratejileri.....	25
3.5.4. Hız Yönetimi ve Uçuş Hızı Optimizasyonu.....	26
4. YENİ NESİL UÇAK MOTORLARININ KULLANIMI VE ÇEVRE DOSTU ÖZELLİKLERİ...27	
4.1. Geared Turbofan (GTF) Motorları: PW1100G.....	27
4.2. LEAP-1A Motorları.....	29
4.3. Ultra-High Bypass (UHB) Motorlar: Rolls-Royce UltraFan.....	30
5. YENİ NESİL MOTOR TEKNOLOJİLERİNİN MALİYET VE EKONOMİK ETKİLERİ.....32	
5.1. Biyoyakıt Kullanımının Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi.....	33
5.2. Elektrikli ve Hibrit Motorların Ekonomik Analizi.....	34
5.3. Karbon Dengeleme Projeleri ve Ekonomik Faydaları.....	34
6. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK HAREKETLERİNİN HAVAYOLU ŞİRKETLERİNE ETKİLERİ 37	
7. ÇOKLU DOĞRUSAL REGRESYON ANALİZİNİN TANIMI VE TEMEL KAVRAMLARI 42	
7.1. Çoklu Doğrusal Regresyon Analizinin Varsayımları ve Özellikleri.....	44
7.1.1. Doğrusallık Varsayımı.....	44
7.1.2. Bağımsızlık Varsayımı.....	45
7.1.3. Hata Terimlerinin Normallik Varsayımı.....	45
7.1.4. Sabit Varyans (Homoskedastisite) Varsayımı.....	45

8. ÇOKLU DOĞRUSAL REGRESYON ANALİZİNİN UYGULAMA ALANLARI VE KULLANIM ALANLARI	47
8.1. Çoklu Doğrusal Regresyon Analizinin Avantajları ve Kısıtlamaları.....	48
9. ARAŞTIRMANIN YÖNTEMİ	50
10. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	70
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

İç Hat Uçuşlarda Hava Aracı Yakıt Verimliliğinin Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi

Ertuğrul Metehan SERTDEMİR

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Mart 2025, Sayfa: xi + 80

Bu tez çalışması, Airbus A321 uçak modelinin çevresel ve operasyonel verimlilik özelliklerini analiz ederek havacılık sektörünün sürdürülebilirlik hedeflerine nasıl katkıda bulunduğunu incelemektedir. A321, dar gövdeli ve orta menzilli uçaklar kategorisinde, yüksek yolcu kapasitesi, yakıt verimliliği ve çevre dostu teknolojileriyle öne çıkmaktadır. Çalışma kapsamında, A321'in yapısal tasarımı, motor teknolojileri, aerodinamik özellikleri ve malzeme kullanımı detaylı şekilde ele alınmıştır.

Yakıt tüketimini etkileyen faktörlerin karmaşık yapısını çözümlmek amacıyla çoklu doğrusal regresyon analizi yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, yakıt tüketimi ile uçağın performansı ve operasyonel parametreleri arasındaki ilişkileri istatistiksel olarak modelleyerek, etkili tasarım ve işletme stratejileri geliştirmeye olanak tanımaktadır. Regresyon analizi, parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimlerini de değerlendirilerek yakıt verimliliğini optimize etmek için uygulanabilir sonuçlar sunmaktadır.

Yakıt tüketimini azaltmaya yönelik yenilikçi çözümler, özellikle Pratt & Whitney PW1100G ve CFM LEAP-1A motorlarının sağladığı teknolojik avantajlarla incelenmiştir. Ayrıca, aerodinamik iyileştirmeler ve hafif kompozit malzemelerin kullanımı, karbon emisyonlarını azaltma ve operasyonel maliyetleri düşürme açısından değerlendirilmektedir.

Tezde, A321'in yakıt verimliliğini analiz edebilmek için; operasyon boyunca harcanan yakıt miktarının, yolcu sayısı, uçuş seviyesi, uçuş mesafesi, ortalama rüzgar, ortalama hız, uçuş süresi (dakika) ve uçak kalkış ağırlığı gibi parametrelerle olan ilişkisi analiz edilmiştir. Sonuç olarak, havacılık sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için biyoyakıt kullanımı, hidrojen yakıtlı sistemler ve yenilikçi motor teknolojileri gibi öneriler sunulmaktadır.

Bu çalışma, A321 gibi modern uçak modellerinin, havacılık sektörünün çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma konusundaki potansiyelini ortaya koyarak sektördeki yenilikçi yaklaşımlara ışık tutmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir havacılık, Airbus, Yakıt verimliliği, Çoklu doğrusal regresyon analizi.

ABSTRACT

Multiple Linear Regression Analysis of Aircraft Fuel Efficiency in Domestic Flights

Ertuğrul Metehan SERTDEMİR

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Aviation Science and Technologies

March 2025, Pages: xi + 80

This thesis analyzes the environmental and operational efficiency features of the Airbus A321 aircraft model and examines how it contributes to the sustainability goals of the aviation sector. The A321 stands out in the narrow-body and medium-range aircraft category with its high passenger capacity, fuel efficiency and environmentally friendly technologies. Within the scope of the study, the structural design, engine technologies, aerodynamic properties and material use of the A321 are discussed in detail.

Multiple linear regression analysis method was preferred in order to analyze the complex structure of the factors affecting fuel consumption. This method allows the development of effective design and operating strategies by statistically modeling the relationships between fuel consumption and the aircraft's performance and operational parameters. Regression analysis also evaluates the interactions of the parameters with each other and provides applicable results to optimize fuel efficiency.

Innovative solutions for reducing fuel consumption were examined, especially with the technological advantages provided by the Pratt & Whitney PW1100G and CFM LEAP-1A engines. In addition, aerodynamic improvements and the use of lightweight composite materials are evaluated in terms of reducing carbon emissions and reducing operational costs.

In the thesis, the environmental impacts of A321 are analyzed in the context of carbon emissions, noise pollution, chemical emissions and water vapor effects. As a result, suggestions such as biofuel use, hydrogen fuel systems and innovative engine technologies are presented to achieve sustainability goals in the aviation sector.

This study sheds light on innovative approaches in the sector by revealing the potential of modern aircraft models such as A321 to achieve environmental sustainability goals in the aviation sector.

Keywords: Sustainable aviation, Airbus, Fuel efficiency, Multiple linear regression analysis.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Airbus A321 gövde bölgesi	7
Şekil 2.2. Sharklet yapısı	8
Şekil 2.3. PW1100G-JM kesit görünümü	10
Şekil 2.4. Fly-By-Wire Uçuş Kontrol Sistemi	11
Şekil 2.5. Ön iniş takımları	12
Şekil 2.6. A321 kuyruk bölümü	13
Şekil 3.1. Kriyojenik yakıt deposu	19
Şekil 4.1. Geared Turbofan	28
Şekil 4.2. LEAP-1A	30
Şekil 9.1. Harcanan yakıt dağılım grafiği	52
Şekil 9.2. Yolcu sayısı dağılım grafiği.....	53
Şekil 9.3. Uçuş mesafesi dağılım grafiği.....	54
Şekil 9.4. Ortalama rüzgar dağılım grafiği.....	55
Şekil 9.5. Ortalama hız dağılım grafiği.....	56
Şekil 9.6. Uçuş süresi dağılım grafiği.....	58
Şekil 9.7. Uçak kalkış ağırlığı dağılım grafiği.....	59
Şekil 9.8. Toplam yakıt dağılım grafiği	60
Şekil 9.9. Kolmogorov-Smirnov ve Korelasyon Analizi	61
Şekil 9.10. Parametrelerin Alt-Üst Katsayıları ve Min-Maks Değerleri	63

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 9.1. Çarpıklık - Basıklık Değerleri	51
Tablo 9.2. Regresyon İstatistikleri	65
Tablo 9.3. Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi Modeli	66



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al-li	: Alüminyum Lityum
CO ₂	: Karbondioksit
NO _x	: Azot Oksit

Kısaltmalar

IATA	: Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği
ANN	: Yapay Sinir Ağları
CFM	: Safran Uçak Motorları
FT-SPK	: Fischer-Tropsch
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü
EU-RED	: Avrupa Yenilenebilir Enerji Direktifi
US-RFS2	: Amerika Yenilenebilir Yakıt Standartları
SAF	: Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı
MRC	: Maksimum Menzil Seyri
LRC	: Uzun Menzil Seyri
MTOW	: Uçak Kalkış Ağırlığı
CMC	: Seramik Matris Kompozit
SMLR	: Çoklu Doğrusal Regresyon
RF	: Rastgele Orman
PFPN	: Kısmi Faktör Verimliliği

1. GİRİŞ

20. yüzyılın başlarından itibaren havacılık sektörü, insanlık tarihindeki en hızlı gelişen ve dönüştürücü etkiler yaratan alanlardan biri haline gelmiştir. Özellikle ilk ticari uçuşların gerçekleşmesiyle birlikte, bu sektör yalnızca teknik yeniliklerin ve mühendislik harikalarının bir göstergesi olmakla kalmamış, aynı zamanda küresel ölçekte ulaştırma, ticaret ve turizmin gelişiminde de büyük bir rol oynamıştır. Havacılık sektörü, insanlara uzak mesafeleri çok daha kısa sürede kat etme imkânı tanıyarak, dünyanın en ücra köşelerinin dahi erişilebilir hale gelmesini sağlamış ve farklı coğrafyalar arasında güçlü ekonomik ve sosyal bağların oluşmasına katkıda bulunmuştur. Havayolu taşımacılığının hızla yaygınlaşması, ülkeler ve kıtalar arasındaki sınırların etkisini azaltarak, küresel bir köy haline gelen dünyada insanlar ve toplumlar arasındaki etkileşimi artırmıştır [1].

Bununla birlikte, günümüzde havacılık sektörünün hızla artan uçuş sayıları, genişleyen havayolu filoları ve bu gelişimin tetiklediği çevresel etkiler, sektörün sürdürülebilirliği konusunda ciddi endişeleri de beraberinde getirmektedir. Özellikle karbon emisyonlarının artışı, fosil yakıt tüketimine olan bağımlılık ve bu durumun çevresel dengesizliklere yol açması, havacılık endüstrisinin karşılaştığı temel sorunlar arasında yer almaktadır. Havayolu taşımacılığı, sağladığı ekonomik ve sosyal faydalar kadar, çevre üzerinde bıraktığı olumsuz etkilerle de dikkat çekmektedir. Küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel tehditler, havacılık sektörünün faaliyetlerini sürdürülebilir kılacak çözümler geliştirmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, daha verimli yakıt teknolojilerinin geliştirilmesi ve karbon ayak izinin azaltılması gibi konular, sektörün geleceği için hayati bir önem taşımaktadır [2].

Havacılık sektörünün bu zorluklarla başa çıkabilmesi hem endüstrinin hem de hükümetlerin iş birliği içinde yenilikçi ve çevre dostu çözümler üretmesini gerektirmektedir. Aynı zamanda, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılması için kamu bilincinin artırılması ve bireylerin çevre dostu seçeneklere yönlendirilmesi de önem taşımaktadır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar, havacılığın küresel ekonomik kalkınmadaki olumlu etkilerini sürdürürken, çevresel yükünü de en aza indirmeyi hedeflemektedir.

Günümüzde sürdürülebilirlik, sadece çevresel bir gereklilik olmanın ötesine geçerek, sektörel rekabetin sürdürülebilirliği ve operasyonel maliyetlerin etkin bir şekilde yönetilmesi açısından stratejik bir önem taşımaktadır. Küresel ölçekte havacılık sektörü, artan çevresel farkındalık ve düzenleyici baskılar nedeniyle çevresel etkilerini minimize etmeyi öncelikli bir hedef olarak benimsemiştir. Bu bağlamda, Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA) başta olmak üzere sektördeki birçok önemli paydaş, 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonu hedefini gerçekleştirme taahhüdüyle, daha sürdürülebilir bir havacılığa geçişi hızlandırmayı amaçlamaktadır [3]. Bu hedef, sadece çevresel koruma için değil, aynı zamanda havayolu

şirketlerinin uzun vadede rekabet gücünü artırması ve maliyet avantajları elde etmesi açısından da kritik bir rol oynamaktadır [3].

Bu hedeflere ulaşmak için uçak tasarımında önemli yenilikler hayata geçirilmektedir. Yakıt verimliliğini artırmak ve karbon ayak izini azaltmak amacıyla geliştirilen çözümler arasında, iyileştirilmiş aerodinamik yapılar, hafif kompozit malzemelerin kullanımı ve yenilikçi motor teknolojileri bulunmaktadır. Aerodinamik tasarımda yapılan iyileştirmeler, hava direncini azaltarak uçakların daha az enerji harcamasını sağlarken, hafif malzemeler uçakların ağırlığını düşürerek yakıt tüketimini optimize etmektedir [4]. Motor teknolojilerinde ise daha verimli yanma süreçleri ve hibrit-elektrikli sistemlere geçiş gibi yenilikçi yaklaşımlar dikkat çekmektedir. Bu tür teknolojik gelişmelerin somut bir örneği, Airbus A321 tipi uçaklarda görülmektedir. Bu uçaklar, orta mesafe uçuşlar için geliştirilmiş yüksek yakıt verimliliği sunan tasarımları ve modern hava taşımacılığının gereksinimlerine uygun yapılarıyla sektörde öne çıkmaktadır [4].

Bunun yanı sıra, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada bilimsel ve teknolojik araştırmalar büyük bir önem taşımaktadır. Özellikle yakıt tüketimini etkileyen faktörlerin anlaşılması ve bu faktörlerin karmaşık etkileşimlerinin çözümlenmesi, havacılık sektöründeki verimliliği artırmak için kritik bir gerekliliktir. Son yıllarda yapılan araştırmalar, bu amaç doğrultusunda istatistiksel modelleme tekniklerinin kullanımına dikkat çekmektedir [4]. Regresyon analizi gibi yöntemler, uçak performansı ile yakıt verimliliği arasındaki ilişkileri derinlemesine inceleyerek, veriye dayalı karar alma süreçlerine katkıda bulunmaktadır [5]. Bu tür analizler, sadece mevcut teknolojilerin iyileştirilmesi için değil, aynı zamanda gelecekte daha sürdürülebilir uçak tasarımlarının geliştirilmesi için de yol gösterici olmaktadır [5]. Efendigil ve Eminler'in yapmış olduğu bir çalışmada [6] havacılık sektöründe yolcu talebini etkileyen değişkenler arasındaki ilişkileri belirlemek ve tahmin modellerinin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla regresyon analizi kullanılmıştır. Regresyon denkleminin bağımlı değişkeni olarak yolcu talebi ele alınmış ve bağımsız değişkenler ile arasındaki istatistiksel ilişkiler çoklu doğrusal regresyon modeli ile analiz edilmiştir. Elde edilen regresyon sonuçları, yapay sinir ağları (ANN) ve ANFIS gibi yapay zekâ tabanlı modellerle karşılaştırılarak geleneksel ekonometrik yöntemlerin tahmin performansı değerlendirilmiştir. Yapılan başka bir çalışmada ise Eskişehir'deki sis oluşumunun tahmini ve havacılık operasyonları üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla regresyon analizi kullanılmıştır [7]. Sis tahmini için ilgili regresyon denkleminde bağımlı değişken olarak görüş mesafesi baz alınmış ve lojistik regresyon modeli ile meteorolojik faktörlerin sis oluşumu üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen modelde hava sıcaklığı, nem, basınç ve rüzgar hızı gibi değişkenlerin sis oluşumu üzerindeki istatistiksel etkilerini değerlendirilerek havacılık operasyonlarında kullanılabilecek bir tahmin aracı sunmaktadır [7]. Dolayısıyla havacılık sektörünün sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşması, teknolojik yenilikler, bilimsel araştırmalar ve sektörel iş birliklerinin bir araya gelmesiyle mümkün olacaktır. Bu süreç, hem çevresel etkilerin

azaltılmasına katkı sağlarken hem de sektörde rekabet avantajı ve uzun vadeli sürdürülebilirlik için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

A321 gibi dar gövdeli uçaklarda yapısal iyileştirmeler ve hafif malzemelerin kullanımı, havayolu şirketleri için yüksek yakıt tasarrufu sağlamanın yanı sıra, çevresel etkileri en aza indirmektedir. Bu tür uçaklar, yakıt verimliliği hususunda başarılı bir pilot sınıfı sayılmakla beraber gelecek inovatif yaklaşımlar için de örnek uçak modelleri arasında yer almaktadır. Özellikle orta mesafeli uçuşlarda yakıt tüketimini optimize etmek gerek optimum havayolu ağını sağlamak gerekse yeşil havacılık alanında önemli bir çalışma alanı sağlamaktadır. Yapısal iyileştirmeler, uçuş başına maliyetleri düşürerek hem şirketlere ekonomik avantaj sağlamak hem de sürdürülebilir havacılık hedeflerine katkıda bulunmaktadır [7]. A321 gibi dar gövdeli uçak modellerinde kullanılan yeni nesil malzemeler, uçağın ağırlığını hafifletmekle kalmamakla birlikte dayanıklılığını da artırarak havayolu şirketleri için daha hesaplı bakım ve onarım maliyetleri ve daha uzun ömürlü bir kullanım sunmaktadır [8]. Tüm bunlar göz önüne alındığında havacılıkta sürdürülebilir kalkınma terimi havacılık otoriteleri için oldukça önemli bir çalışma kolu haline gelmiştir. Sürdürülebilir kalkınma terimi, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama hedefinden ödün vermeden mevcut neslin ihtiyaçlarının karşılanması gerektiği anlamına gelmektedir [8].

Bu tez çalışmasında çoklu doğrusal regresyon analizi için pilot sınıfı olan A321 uçak modeli tercih edilmiştir. Bu tercihin temel sebeplerinden birisi yeni nesil motor teknolojileri (LEAP-1A ve PW1100G) sayesinde A321 modelinin yakıt tüketiminin önceki modellere kıyasla %17 ila %50 oranında azaldığı tespit edilmesidir [9]. Elde edilen bulgular, motor teknolojilerindeki gelişmeler ve aerodinamik iyileştirmelerin yakıt tasarrufu üzerindeki etkisini ortaya koyarak, A321'in dar gövdeli uçaklar arasında yakıt verimliliği açısından en optimal modellerden biri olduğunu göstermektedir [9]. Airbus'ın yayımlamış olduğu bir raporda [10] yüksek irtifalarda gerçekleştirilen operasyonlarda yakıt tüketiminin optimize edildiği ancak bu avantajın rüzgâr hızı ve hava yoğunluğu gibi parametrelerle ilişkilendirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca, düşük ağırlık konfigürasyonları ve yakıt yönetim stratejilerinin uçuş verimliliğini artırdığı ifade edilmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı, havacılık alanyazınında Airbus A321'in operasyonel verimliliğini artırmak için istatistikî analiz eksikliğini tamamlamak ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda yakıt verimliliği ve sürdürülebilir havacılık alanında gelecek çalışmalara ışık tutmaktır. Bu amaç doğrultusunda çoklu doğrusal regresyon modeli tercih edilmiş olup bağımlı değişken olarak operasyon boyunca harcanan yakıt ele alınmıştır. Bağımsız değişkenler ise yolcu sayısı, uçuş seviyesi, uçuş mesafesi, ortalama rüzgâr, ortalama hız, uçuş süresi (dakika) ve uçak kalkış ağırlığı kullanılarak A321 uçak modelinin yakıt verimliliği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Bu tezin ikinci bölümünde Airbus A321 uçak tipinin genel tanımı ve özelliklerinden bahsedilmiş ve gövde, kanat, kokpit, kuyruk gibi temel uçak bileşenleri açıklanmıştır. Üçüncü

bölümde ise Airbus filosu üzerine yapılmış olan çalışmalardan bahsedilmiştir. Bu tez çalışmasının dördüncü bölümünde, yeni nesil uçak motorlarının kullanımı ve çevre dostu özellikleri ele alınmakta olup, bu motorların yakıt verimliliği, karbon emisyonlarının azaltılması ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki katkıları incelenmektedir. Beşinci bölümde, yeni nesil motor teknolojilerinin maliyet ve ekonomik etkileri kapsamında literatürde mevcut çalışmalar ve genel ekonomik değerlendirmeler sunulmaktadır. Altıncı bölümde, sürdürülebilirlik hareketlerinin havayolu şirketlerine etkileri incelenerek, uluslararası regülasyonlar, çevre politikaları ve yeşil havacılık girişimlerinin sektöre olan yansımaları ele alınmaktadır. Yedinci bölümde, çoklu doğrusal regresyon analizinin tanımı ve temel kavramları açıklanarak, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri modelleme süreci teorik çerçevede değerlendirilmektedir. Sekizinci bölümde, bu analiz yönteminin havacılık, finans ve mühendislik gibi farklı disiplinlerdeki uygulama alanları ele alınarak, yöntemin hangi durumlarda tercih edildiği tartışılmaktadır. Dokuzuncu bölümde, araştırmanın yöntemi detaylandırılmakta olup, veri toplama süreçleri, analiz teknikleri ve kullanılan istatistiksel yöntemler açıklanmaktadır.

2. AIRBUS A321 UÇAK TİPİNİN GENEL TANIMI

Airbus A321, Airbus'ın dar gövdeli ve orta menzilli uçak kategorisindeki en başarılı modellerinden biri olarak hem havayolu şirketleri hem de yolcular tarafından büyük ilgi görmüştür. Bu model, Airbus'ın ünlü A320 ailesinin bir parçası olup, bu serinin en uzun gövdeye sahip uçağıdır [11]. Airbus, A320 ailesini ilk kez 1988 yılında piyasaya sürmüş ve bu seri, kısa sürede dünya genelinde havayolu filolarında geniş bir kullanım alanı bulmuştur [11]. A320 ailesinin başarısı, modern havayolu taşımacılığında verimlilik, konfor ve performans konularında çitayı yükseltmiş; A321 modeli ise bu başarıyı daha ileri taşımıştır. A320 ailesinin geliştirilmesindeki temel hedeflerden biri, dar gövdeli uçak segmentinde hem kısa hem de orta mesafeli uçuşlar için esnek ve maliyet açısından avantajlı bir çözüm sunmaktır. A321, bu hedeflere uygun olarak, artırılmış yolcu kapasitesi ve genişletilmiş menzil özellikleriyle dikkat çekmiştir.

A321'in geliştirilme süreci, havayolu taşımacılığı sektöründe artan yolcu talebine ve daha yüksek kapasiteli uçak ihtiyacına yanıt olarak şekillendirilmiştir. İlk uçuşunu 1993 yılında gerçekleştiren A321, 1994 yılında ticari uçuşlar için kullanılmaya başlanmıştır [11]. Bu model, özellikle orta menzilli uçuşlar için ideal bir seçenek sunarak havayolu şirketlerinin operasyonel verimliliklerini artırmalarına olanak sağlamıştır. A321, Boeing 737 gibi diğer popüler dar gövdeli uçak modelleriyle doğrudan rekabet ederken, yolcu kapasitesindeki üstünlüğü ve geliştirilmiş yakıt verimliliği ile öne çıkmaktadır. Airbus, A321'i tasarlarken uçak performansını ve çevresel uyumluluğunu en üst düzeye çıkarmayı hedeflemiştir. Bu doğrultuda yapılan yenilikler, uçağın ticari havacılıkta geniş bir müşteri kitlesine hitap etmesini sağlamıştır.

A321'in tasarımında kullanılan yenilikçi mühendislik teknikleri ve gelişmiş malzemeler, uçağın performansını artırırken aynı zamanda yakıt tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltmayı mümkün kılmıştır. Uçak gövdesinde, geleneksel metal malzemelere kıyasla daha hafif ve dayanıklı olan kompozit malzemeler tercih edilmiştir [12]. Bu sayede uçak hem daha az yakıt tüketmekte hem de daha uzun ömürlü bir yapıya sahip olmaktadır. Aerodinamik tasarımı üzerinde yapılan iyileştirmeler, uçağın hava direncini minimum seviyeye indirerek enerji verimliliğini artırmıştır. Bunun yanı sıra, A321'in motor sistemleri de yüksek verimlilikle çalışacak şekilde optimize edilmiştir. Bu özellikler, uçağın operasyonel maliyetlerini düşürmekle kalmamış, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaj sağlamıştır [12]. Günümüzde havacılık sektörü, karbon emisyonlarını azaltmayı ve çevreye duyarlı çözümler geliştirmeyi hedeflemektedir. A321, bu hedeflere uygun olarak geliştirilmiş bir uçak modeli olarak öne çıkmaktadır.

A321'in kabin tasarımı, yolcu konforunu artırmak için özel olarak optimize edilmiştir. Bu model, genellikle iki sınıflı bir yerleşim düzenine sahiptir ve bu düzen hem ekonomi sınıfı yolcular hem de birinci sınıf yolcular için yüksek konfor standartları sunmaktadır. İki sınıflı bir yapılandırmada A321'in yolcu kapasitesi yaklaşık 185 kişidir, ancak havayolu şirketlerinin

tercihine bağılı olarak bu kapasite artırılabilir veya azaltılabilir [12]. Uçağın geniş gövdesi, kabin içindeki hareket alanını artırırken, yolculara daha rahat bir uçuş deneyimi sunmaktadır. Ayrıca, kabin içindeki aydınlatma, koltuk düzeni ve depolama alanları gibi detaylar, modern yolcu ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde tasarlanmıştır. A321'in menzili, yaklaşık 5.950 kilometreye kadar çıkabilmektedir. Bu özellik, A321'i özellikle kıtalararası olmayan orta mesafeli uçuşlar için uygun bir seçenek haline getirmiştir [13]. Havayolu şirketleri, bu modeli yoğun talep gören rotalarda kullanarak operasyonel esneklik elde etmektedir.

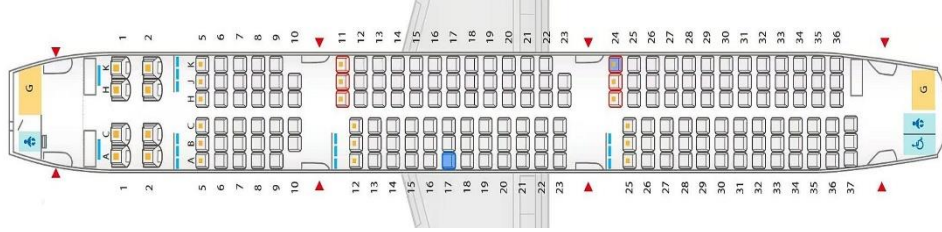
A321'in ticari başarısının arkasında, yalnızca teknik özellikleri değil, aynı zamanda ekonomik avantajları da yer almaktadır. Yakıt verimliliği, havayolu şirketleri için operasyonel maliyetleri önemli ölçüde düşürmektedir. Daha az yakıt tüketen bir uçak, aynı zamanda daha düşük karbon emisyonu ile çevre dostu bir operasyon sağlamaktadır. Bu durum, havacılık sektöründeki sürdürülebilirlik hedefleriyle doğrudan uyumludur. Ayrıca, A321'in bakım gereksinimleri, optimize edilmiş bir bakım planı ile azaltılmıştır. Bu, havayolu şirketlerinin bakım maliyetlerini düşürmesine ve uçaklarını daha uzun süre hizmette tutmasına olanak tanımaktadır [13]. A321'in ekonomik avantajları, sadece havayolu şirketleri için değil, aynı zamanda yolcular için de olumlu sonuçlar doğurmuştur. Daha düşük operasyonel maliyetler, bilet fiyatlarının daha rekabetçi seviyelerde tutulmasına yardımcı olmuştur.

Airbus A321, hem teknik hem de ticari açıdan havacılık sektörünün en başarılı uçak modellerinden biri olarak kabul edilmektedir. Gelişmiş mühendislik, üstün performans ve çevre dostu özellikleri sayesinde, modern havayolu taşımacılığında önemli bir yer edinmiştir. Uçağın geniş yolcu kapasitesi, uzun menzili ve düşük yakıt tüketimi, A321'i hem havayolu şirketleri hem de yolcular için ideal bir seçenek haline getirmiştir. Airbus'ın bu modeli, gelecekte de havacılık sektöründeki önemini koruyacak ve sektöre katkı sağlamaya devam edecektir. Bu bölümde yakıt verimliliğinde önemli etkiye sahip A321 tipi uçaklara ait yapısal komponentlerin tanımına yer verilmiştir. A321 tipi uçaklarda gövde, kanat, motor, kokpit, iniş takımları ve kuyruk bölümü detaylı olarak incelenmiştir.

2.1. Gövde

A321'in gövdesi, uçak tasarımında hem estetik hem de işlevsellik açısından merkezi bir öneme sahiptir. Gövde yapısı, uçuş boyunca yolcu ve kargo bölümlerini koruma, yük taşıma kapasitesini sağlama ve aerodinamik sürtünmeyi minimize etme görevlerini üstlenmektedir. A321'in gövdesi, A320 ailesinin diğer modellerine kıyasla daha uzun olup, 44,5 metreye kadar ulaşan bir uzunluğa sahiptir. Bu uzun gövde tasarımı, uçağın daha fazla yolcu taşımasına olanak tanımaktadır [14]. Gövdenin iç kısmında yolcu kabini, kargo alanı ve kokpit bölgesi bulunmaktadır. Yolcu kabini, ergonomik koltuk düzenlemeleri ve gelişmiş ses yalıtımı ile donatılmış olup yolculuk

boyunca konforlu bir seyahat deneyimi sağlamaktadır [15]. Şekil 2.1 de Airbus A321 tipi uçaklara ait gövde yapısı ve yolcu yerleşim düzeni gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Airbus A321 gövde bölgesi [15]

A321'in gövde yapısında kullanılan malzemeler, geleneksel metal alaşımlar ve kompozit malzemelerin bir kombinasyonundan oluşmaktadır [15]. Bu kompozit malzemeler, ağırlığı azaltarak yakıt verimliliğini artırırken, aynı zamanda yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağlamak amacıyla uyumlu bir şekilde dizayn edilmiştir. Gövdenin aerodinamik yapısı, uçuş sırasında hava akışını optimize edecek şekilde tasarlanmıştır, bu da yakıt tüketiminin düşürülmesine katkı sağlamıştır. Gövde tasarımında özellikle burun kısmı aerodinamik direnci minimize edecek bir yapıya sahip olmasının en büyük amacı, uçağın performansı ve yakıt ekonomisini desteklemektir [16].

2.2. Kanatlar

Kanatlar her hava aracı için olduğu gibi A321'in de uçuş performansında hayati bir öneme sahiptir ve söz konusu uçak modelinin havacılık endüstrisinde yüksek verimlilik sağlayan bir model olarak öne çıkmasında kritik bir rol oynamaktadır. A321'in kanat açıklığı 35,8 metre olup, bu geniş ve aerodinamik olarak optimize edilmiş kanat yapısı, uçuş sırasında gerekli kaldırma kuvvetini sağlamak üzere tasarlanmıştır [17]. Airbus, bu kanat tasarımını geliştirirken hem aerodinamik verimliliği artırmayı hem de yakıt tüketimini düşürmeyi hedeflemiştir. Şekil 2.2 de gösterilen ve kanatların uç kısmında yer alan ve "sharklet" olarak adlandırılan kanat ucu uzantıları, bu hedeflere ulaşılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Sharklet'ler, uçak kanatlarının uç kısmında oluşan hava türbülansını azaltarak uçuş sırasında daha verimli bir kaldırma kuvveti üretmektedir [17]. Bununla birlikte, yakıt tüketimini yaklaşık %4 oranında azaltan bu tasarım unsuru, A321'in hem çevre dostu hem de ekonomik bir uçak modeli olarak konumlanmasına büyük katkı sağlamaktadır. Yakıt verimliliği, modern havacılıkta çevresel sürdürülebilirlik ve operasyonel maliyetlerin azaltılması açısından büyük bir öneme sahiptir ve A321, sharklet'ler sayesinde bu alanlarda başarılı bir performans sergilemektedir.



Şekil 2.2. Sharklet yapısı [18].

Yukarıda gösterilen şekil 2.2'de Airbus A321 uçağına ait kanat yapısı gösterilmektedir. Kanadın uç kısmında yer alan dikey eleman, "Sharklet" olarak adlandırılan aerodinamik bir bileşendir. Sharklet'ler, indüklenmiş sürüklemeyi azaltarak yakıt tüketimini optimize etmeye ve menzili artırmaya yönelik tasarlanmıştır. Kanatların yapısında kullanılan malzemeler de A321'in üstün mühendislik özelliklerini ortaya koymaktadır. Kanatların iç yapısında ağırlığı hafifletirken dayanıklılığı artıran ileri teknoloji malzemeler, özellikle titanyum ve kompozit malzemeler tercih edilmiştir [19]. Bu malzemeler, uçağın yapısal bütünlüğünü korumakla kalmayıp, aynı zamanda yüksek hız ve basınca dayanıklılık sağlamaktadır. Özellikle uzun uçuşlar sırasında kanatlara uygulanan sürekli yükler göz önüne alındığında, bu malzemeler, uçuş güvenliğini artırmak ve uçağın ömrünü uzatmak için kritik bir rol oynamaktadır. Hafif ve dayanıklı malzemelerin kullanımı ayrıca yakıt tüketimini azaltarak, uçağın daha çevre dostu bir model olmasına katkıda bulunma amacını desteklemektedir. Airbus, bu malzemeleri seçerken aynı zamanda bakım maliyetlerini düşürmeyi de hedeflemiştir. Daha dayanıklı bir yapı, daha az sıklıkla bakım gereksinimi anlamına gelir ve bu da havayolu şirketleri için uzun vadede önemli bir maliyet avantajı sağlamaktadır.

Kanatların üzerinde yer alan hareketli yüzeyler, uçağın performansını ve güvenliğini artıran önemli unsurlardan birisidir [20]. Bu hareketli yüzeyler arasında aileronlar, flaplar ve spoilerlar yer almaktadır. Aileronlar, uçağın yatay eksen etrafında manevra yapmasını sağlayarak, yön kontrolü açısından kritik bir işlev görmektedirler. Flaplar ise özellikle kalkış ve iniş aşamalarında devreye girerek, ek kaldırma kuvveti sağlar böylelikle kalkış sırasında flapların kullanılması, uçağın daha kısa mesafede havalanmasını mümkün kılarak pist kullanımını optimize etmektedir [20]. Benzer şekilde, iniş sırasında flapların devreye girmesi, uçağın düşük hızda bile yeterli kaldırma kuvveti üreterek güvenli bir şekilde iniş yapmasını sağlar. Spoilerlar ise hem hızın azaltılmasında hem de iniş sırasında uçağın pist üzerinde daha hızlı bir şekilde yavaşlatılmasında etkili bir şekilde kullanılır. Bu hareketli yüzeylerin uyum içinde çalışması, A321'in manevra kabiliyetini artırırken uçuşun her aşamasında daha güvenli ve kontrollü bir deneyim sunmaktadır [21].

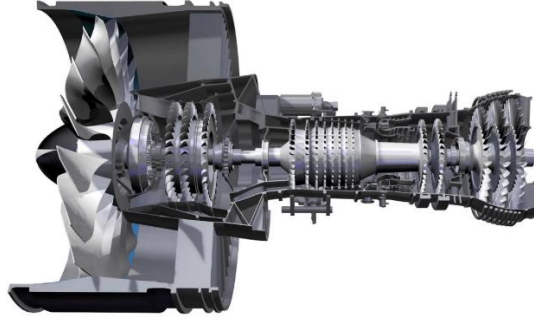
A321'in kanat tasarımı aerodinamik verimliliği artırmaya yönelik yapılan bu iyileştirmeler, uçağın genel performansını doğrudan etkilemekle birlikte uçuş sırasında kanatların hava akışını optimize eden yapısı, uçağın hızını artırırken yakıt tüketimini minimum seviyeye indirmektedir [21]. Bu da sadece havayolu şirketlerinin operasyonel maliyetlerini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda karbon emisyonlarının azaltılmasına da katkıda bulunmaktadır. Modern havacılıkta çevresel etkilerin en aza indirilmesi, sektörün öncelikli hedefleri arasında yer almakta ve A321, kanat tasarımındaki bu yenilikçi özelliklerle bu hedeflere uyum sağlamaktadır. Sharklet'lerin yanı sıra kanat yüzeyinin genel tasarımı hem aerodinamik hem de yapısal dayanıklılık açısından modern mühendislik çözümlerinin bir örneğini sunar. Kanatların tüm bu özellikleri, A321'in yalnızca bir yolcu uçağı olmaktan öte, çevreye duyarlı, yüksek verimlilik sağlayan ve ekonomik bir çözüm olarak havacılık sektöründe kendine sağlam bir yer edinmesine olanak tanımaktadır.

Sonuç olarak, A321'in kanat tasarımı hem aerodinamik performansı hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini destekleyecek şekilde optimize edilmiştir. Sharklet'ler, kanat yapısında kullanılan ileri teknoloji malzemeler ve hareketli yüzeylerin uyumlu işlevleri, uçağın performansını artırırken, aynı zamanda havayolu taşımacılığında daha ekonomik ve çevre dostu bir model sunar. Airbus, bu tasarım özellikleriyle A321'i, modern havacılık ihtiyaçlarına en uygun çözümlerden biri haline getirmiştir.

2.3. Motorlar

A321, modern havacılığın ihtiyaçlarına uygun olarak tasarlanmış motor sistemleriyle donatılmış olup, genellikle Pratt & Whitney PW1100G veya CFM International LEAP-1A motorlarını kullanmaktadır [22]. Bu motorlar hem yüksek yakıt verimliliği hem de düşük karbon emisyonları ile tanınmakta ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Havacılık sektörünün, yakıt maliyetlerini azaltırken çevresel etkileri en aza indirme hedefleri göz önüne alındığında, bu motorlar A321 için ideal bir tercih olarak öne çıkmaktadır. Hem PW1100G hem de LEAP-1A motorları, gelişmiş mühendislik teknolojilerinin bir sonucu olarak "geared turbofan" adı verilen yenilikçi bir mekanizmaya sahiptir. Bu teknoloji, motorların çalışma performansını artırırken enerji verimliliğini maksimum seviyeye çıkarmayı amaçlamaktadır [22].

Pratt & Whitney tarafından geliştirilen PW1100G motorları, özellikle yüksek verimlilik ve düşük işletme maliyetleri sunan yapısıyla dikkat çekmektedir. Bu motorlarda kullanılan "geared turbofan" sistemi, kompresör fanının bağımsız olarak dönebilmesini sağlayan özel bir dişli mekanizması içermektedir [22].



Şekil 2.3. PW1100G-JM kesit görünümü [22].

Şekil 2.3'te, Pratt & Whitney PW1100G-JM tipi bir turboprop motorunun kesit görünümü verilmiştir. Bu motor tasarımı, motorun daha düşük devirlerde çalışmasına olanak tanırken, yakıt tüketimini önemli ölçüde azaltır ve yanma sürecini daha verimli hale getirmektedir [23]. Yanma verimliliğinin artması, yalnızca yakıt tasarrufu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda karbon emisyonlarının azaltılmasına da katkıda bulunur [23]. Bu da PW1100G motorlarını, çevreye duyarlı havayolu taşımacılığı için ideal bir seçenek haline getirmektedir. Dişli mekanizması ayrıca motorun daha sessiz çalışmasını sağlayarak hem uçuş sırasında hem de havalimanlarında oluşan gürültü kirliliğini minimum seviyeye indirir. Bu özellik, özellikle yoğun yerleşim bölgelerine yakın havaalanlarında uçan havayolu şirketleri için büyük bir avantaj sunmaktadır.

General Electric ve Safran Aircraft Engines International (CFM) tarafından üretilen LEAP-1A motorları da A321'in performansını destekleyen bir diğer seçenektir. Bu motorlar, Pratt & Whitney PW1100G motorlarına benzer şekilde "geared turboprop" teknolojisini kullanarak yüksek itme kuvveti ve üstün yakıt verimliliği sağlamaktadır [24]. LEAP-1A motorlarının tasarımında, aerodinamik verimliliği artırmak ve ağırlığı azaltmak amacıyla karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ve seramik matris kompozitler (CMC) gibi ileri seviye hafif malzemeler kullanılmıştır [24]. Özellikle fan kanatları ve fan muhafazası, geleneksel metal alaşımlara kıyasla daha düşük yoğunluğa sahip CFRP malzemeden üretilmiş olup, bu sayede motorun toplam ağırlığı azaltılarak yakıt verimliliği artırılmıştır. Yanma odası ve türbin bileşenlerinde ise yüksek sıcaklıklara dayanıklı CMC malzemeleri kullanılmış, böylece daha yüksek termal verimlilik sağlanarak yakıt tüketimi ve karbon emisyonları azaltılmıştır [25]. Bu malzeme seçimleri, LEAP-1A motorlarının geleneksel turboprop motorlara kıyasla %15'e varan yakıt tasarrufu sunmasına ve bakım aralıklarının uzatılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, LEAP-1A motorları, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli olan karbon emisyonlarını azaltmak için özel olarak optimize edilmiştir. Bu motorlar, daha temiz bir yanma süreci sağlayarak, modern havacılığın çevreye duyarlı hedeflerine katkıda bulunmaktadır.

Sonuç olarak, A321'in motor sistemleri, modern havacılıkta enerji verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik işletme hedeflerini bir araya getiren ileri teknolojilerden

yararlanılarak tasarlanmıştır. Hem Pratt & Whitney PW1100G hem de CFM International LEAP-1A motorları, üstün performans ve düşük çevresel etki sunarak, A321'i havayolu taşımacılığında güçlü ve rekabetçi bir seçenek haline getirmektedir. Bu motorlar sayesinde A321 hem havayolu şirketlerinin hem de çevresel hedeflerin ihtiyaçlarına yanıt veren bir uçak modeli olarak öne çıkmaktadır.

2.4. Kokpit

A321'in kokpiti, gelişmiş dijital ekranlar ve uçuş yönetim sistemleriyle donatılmış modern bir yapıya sahiptir. Şekil 2.4'de gösterildiği üzere Airbus'ın "fly-by-wire" teknolojisi ile donatılmış olan kokpitte, pilotlar geleneksel mekanik kontroller yerine elektronik sinyaller kullanarak uçağı yönlendirmektedir [26]. Böylece sistem, uçağın manevra kabiliyetini artırmakla yetinmeyip uçuş emniyetini ve verimliliğini de desteklemektedir.



Şekil 2.4. Fly-By-Wire Uçuş Kontrol Sistemi [27].

Kokpit ekranları, pilotlara uçuş sırasında gerekli tüm bilgileri hızlı ve anlaşılır bir şekilde sunmaktadır. Bu ekranlar, navigasyon, hava durumu, motor durumu ve yakıt seviyesi gibi bilgileri içermektedir. Ayrıca, otomatik pilot ve uçuş yönetim sistemi ile donatılmış kokpit, pilotlara uçuş sırasında büyük kolaylık sağlar ve insan hatası riskini minimize etmektedir [27].

2.5. İniş Takımları

İniş takımları, her uçakta olduğu gibi A321'in de iniş ve kalkış sırasındaki uçuş emniyetini sağlayan en önemli bileşenlerden biridir. İniş takımları, darbe emici mekanizmalardan ve güçlü fren sistemlerinden oluşmaktadır. Aynı zamanda iniş takımlarının sahip olduğu katı kaplamalar, tork bağlantısı ve fren gibi bileşenlerin neden olduğu türbülanslı akışı sınırlandırarak, gürültü azaltımı açısından da önemli bir avantaj sağlamaktadır [28]. Ancak, bu tür kaplamalar yüksek hızlardaki akışın kenarlarından ayrılmasına yol açarak, yeni gürültü kaynaklarının da ortaya

çıkmasına sebebiyet vermiştir. Öte yandan, gözenekli kaplamalar bu olumsuzluğu büyük ölçüde gidermiş ve akışın daha dengeli bir şekilde yönlendirilmesine olanak tanımıştır. Bununla birlikte, gözenekli malzemelerin içinden geçen akış, özellikle yüksek frekanslarda "kendinden kaynaklanan gürültü" olarak adlandırılan bir akustik yan etki yaratabilmektedir [28]. Bu durum, akustik performansın optimize edilmesi için gözenekli yapıların tasarım parametrelerinin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2.5. Ön iniş takımları

Şekil 2.5’de gösterildiği üzere iniş takımlarının bir diğer önemli bölümü de boru tasarımıdır. Neumaier ve arkadaşları [29] yapmış olduğu çalışmada uçak tasarım süreçlerinde boru güzergahlarının manuel olarak belirlenmesinin, zaman ve kaynak açısından maliyetli olmasının yanı sıra, karmaşık yapısal sorunlar nedeniyle önemli tasarım zorlukları olduğunu da ele almıştır. Özellikle Airbus A320 iniş takımı gibi yoğun ve sınırlı alanlarda, boruların engellerden kaçınarak ve üretim süreçlerinin teknik kısıtlamalarına uyum sağlayarak optimize edilmesi gerekliliği, sürecin zorluk derecesini artırmaktadır. Bu problem, grafik tabanlı tasarım dilleri ve simüle edilmiş tavlama algoritması kullanılarak boru güzergahlarının otomatikleştirilmesi ve optimize edilmesiyle çözülmektedir. Önerilen yöntem, boruların üretim kısıtlarına uygun şekilde tasarlanmasını, engellerden kaçınmasını ve tasarım sürecinin verimliliğini artırarak karmaşık yapısal iyileştirmelerde hızlı ve doğru çözümler sunmaktadır [29].

2.6. Kuyruk bölümü

A321 model uçağın kuyruğu, her hava aracında olduğu gibi uçağın uçuş sırasında stabilitesini koruması ve yön kontrolünü gerçekleştirebilmesi için tasarlanmış dikey ve yatay stabilizörlerden meydana gelmektedir [30]. Bu önemli yapı elemanlarından biri olan dikey stabilizör, rudder adı verilen hareketli parçası sayesinde uçağın yatay düzlemde sağa veya sola doğru hareket etmesini sağlarken, bir diğer temel bileşen olan yatay stabilizör ise elevator adı verilen kontrol yüzeyleri aracılığıyla uçağın yükselip alçalmasını, dolayısıyla irtifasının hassas bir şekilde ayarlanmasını mümkün kılmaktadır [30]. Şekil 2.6’da gösterilmiş olan stabilizörler, uçuşun sorunsuz bir şekilde gerçekleşmesi için aerodinamik dengeyi sağlamakla birlikte, pilotların manevra kabiliyetini artıran önemli birer unsurdur [30]. Bu bileşenler, uçuş esnasında uçağın dengesini koruma görevini üstlenerek, türbülans gibi beklenmeyen ve kontrol dışı çevresel etkilere karşı hava aracının stabilitesini sağlamaya yardımcı olmakta, bu sayede yolcuların ve mürettebatın daha konforlu ve güvenli bir uçuş deneyimi yaşamasını mümkün kılmaktadır. Kuyruk bölgesinde kullanılan hafif alaşımlar, uçağın arka kısmındaki ağırlık dengesini optimize ederek yakıt verimliliğine katkıda bulunur. Kuyruk bölgesindeki bileşenlerin optimize edilmiş yapısı, özellikle rüzgar ve türbülans gibi dış etkenler altında uçuş eminiyetini sağlamaktadır [30].

Havacılık sektöründe uçak yapısının hafifletilmesi, yakıt verimliliğini artırmanın temel yollarından biridir. A321 gibi modern uçak modellerinde kullanılan malzemeler, uçak gövdesinin ve kanatların dayanıklılığını artırırken ağırlığı azaltarak yakıt tüketimini en aza indirmeye yardımcı olmaktadır [31]. Malzeme iyileştirmeleri, karbon fiber kompozitler, alüminyum-lityum alaşımlar ve diğer yüksek mukavemetli, hafif malzemeler sayesinde A321 modelini ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir uçak haline getirmiştir [31]. Bu iyileştirmeler sayesinde A321’in uzun mesafeli uçuşlarda dahi yüksek performans sağlaması mümkün hale gelmektedir [31].



Şekil 2.6. A321 kuyruk bölümü

3. AIRBUS UÇAKLARINDA YAPISAL İYİLEŞTİRMELER

Havacılık endüstrisi, teknolojik gelişmelerin hızlı bir şekilde ilerlediği ve yenilikçi çözümlerin sürekli olarak uygulandığı bir alan olarak, uçak performansını artırma, güvenlik standartlarını yükseltme ve işletme maliyetlerini düşürme hedefleri doğrultusunda önemli adımlar atmaya devam etmektedir. Bu gelişmelerin temelinde, uçak yapılarında kullanılan malzemelerin hem dayanıklılık hem de hafiflik açısından optimize edilmesi, ayrıca çevresel etkilerin en aza indirgenmesi yatmaktadır. Havayolu taşımacılığı sektörünün artan yolcu talepleri ve çevresel düzenlemeler karşısında daha verimli ve sürdürülebilir çözümler arayışı, uçak tasarımında kullanılan malzemelerin niteliğini ve teknolojik yeniliklerini birinci öncelik haline getirmiştir. Airbus, bu bağlamda, modern havacılık teknolojisinin öncülerinden biri olarak öne çıkmakta ve yenilikçi tasarım yaklaşımlarını ileri mühendislik çözümleriyle birleştirerek havacılık endüstrisinin gelişimine yön vermektedir.

Airbus'ın geliştirdiği uçak modellerinde, aerodinamik verimliliğin artırılması, yakıt tüketiminin azaltılması ve karbon emisyonlarının en aza indirilmesi gibi hedefler doğrultusunda tasarımlar yapılmaktadır. Bu hedeflere ulaşmak için Airbus, yapısal tasarımlarında geleneksel malzemelerin yanı sıra modern mühendislik çözümleri ile elde edilen yenilikçi malzemelere öncelik vermektedir.

Airbus'ın bu yaklaşımı, hem havayolu şirketleri için ekonomik operasyonel maliyetler sunmakta hem de çevresel farkındalık oluşturmak adına önemli bir rol üstlenmektedir. Havacılık endüstrisinin gelecekteki teknolojik yönelimleri de bu yaklaşımlar üzerine inşa edilmektedir.

Geleneksel alüminyum alaşımlar, uzun yıllardır havacılık endüstrisinin yapı taşı olarak kabul edilmiştir ve bu malzemelerin kullanımı uçakların dayanıklılığı ve yapısal bütünlüğü açısından vazgeçilmez bir unsur olmuştur. Bununla birlikte, günümüzün hızla değişen teknolojik gereksinimleri, geleneksel alüminyum alaşımların ötesine geçilmesini zorunlu kılmaktadır. Daha hafif, daha güçlü ve daha dayanıklı malzemelere olan ihtiyaç, uçak tasarımında yenilikçi malzeme kullanımlarını ön plana çıkarmaktadır. Airbus, bu bağlamda, geleneksel yaklaşımların sınırlarını aşarak modern malzeme teknolojilerinin sunduğu olanaklardan faydalanmaktadır. Özellikle alüminyum-lityum (Al-Li) alaşımları ve gelişmiş kompozit malzemeler, Airbus uçaklarında hem yapısal verimliliği artırmak hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak adına tercih edilen en önemli malzemelerden biri haline gelmiştir. Al-Li alaşımları, geleneksel alüminyum alaşımlarına göre daha hafif olmaları ve aynı zamanda daha yüksek mukavemet sunmaları nedeniyle Airbus filosunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımlar, uçağın toplam ağırlığını azaltarak yakıt tüketimini düşürmekte ve böylece hem işletme maliyetlerini azaltmakta hem de karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Aynı zamanda, bu malzemelerin dayanıklılığı, uçakların uzun ömürlü bir şekilde kullanılmasına olanak tanımakta ve bakım gereksinimlerini

azaltarak operasyonel süreçlerin daha verimli hale gelmesini sağlamaktadır. Airbus, Alüminyum-Lityum alaşımlarını kanatlar, gövde panelleri ve diğer yapısal bileşenler gibi kritik bölgelerde kullanarak, uçak tasarımlarında hem performans hem de sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar elde etmektedir.

Gelişmiş kompozit malzemeler de Airbus filosunun tasarım süreçlerinde büyük bir öneme sahiptir. Bu malzemeler, karbon fiber ve polimer matris gibi hafif ve dayanıklı bileşenlerden oluşmakta olup, uçak yapılarının ağırlığını azaltırken dayanıklılığını artırmaktadır. Airbus, bu malzemeleri özellikle kanatlar, gövde ve kuyruk gibi aerodinamik açıdan kritik bölgelerde kullanarak uçakların performansını optimize etmektedir. Gelişmiş kompozit malzemelerin bir diğer avantajı ise korozyona karşı dayanıklılık sunmasıdır. Bu özellik, uçakların bakım sıklığını azaltarak havayolu şirketleri için maliyet avantajı sağlamaktadır. Ayrıca, kompozit malzemelerin üretim süreçleri, daha az enerji gerektirerek çevresel etkilerin azaltılmasına da katkıda bulunmaktadır. Airbus, bu malzemelerin kullanımını artırarak hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik önemli adımlar atmaktadır.

Sonuç olarak, Airbus, uçak yapılarında kullanılan malzemelerin sürekli gelişimi ve bu malzemelerin sunduğu yenilikçi çözümler sayesinde, havacılık endüstrisinde önemli bir liderlik rolü üstlenmektedir. Gelişmiş malzeme teknolojilerinin uçak tasarımına entegrasyonu, sadece operasyonel verimliliği artırmakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasını da sağlamaktadır. Airbus'ın bu yaklaşımı, modern havacılık teknolojisinin evriminde önemli bir dönüm noktası olarak değerlendirilebilir ve gelecekteki yenilikçi çözümlere ilham vermeye devam edecektir.

3.1. Alüminyum-Lityum Alaşımlar ve Gelişmiş Kompozit Malzemeler

Alüminyum-Lityum (Al-Li) alaşımları, havacılık endüstrisinde düşük yoğunluk, yüksek elastisite modülü ve mükemmel korozyon direnci gibi üstün mekanik ve kimyasal özellikleri nedeniyle önemli bir yer tutmaktadır [32]. Airbus A380'in gövde yapısında, kanatlarda ve zemin kirişlerinde bu alaşımların kullanımı, yakıt tüketimini düşürerek operasyonel verimliliği artırmış ve daha uzun menziller için avantaj sağlamıştır. Örneğin, Al2099 ve Al2196 alaşımları zemin kirişleri ve gövde takviye elemanlarında, Al2050 ise kanat kirişleri ve diğer yapısal bileşenlerde kullanılmaktadır [32]. Bu alaşımlar, geleneksel Alüminyum alaşımlarına kıyasla %15-20 arasında ağırlık azaltımı sağlamış ve daha yüksek korozyon direnci sunarak bakım maliyetlerini azaltmıştır [32]. Ayrıca, üçüncü nesil Al-Li alaşımları, gelişmiş kırılma tokluğu ve anizotropik mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ile daha güvenli ve uzun ömürlü bir kullanım sağlamaktadır.

Sonuç olarak, Airbus A380 gibi uçaklarda Al-Li alaşımlarının kullanımı, yapısal bütünlük ve hafiflik arasında optimal bir denge sunarak havacılık endüstrisinde yakıt tasarrufu, maliyet düşürme ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

Gelişmiş kompozit malzemeler, modern havacılık endüstrisinde, özellikle büyük uçakların kanat, gövde, stabilizatörler, motor fan bıçakları ve iniş takımı kapakları gibi kritik bileşenlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [33]. Düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve korozyon direnci gibi özellikleri sayesinde bu malzemeler, uçuş performansını artırırken ağırlık ve operasyonel maliyetleri azaltmaktadır. Karbon fiber takviyeli polimerler yük taşıma kapasitesi ve sertlik sağlarken, Kevlar gibi aramid fiberler darbe direnci gerektiren alanlarda tercih edilmektedir [33]. Dinamik yüklemelere maruz kalan bileşenlerde kullanılan epoksi reçineler ise kimyasal dayanıklılığı artırarak uzun ömürlü ve güvenilir yapılar sunmaktadır.

3.2. Yapısal Tasarım ve Mühendislik İyileştirmelerinin Çevresel ve Ekonomik Etkileri

Tarihsel olarak, 1960'larda jet motoru teknolojilerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş, ancak sonraki yıllarda yeniliklerin hızında belirgin bir yavaşlama görülmüştür [34]. Bu durum, teknolojik sınırların zorlanması, yüksek geliştirme maliyetleri ve yolcu talebinin fiyat esnekliğinin düşük olması gibi faktörlerle ilişkilendirilmiştir [34]. Ayrıca, petrol krizleri ve yükselen yakıt fiyatları gibi ekonomik baskıların yenilik hızını artırmadığı, bunun yerine havayollarının yüksek maliyetleri yolculara yansıtarak gelirlerini koruduğu belirtilmiştir [35].

Genellikle geniş gövdeli uçaklarda kullanılmak istenen hafif malzemeler ve yapısal iyileştirmeler, yakıt tüketimini azaltmanın yanı sıra çevresel sürdürülebilirliğe de katkıda bulunmaktadır [36]. Havacılık sektöründe karbon emisyonlarını azaltmak, küresel ısınma ve çevresel kirlenme ile mücadelede önemli bir hedeftir. Örneğin, Airbus A319 üzerine yapılan analizde, bu uçağın teknik ve operasyonel performansı, dar gövdeli Boeing B737-700 ile karşılaştırılmış ve genel olarak daha verimli olduğu belirlenmiştir [37]. Özellikle, A319'un yük faktörü (%82) ve ortalama uçuş bacağı uzunluğu (1234 mil), B737-700'e göre daha yüksek değerlere sahip olup, kısa ve orta menzilli uçuşlar için daha verimli bir profil sunduğu tespit edilmiştir [37]. Yakıt tüketimi açısından, blok saat başına 703 galon ile B737-700'den (694 galon) biraz daha fazla yakıt tüketmesine rağmen, yüksek yük faktörü ve uçuş saati verimliliği (%87), bu maliyeti dengelemiş ve operasyonel etkinliği artırmıştır [37].

Yakıt verimliliği, operasyonel maliyetleri azaltmanın yanı sıra karbon emisyonlarını düşürerek çevresel sürdürülebilirliğe de katkıda bulunur. Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA), 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonu hedefi koyarak, havacılık endüstrisinde yakıt verimliliğini artıracak çözümlerin önemini vurgulamaktadır [38].

Yapılan çalışmalar, A321'de kullanılan "sharklet" kanat uçlarının yakıt tüketimini %4'e kadar düşürdüğünü ve bu tasarımın, özellikle uzun mesafeli uçuşlarda önemli bir tasarruf sağladığını göstermektedir [39]. Yakıt verimliliğinin artırılması için A321'de kullanılan "sharklet" kanat uçları, aerodinamik sürüklenmeyi azaltarak uçağın uçuş sırasında daha az enerji harcamasını

sağlar. A321'in ayrıca Pratt & Whitney PW1100G veya CFM LEAP-1A motorlarıyla donatılması, ileri düzey bir yanma teknolojisi sunarak yakıt verimliliğini artırır. Bu motorlar, daha düşük yakıt tüketiminin yanı sıra gürültü azaltımı sağlayan özelliklere de sahiptir [40].

A321'in yakıt verimliliğini etkileyen bir diğer faktör, yapısında kullanılan hafif kompozit malzemelerdir. Gövde, kanatlar ve iniş takımları gibi kritik bileşenlerde kullanılan kompozitler, uçağın toplam ağırlığını düşürerek yakıt tasarrufuna katkıda bulunmaktadır. Ağırlığın azaltılması, özellikle uzun mesafe uçuşlarında yakıt tüketiminin minimize edilmesini sağlarken, bu teknolojiler sayesinde bakım maliyetleri de azaltılmaktadır [41]. Bu yenilikçi yapısal çözümler ve yakıt verimliliğini artıran tasarım özellikleri sayesinde, A321 gibi dar gövdeli uçak modelleri hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir bir seçenek haline gelmektedir.

3.3. Yakıt Verimliliği

Havacılık sektöründe yakıt verimliliği, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak, çevresel etkileri en aza indirmek ve artan rekabet ortamında operasyonel maliyetleri düşürerek havayolu şirketlerinin karlılığını artırmak açısından küresel ölçekte kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, literatürde yakıt tüketimini optimize etmeye yönelik araştırmalar, hem yeni nesil motor ve malzeme teknolojilerinin geliştirilmesi gibi mühendislik odaklı yeniliklere hem de uçuş rotalarının optimize edilmesi, kalkış ve iniş prosedürlerinin iyileştirilmesi gibi operasyonel süreçlerin verimliliğini artırmayı hedefleyen yöntemlere odaklanmıştır. Bu çalışmalar, sektördeki sürdürülebilir büyüme ve çevre dostu uçuş operasyonlarının hayata geçirilmesi için vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. Kraev ve diğerlerinin [42] yapmış olduğu çalışmada alternatif havacılık yakıtları başlığı, metanol, hidrojen ve elektrik gibi farklı enerji kaynakları üzerinden analitik bir yaklaşımla ele almaktadır. Hidrojenin sıfıra yakın emisyon potansiyeline sahip olmasına rağmen, düşük yoğunluğu nedeniyle geniş yakıt depolarına ihtiyaç duyduğu ve bu durumun aerodinamik direnci artırarak genel verimliliği olumsuz etkilendiği gözlemlenmiştir [42]. Elektrik enerjisi, yüksek verimlilik (%95'e kadar) ve düşük bakım maliyetleri gibi avantajlara sahip olmakla birlikte, enerji depolama sistemlerinin (örneğin bataryalar) yüksek ağırlığı ve sınırlı enerji yoğunluğu nedeniyle ticari havacılıkta kullanımının sınırlı olduğu vurgulanmıştır. Metanol ise düşük üretim maliyeti, kolay depolanabilirlik, taşınabilirlik ve metanol yakıt hücrelerinin yüksek verimliliği ile öne çıkmakta hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından umut verici bir alternatif yakıt olarak değerlendirilmektedir [43].

Bu anlatılanlara ek olarak Yang ve arkadaşları [43] yakıt verimliliğini artırmaya yönelik çeşitli teknolojik yenilikleri ele almaktadır. Gelişmiş türbin soğutma sistemleri, daha yüksek türbin giriş sıcaklıklarına olanak tanıyarak termal verimliliği optimize ederken, yüksek bypass oranlarına sahip hafif fan tasarımları itme verimliliğini artırarak yakıt tüketimini azaltmaktadır [43]. Plazma destekli yakıt enjeksiyon sistemleri, yanma sürecini daha kararlı hale getirip emisyonları düşürerek

enerji kullanımını iyileştirmekte, çok aşamalı kompresörler ve su enjeksiyon soğutma gibi yenilikler ise enerji tüketimini minimize etmektedir. Ayrıca, sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF) biyoyakıtlar ve elektro yakıtlar aracılığıyla karbon salınımını %80'e kadar azaltırken mevcut altyapıyla uyumluluğu sayesinde uygulama kolaylığı sağlamaktadır [43]. Bu teknolojiler, yakıt tüketimini azaltmaya ve çevresel sürdürülebilirliği artırmaya yönelik kritik çözümler sunmaktadır. Diaconu ve diğerlerinin [44] yapmış olduğu başka bir çalışmada ise kriyojenik hidrojen yakıt sistemlerinin yakıt verimliliğine katkılarını enerji yoğunluğu, tank tasarımı ve ısı yönetimi perspektifinden ele almaktadır. Hidrojenin, geleneksel jet yakıtlarına kıyasla yaklaşık üç kat daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, daha az yakıtla daha uzun mesafelere uçmayı mümkün kılarken, düşük yoğunluğu sayesinde uçakların kalkış ağırlığını azaltarak dolaylı olarak yakıt tüketimini optimize etmektedir [44]. Ancak düşük yoğunluk, daha büyük depolama tankları gerektirdiğinden, sferik ve silindirik gibi gelişmiş tank tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır; sferik tanklar, düşük yüzey alanı-hacim oranıyla ısı transferini en aza indirirken, silindirik tanklar mevcut uçak yapılarına entegrasyonu kolaylaştırarak verimliliği artırmaktadır [44]. Tüm bu faktörler bir araya geldiğinde, kriyojenik hidrojenin havacılık sektöründe yakıt verimliliğini artırma potansiyeli net bir şekilde ortaya konulmakta ve bu alternatif yakıt türünün, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabileceği belirtilmektedir [45]. Ancak bu tür yenilikçi sistemlerin pratikte uygulanabilir hale gelebilmesi için, düşük sıcaklıklarda hidrojenin güvenli depolanması ve taşınması gibi teknik sorunların yanı sıra, mevcut havaalanı altyapısının bu yeni teknolojiye uyum sağlayacak şekilde dönüştürülmesi gibi ciddi lojistik ve ekonomik zorlukların da ele alınması gerekliliği özellikle vurgulanmaktadır [45]. Dolayısıyla, kriyojenik hidrojenin başarılı bir şekilde entegre edilmesi, yalnızca teknik bir dönüşüm değil, aynı zamanda küresel düzeyde iş birliği ve kapsamlı bir stratejik planlama sürecini gerektirmektedir. Şekil 3.1'de gösterilen yapı, kriyojenik sıvıların güvenli bir şekilde taşınması ve depolanması için tasarlanmış bir kriyojenik yakıt tankeridir. Bu tanker, genellikle sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), sıvı oksijen (LOX) veya sıvı azot (LIN) gibi düşük sıcaklıkta depolanan gazların taşınması amacıyla vakum yalıtımlı çift cidarlı bir yapıya sahiptir [45]. Yüksek ısı yalıtımı sağlayarak kayıpları en aza indirirken, endüstriyel ve havacılık uygulamalarında kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 3.1. Kriyojenik yakıt deposu [46].

3.4. Alternatif Yakıtlar ve Biyoyakıt Kullanımı

Havacılık endüstrisi, küresel karbon emisyonlarının salınımında önemli bir kaynak oluşturması nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda büyük bir dönüşüm baskısı altındadır. Fosil yakıtların sınırlı rezervlere sahip olması, fiyat dalgalanmalarına yol açan ekonomik belirsizlikler ve sera gazı emisyonları, geleneksel jet yakıtlarına bir ikame arayışını zorunlu kılmaktadır [46]. Bunun yanı sıra, uluslararası düzenlemeler ve karbon ayak izini azaltma hedefleri, düşük karbonlu veya karbon nötr yakıtların geliştirilmesini teşvik etmektedir. Bu bağlamda, sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF), hidrojen ve elektrik gibi alternatif enerji kaynakları, havacılık sektörünün çevresel etkilerini azaltmak ve enerji güvenliğini artırmak için kritik öneme sahiptir. Havacılıkta alternatif yakıtların incelenmesi üzerine yapılan çalışmalarda, biyoyakıtlar, Fischer-Tropsch sentetik parafinik kerosen (FT-SPK) ve alkoller gibi alternatif yakıtların sürdürülebilirlik, çevresel etkiler ve ekonomik uygulanabilirlik açısından potansiyel taşıdığı belirlenmiştir [47]. Bu yakıtların operasyonel alanlarda kullanımı, sera gazı emisyonlarının azalması, hava sahası kalitesinin iyileştirilmesi ve enerji kaynaklarında çeşitlilik sağlanması gibi faydalar barındırmaktadır [47]. Ancak, üretim maliyetlerinin yüksekliği, teknik uygunluk ve yakıt standartlarının karşılanması gibi zorluklar devam etmektedir. Çeşitli havayolu şirketleri biyoyakıtların ticari uçuşlarda kullanımını test etmiş, uluslararası düzenlemeler bu yakıtların kullanımını teşvik etmiş ve gelecekteki havacılık tasarımlarının alternatif yakıtların kullanımını destekleyecek şekilde geliştirilmesi öngörülmüştür. Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) ve Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA), havacılığın karbon ayak izini azaltmak için uzun vadeli hedefler ortaya koymuştur. Örneğin, ICAO 2005 yılı seviyelerine kıyasla 2050 yılına kadar karbon dioksit (CO₂) emisyonlarını %50 oranında azaltmayı hedeflemiştir [48]. Bu çerçevede,

Avrupa Yenilenebilir Enerji Direktifi (EU-RED), Amerika Yenilenebilir Yakıt Standartları (US-RFS2) ve Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı Standartları (RSB) gibi düzenlemeler, biyoyakıtların havacılık sektöründe kullanımı için sürdürülebilirlik standartlarını ortaya koymaktadır [40]. Ayrıca, 2011 yılından bu yana American Society for Testing and Materials (ASTM) standartları, ticari uçuşlarda belirli oranlarda biyoyakıt kullanımını onaylamış, biyoyakıtların jet yakıtları ile karışım halinde kullanımına yönelik düzenlemeler yapılmıştır [48]. Bu teşviklerin amacı, çevresel koruma hedeflerine ulaşmak, fosil yakıt tüketimini azaltarak enerji kaynaklarının çeşitliliğini artırmak ve ekonomik sürdürülebilirliği teşvik etmek adına havacılık sektöründe alternatif yakıtların kullanımını yaygınlaştırmaktır. Aynı zamanda, bu teşvikler sayesinde karbon emisyonlarını azaltarak iklim değişikliği ile mücadeleye katkı sağlanması, yenilenebilir enerji kaynaklarının sektördeki rolünün güçlendirilmesi ve uzun vadede havayolu taşımacılığının hem çevresel hem de ekonomik açıdan daha verimli bir hale getirilmesi hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, sektörde yenilikçi teknolojilerin benimsenmesi, altyapı dönüşümünün hızlandırılması ve bu süreçte karşılaşılabilecek mali engellerin hafifletilmesi de bu teşviklerin önemli bir parçasını oluşturmaktadır.

Biyoyakıtlar, bitkisel yağlar, atık yağlar, tarımsal atıklar ve hatta yosun gibi çeşitli biyokütle kaynaklarından elde edilen, fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarıdır [49]. Bu tür yakıtlar, doğal süreçlerle yenilenebilen organik malzemelerden üretildiği için karbon emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip olup, sürdürülebilir enerji çözümleri arasında önemli bir yere sahiptir. Özellikle havacılık sektörü gibi yüksek enerji tüketimine sahip alanlarda, biyoyakıtların kullanımı hem çevresel etkilerin azaltılmasında hem de fosil yakıtlara olan bağımlılığın minimize edilmesinde kilit bir rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, biyoyakıtların üretiminde yerel tarım ve sanayi sektörlerinin katkıda bulunabilmesi, ekonomik kalkınmaya destek sağlama açısından da bu enerji türünü cazip hale getirmektedir. [49]. Bu kaynaklardan elde edilen biyoyakıtlar, jet yakıtına benzer özelliklere sahip olup, geleneksel uçak motorlarıyla uyumlu bir şekilde çalışabilmektedir. Örneğin, İspanya’da yapılan bir çalışmada [50], biyoyakıtların geleneksel jet yakıtlarıyla benzer fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olması nedeniyle mevcut uçak motorları ve altyapılarında herhangi bir modifikasyon gerektirmeden kullanılabilir. ASTM D7566 standardı, SAF’ların teknik güvenlik ve performans gerekliliklerini karşıladığını ve jet motorlarında güvenle kullanılabileceğini doğrulamıştır [50]. SAF’ların yüksek enerji yoğunluğu, düşük donma noktası ve düşük emisyon profili gibi özellikleri, çevresel ve performans açısından havacılık sektörüne uygunluğunu desteklemektedir. Ayrıca, havayolu şirketleri, havacılık sektörünün çevresel etkilerini azaltmak amacıyla biyoyakıt kullanımını giderek daha fazla benimsemektedir. European Biofuel FlightPath Initiative gibi uluslararası girişimler, biyoyakıtların havacılık sektöründeki potansiyelini ortaya koymak için kritik rol oynamaktadır. Bu girişim kapsamında Air France-KLM, British Airways ve Lufthansa gibi önde gelen havayolu şirketleri,

biyoyakıtların ticari uçuşlarda kullanımını test etmiş ve uygulanabilirliğini göstermiştir [51]. Örneğin, bu şirketler, biyoyakıtların geleneksel jet yakıtlarıyla belirli oranlarda karıştırılarak güvenli bir şekilde kullanılabildiğini ve bu şekilde havacılık sektörünün gereksinimlerini karşılayan performans özelliklerini korurken, aynı zamanda sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koyan başarılı test uçuşları gerçekleştirmiştir [51]. Bu uçuşlar, yalnızca biyoyakıtların teknik uygunluğunu değil, aynı zamanda operasyonel verimliliğini de kanıtlamış olup, sürdürülebilir havacılık yakıtlarının ticari kullanımına geçiş için kritik bir dönüm noktası olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, bu testler sırasında elde edilen veriler, biyoyakıtların farklı iklim ve uçuş koşullarında sağladığı performansın detaylı analiz edilmesine olanak tanımış ve yenilikçi yakıt formülasyonlarının geliştirilmesine zemin hazırlamıştır [51].

Biyoyakıtların havayolu şirketleri tarafından kullanımı, fosil yakıtlara kıyasla düşük karbon emisyonları ve çevresel sürdürülebilirlik avantajları sunmaktadır. Bununla birlikte, biyoyakıtların üretim maliyetlerinin yüksek olması ve sınırlı üretim kapasitesi, geniş ölçekli kullanımını sınırlayan önemli engeller arasında yer almaktadır. Yine de 2014 yılı itibarıyla dünya genelinde 200'den fazla uçuş, biyoyakıtlar kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu durum, biyoyakıtların havacılık sektörü için uygun bir alternatif yakıt olduğunu kanıtlamıştır [51]. Bu gelişmeler, havayolu şirketlerinin emisyon azaltma hedeflerine ulaşma konusundaki kararlılığını yansıtmaktadır. Ancak, biyoyakıtların daha yaygın kullanımı için üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve tedarik zincirlerinin güçlendirilmesi gerekmektedir.

Massachusetts Institute of Technology' de yapılan bir çalışmada [52] biyoyakıtların üretim maliyetleri ve yatırım gereksinimleri sayısal verilerle detaylandırılmıştır. Biyoyakıtların üretim maliyetleri, kullanılan hammadde ve üretim süreçlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin, düşük maliyetli biyoyakıtlar için üretim maliyetleri varil başına 150-230 ABD Doları arasında değişirken, daha ileri teknoloji gerektiren yüksek maliyetli biyoyakıtlar için bu değer 180-290 ABD Doları arasında olduğu belirtilmiştir [53]. Biyoyakıt üretim tesisleri için gerekli yatırımlar, 2020-2050 yılları arasında global ölçekte 0.54 trilyon ile 2.12 trilyon ABD Doları arasında bir sermaye harcaması gerektirmektedir [53]. Bu yatırım, biyoyakıtların havacılık sektöründe yaygınlaştırılması için kritik öneme sahiptir. Biyoyakıtların kullanımı, havayolu bilet fiyatlarını 2019 seviyelerine kıyasla %10-15 oranında artırabilir ve bu durum talep artış hızını yıllık yaklaşık %0.3-0.4 oranında yavaşlatabilir durumdadır [54]. Ancak, bu etkilerin talep üzerinde sınırlı bir azalmaya neden olacağı ve havacılık sektörünün genel büyümesini engellemeyeceği tahmin edilmektedir. Bu sayısal analizler, biyoyakıtların ekonomik uygulanabilirliğini ortaya koyarken, yatırımların ölçeklendirilmesi ve üretim maliyetlerinin optimize edilmesinin sektördeki geçiş sürecini hızlandıracağına işaret etmektedir.

Biyoyakıtların yanı sıra, hidrojen gibi yenilikçi yakıt türleri de gelecekte havacılıkta kullanılabilecek potansiyele sahiptir. Hidrojen yakıtları, yakıldıklarında yalnızca su buharı açığa

çıkararak çevreye zararlı emisyonları sıfıra indirme kapasitesine sahiptir [54]. Airbus, hidrojenle çalışan uçak tasarımlarını geliştirmek için büyük yatırımlar yapmaktadır ve “ZEROe” adı verilen hidrojen yakıtlı uçak prototiplerini 2035 yılına kadar ticari uçuşlarda kullanmayı hedeflemektedir [55]. Airbus’ın ZEROe projesi, 2035 yılına kadar dünyanın ilk hidrojenle çalışan ticari uçağını geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu kapsamda, hidrojenin havacılık sektöründe etkin bir şekilde kullanılabilmesi için hibrit-hidrojen turbofan ve turboprop motorları ile yakıt hücrelerini içeren yenilikçi tahrik sistemleri üzerinde çalışılmaktadır [55].

Proje kapsamında üç farklı uçak konsepti tasarlanmıştır [55]:

- Turbofan motorlarıyla çalışan ve 200 yolcu kapasiteli uzun menzilli bir model.
- Turboprop motorlarına sahip 100 yolcu kapasiteli kısa menzilli bir model.
- Yenilikçi gövde yapısıyla dikkat çeken blended-wing body konsepti.

Airbus, bu ileri teknolojileri test etmek ve geliştirmek amacıyla A380 MSN1 test uçağını kullanarak 2025 yılında uçuş denemelerine başlamayı planlamaktadır. Bu kapsamda, yalnızca hidrojenle çalışan motor sistemlerinin performansını değerlendirmekle kalmayıp, aynı zamanda bu tür yenilikçi teknolojilerin ticari havacılıkta uygulanabilirliğini test etmeyi hedeflemektedir [56]. Bunun yanı sıra, hidrojenin sürdürülebilir bir yakıt alternatifi olarak kullanılabilmesi için üretim, depolama ve dağıtım süreçlerini kapsayan kapsamlı altyapı çalışmaları yürütülmekte olup, bu çalışmaların amacı küresel ölçekte bir hidrojen ekosistemi inşa etmektir. Airbus, bu girişimle hem çevresel sürdürülebilirliği artırmayı hem de havacılık sektörünün sıfır emisyon hedeflerine ulaşmasını sağlamayı hedeflerken, hidrojen teknolojilerinin uluslararası ölçekte benimsenmesine katkıda bulunmayı da amaçlamaktadır. Bu adım, gelecekte karbon nötrlük hedeflerine ulaşmak için atılmış stratejik bir dönüm noktası olarak görülmekte ve aynı zamanda havacılıkta daha yeşil ve daha çevreci bir geleceğin kapılarını aralamaktadır.

Biyoyakıtların bir diğer avantajı, fosil yakıtlarla uyumlu bir şekilde kullanılabilmesidir. Bu durum, biyoyakıtların havacılıkta yaygın olarak kullanılmasını kolaylaştırmaktadır çünkü mevcut uçak motorları ve altyapısı, biyoyakıtlar ile modifikasyona gerek kalmadan çalışabilmektedir. Örneğin, SAF mevcut fosil yakıt altyapısıyla tamamen uyumlu olan "drop-in" yakıtlar olarak tasarlanmıştır ve mevcut uçak motorlarında herhangi bir teknik modifikasyon gerektirmeden kullanılabilir [56]. ASTM D7566 standardına göre[bu standardı da SAF’lar fosil jet yakıtlarıyla %50’ye kadar karıştırılabilmekte ve bu durum, yakıtların yanma özelliklerinde herhangi bir performans kaybına yol açmadan güvenli bir şekilde kullanımını sağlamaktadır [56]. Yapılan laboratuvar ve saha testlerinde, SAF’ların tutuşma gecikme süresi, laminar alev hızı ve alev kararlılığı gibi yanma parametrelerinde fosil yakıtlarla benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Bu bulgular, biyojet yakıtlarının fosil yakıtlarla uyumlu olduğunu ve çevresel sürdürülebilirlik sağlarken operasyonel olarak da etkin bir çözüm sunduğunu göstermektedir [57]. Sonuç olarak,

biyoyakıtlar ve alternatif yakıtlar, havacılık sektöründe çevresel sürdürülebilirliği destekleyen ve yakıt verimliliğini artıran etkili çözümler olarak öne çıkmaktadır.

3.5. Operasyonel Stratejiler ve Yakıt Verimliliği

Yakıt verimliliğini artırmak için uçak tasarımı, motor teknolojileri ve alternatif yakıtların kullanımı kadar, operasyonel stratejilerin de büyük bir öneme sahip olduğu bilinmektedir. Havayolu şirketleri, yakıt tüketimini optimize etmek, operasyonel maliyetleri azaltmak ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için kapsamlı stratejiler geliştirmektedir. Bu kapsamda, uçuş planlamasının detaylandırılması, rotaların meteorolojik koşullar ve hava trafiği yoğunluğuna göre optimize edilmesi, uçuş seviyelerinin performansa dayalı olarak doğru şekilde belirlenmesi ve iniş-kalkış prosedürlerinin yakıt tasarrufunu öncelikleyen yöntemlerle yeniden düzenlenmesi gibi operasyonel yaklaşımlar, yakıt verimliliğine doğrudan katkı sağlayan temel unsurlar arasında yer almaktadır. Türkiye’de ve dünya genelinde yapılan akademik ve endüstriyel araştırmalar, bu stratejilerin yalnızca bireysel havayolu şirketleri düzeyinde değil, aynı zamanda ulusal ve uluslararası havacılık politikalarının geliştirilmesinde de etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle hava sahası yönetim sistemlerinin modernize edilmesi, uçakların yerde geçirdiği sürelerin azaltılması ve karbon emisyonu odaklı performans ölçütlerinin teşvik edilmesi gibi geniş çaplı girişimler, sürdürülebilir havacılık uygulamaları için önemli bir yol haritası sunmaktadır.

3.5.1. Uçuş Rotalarının ve Planlamasının Optimizasyonu

Uçuş rotalarının optimize edilmesi, yakıt tüketimini azaltmanın en etkili yollarından biridir. Rota optimizasyonu, uçakların en kısa ve en emniyetli yolu izleyerek uçuşlarını gerçekleştirmesini sağlayarak, uçuş mesafesini ve süresini kısaltmaktadır [58]. İstanbul Teknik Üniversitesi’nde yapılan bir çalışmada [59], uçak rota planlamasında yüksek çözünürlüklü rüzgar ve hava durumu verilerinin kullanımını inceleyerek yakıt verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Rüzgar verilerinin detaylı analizi ve bu verilerin uçuş hız ve irtifa planlamalarına entegrasyonu, uçakların daha verimli rotalar izlemesini sağlamaktadır. Özellikle, rüzgar belirsizliğinin uçuş planlarına etkileri değerlendirilmiş ve bu belirsizliği minimize etmek için dinamik maliyet endeksi (Dynamic Cost Index - DCI) yaklaşımı geliştirilmiştir. DCI yaklaşımı havayolu operasyonlarında yakıt tüketimi ve zaman yönetimi arasındaki ilişkiyi optimize etmek için kullanılan yöntemlerden biridir [59]. DCI, uçuş sırasında rüzgar ve diğer değişken koşullar göz önüne alınarak, hız ve irtifa gibi uçuş parametrelerini dinamik bir şekilde ayarlamak için tasarlanmıştır [59]. Bu yöntem, özellikle uçuş sırasında karşılaşılan rüzgar belirsizlikleri, hava sıcaklığı değişimleri ve atmosferik basınç dalgalanmaları gibi dinamik faktörlere hızlı bir şekilde uyum sağlayarak, uçakların yalnızca yakıt tüketimini en aza indirmekle kalmayıp aynı zamanda operasyonel verimliliği artırmasını da

mümkün kılmaktadır. Bunun sonucunda, uçaklar en uygun maliyet-performans dengesi ile uçarabilirken, uçuş süreleri ve rotaları da optimize edilerek yolculara daha konforlu ve güvenli bir seyahat deneyimi sunulmaktadır. Bu tür uyarlanabilir stratejiler, modern havacılık teknolojilerinin sunduğu veri analitiği ve gerçek zamanlı karar destek sistemlerinin etkin kullanımı sayesinde daha etkili hale gelmekte ve havayolu şirketlerinin küresel rekabet gücünü artırma açısından da stratejik bir avantaj sağlamaktadır.

Çalışmada, rüzgar-optimal uçuş profilleri belirlemek için Maksimum Menzil Seyri (Maximum Range Cruise - MRC), Uzun Menzil Seyri (Long Range Cruise - LRC) ve Ekonomi/Maliyet Endeksi (Cost Index - CI) yöntemleri detaylı olarak incelenmiştir. Gerçek uçuş verileriyle yapılan karşılaştırmalı analizler, optimize edilmiş planların önemli yakıt tasarrufu sağlama potansiyeline işaret etmektedir. Ayrıca, yüksek çözünürlüklü hava verilerinin doğru kullanımı ile uçuş süresi ve yakıt tüketimi arasındaki ilişki daha hassas bir şekilde modellenmiştir [59], [60].

Sonuçlar, stratejik uçuş planlamasında rüzgar verilerinin doğru ve etkin bir şekilde değerlendirilmesinin havayolu operasyonlarının verimliliğini artırmada ve operasyonel maliyetleri düşürmede büyük bir avantaj sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. Çalışmada kullanılan yöntemler, özellikle uzun mesafeli uçuşlarda yakıt tüketiminde %6'ya kadar tasarruf elde edilebileceğini göstermiş olup, bu tasarruf yalnızca maliyetlerin düşürülmesiyle sınırlı kalmamış, aynı zamanda karbon emisyonlarının azaltılmasına da katkıda bulunmuştur. Elde edilen bulgular, uçuş performansını iyileştirme hedefi doğrultusunda hem havayolu şirketleri için önemli bir yol haritası sunmuş hem de sürdürülebilir havacılık stratejileri geliştirilmesi adına gelecekte yapılacak çalışmalar için değerli bir referans oluşturmuştur. Bu kapsamda, rüzgar verilerinin daha geniş ölçekli hava trafiği yönetim sistemlerine entegrasyonu ve gerçek zamanlı optimizasyon tekniklerinin kullanımı gibi ileri teknolojilere dayalı çözümler, sektörün karşı karşıya olduğu çevresel ve ekonomik zorlukların üstesinden gelmek için önemli bir potansiyel taşımaktadır [60].

3.5.2. Uçuş Seviyelerinin Belirlenmesi ve Yük Yönetimi

Yakıt verimliliğini artırmada uçuş seviyesinin doğru ve hassas bir şekilde belirlenmesi, havacılık operasyonlarının hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirliği açısından kritik bir faktör olarak ön plana çıkmaktadır. Uçuş seviyelerinin yakıt verimliliği üzerindeki etkileri, literatürde farklı meteorolojik koşullar, uçak tipleri ve uçuş rotaları bağlamında detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu konuda geniş bir bilgi birikimi oluşturulmuştur. Bu çalışmalar, uçuş seviyelerinin dikkatlice seçilmesinin, yalnızca yakıt tasarrufu sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda karbon emisyonlarının ve diğer zararlı gazların salınımını azaltarak çevresel etkilere olumlu katkıda bulunduğunu ortaya koymuştur. Özellikle uzun mesafeli uçuşlarda, rüzgar hızları, hava sıcaklığı ve atmosferik basınç gibi parametrelerin dikkate alınarak uçuş seviyesinin optimize edilmesi, yakıt

tüketimini minimuma indirirken, uçuş performansını da en üst düzeye çıkarmaktadır. Böylece, doğru uçuş seviyesi belirleme stratejileri, havayolu şirketlerinin operasyonel maliyetlerini düşürmesine, çevresel sorumluluklarını yerine getirmesine ve sürdürülebilir havacılık hedeflerine daha hızlı ulaşmasına olanak tanımaktadır. [61]. Düşük irtifalarda, iniş-kalkış (LTO) döngüsü boyunca üretilen emisyonlar daha yoğun olurken, yüksek irtifalarda seyir esnasında yakıt yanma verimliliği artmakta ve emisyon miktarları azalmaktadır [61]. Yüksek irtifalarda, optimum hava-yakıt oranının sağlanması ile yakıt verimliliğinin maksimize edilebileceği ve bu sayede CO₂ ve NO_x emisyonlarının azaltılabileceği gösterilmiştir. Bununla birlikte, kalkış ve iniş gibi yüksek enerji ihtiyacı gerektiren fazlarda uçuş seviyelerinin optimize edilmesi, motor performansının çevresel etkilerini minimuma indirmektedir [62]. Yük yönetimi, uçak motorlarının yakıt verimliliği üzerindeki etkilerinden bir diğeridir. Motorların yük altındaki performansı, yakıt tüketimini önemli ölçüde etkilemektedir. Uçağın kalkış ağırlığı (MTOW) ve taşıdığı yük, motorun çıkış gücü üzerinde doğrudan etkili olup daha fazla yakıt harcamasına neden olmaktadır [62]. Özellikle kalkış fazında optimize edilmiş yük dağılımı ve uygun yük kapasitesi, toplam yakıt tüketimini azaltarak çevresel etkileri minimize edebilir [62].

3.5.3. Uçak İçi Ağırlık Azaltma Stratejileri

Uçak içi ağırlık azaltma stratejileri de yakıt verimliliği sağlamada önemli etmenlerden birisidir. Havayolu şirketleri, uçak içindeki gereksiz ağırlıkları azaltarak daha az yakıt harcamayı hedeflemektedir [63]. Bunun temel sebeplerinden birisi uçak ağırlığının azaltılması, yakıt tüketimini doğrudan etkilemesidir. Çünkü daha hafif uçaklar, kalkış, tırmanış ve seyir aşamalarında daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bu durum, motorların daha az çalışmasını sağlayarak yakıt tüketimini azaltıp maliyetleri düşürmektedir [63]. Yapılan araştırmalarda, uçak ağırlığında sağlanan her kilogramlık bir azalmanın, uçakların yılda yaklaşık 3000 litre yakıt tasarrufu sağladığını göstermektedir. Örneğin, Boeing 787 gibi kompozit malzemelerle üretilen uçaklar, geleneksel alüminyum tabanlı modellere göre %20 daha az yakıt tüketmekte, bu da uçuş başına tonlarca yakıt tasarrufu anlamına gelmektedir [64]. Uçuş ömrü boyunca bu tasarruf yüz binlerce litre yakıtı ulaşırken, karbon emisyonları açısından da önemli bir etki yaratılmaktadır. Boeing 787'nin kompozit yapısı sayesinde, uçak ömrü boyunca 500.000 tona varan CO₂ emisyonu azaltılabilmektedir [64]. Bu veriler, ağırlık azaltımının yalnızca yakıt tüketimi değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da büyük faydalar sağladığını göstermektedir.

Sonuç olarak, uçak ağırlığının azaltılması, yakıt verimliliğini artırarak hem ekonomik hem de çevresel faydalar sunar. Bu durum, havayolu şirketleri için maliyet avantajı yaratırken, sürdürülebilir havacılık hedeflerine ulaşmada da önemli bir adım olarak değerlendirilir.

3.5.4. Hız Yönetimi ve Uçuş Hızı Optimizasyonu

Uçuş hızının doğru bir şekilde ayarlanması, yakıt verimliliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Yüksek hızda uçuş, hava direncini artırarak daha fazla enerji harcamasına neden olurken, düşük hızda uçuş ise fazla zaman harcanarak verimsizlik yaratabilmektedir [65]. Uçuş yönetim sistemleri, uçuş sırasında hava koşullarını dikkate alarak hız optimizasyonu yaparak yakıt verimliliğini artırmaktadır. Illinois Üniversitesi'nde yapılan bir araştırmada [65] uçak hız optimizasyonunun yakıt tüketimi üzerindeki etkilerini incelenmiş ve Chicago O'Hare Uluslararası Havaalanı (ORD) ile San Francisco Uluslararası Havaalanı (SFO) arasındaki uçuşlar için Constrained Finite Time Optimal Control (CFTOC) yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde, rüzgar verilerinin uçuş planlamasına dahil edilmesiyle yakıt tüketiminde önemli bir azalma sağlanmıştır. Dinamik uçak modeli ve rüzgar modeli birleştirilerek optimum hız ve rota belirlenmiş, özellikle uçak hızının uygun seviyede tutulmasının toplam seyahat süresini ve yakıt maliyetlerini düşürdüğü gösterilmiştir [66]. Rüzgar verilerinin dahil edilmesi, optimize edilmiş rotaların gerçek uçuş rotalarına daha yakın olmasını sağlamış ve bu durum, hız yönetiminin yakıt tasarrufunda daha etkili olduğunu kanıtlamıştır. Çalışma, hız optimizasyonunun yalnızca yakıt verimliliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda çevresel etkileri azaltmak için de güçlü bir araç olduğunu vurgulamaktadır [66].

Sonuç olarak, operasyonel stratejiler, havayolu şirketlerinin yakıt verimliliğini artırarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmalarını havacılık otoriteleri tarafından çeşitli teşviklerle sağlanmak istenmektedir. Uçuş planlaması, yük yönetimi, iniş-kalkış prosedürleri, taksi süreçleri ve hız optimizasyonu gibi çeşitli operasyonel yaklaşımlar, yalnızca yakıt tüketimini değil aynı zamanda karbon emisyonlarını da azaltarak daha çevre dostu uçuşlara olanak tanır. Türkiye ve diğer ülkelerde yapılan araştırmalar [67], [68] bu stratejilerin yakıt tasarrufu sağlama potansiyelini kanıtlamakta ve havayolu şirketlerine uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada rehberlik etmektedir.

4. YENİ NESİL UÇAK MOTORLARININ KULLANIMI VE ÇEVRE DOSTU ÖZELLİKLERİ

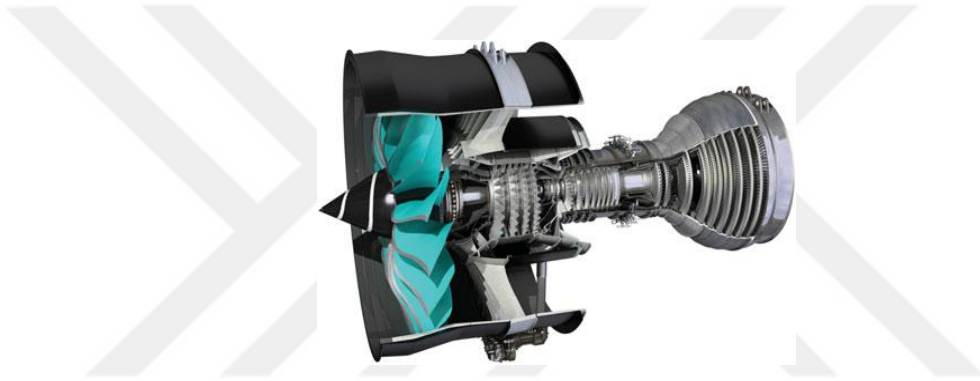
Havacılık endüstrisi, çevresel etkilerini azaltmak amacıyla her geçen gün daha sürdürülebilir uçuş teknolojilerine yönelmektedir. Ticari uçuşlarda kullanılan uçak motorlarının karbon emisyonları, yakıt tüketimi ve gürültü kirliliği gibi çevresel etkilerinin azaltılması, bu sektörde sürdürülebilir bir geleceğin önünü açan kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Gelişmiş materyaller, daha yüksek bypass oranları ve inovatif yanma teknolojileri ile donatılan yeni nesil uçak motorları, bu hedeflere ulaşmada önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Giderek daha fazla sayıda havayolu şirketi tarafından tercih edilen bu motorlar, çevresel etkileri minimize etmek ve yakıt verimliliğini artırmak amacıyla tasarlanmış olup, sadece ekonomik değil aynı zamanda çevresel açıdan da önemli avantajlar sunmaktadır.

Yeni nesil uçak motorları arasında, modern havacılığın sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına katkıda bulunmak için geliştirilmiş “geared turbofan” teknolojisi, “ultra-high bypass” motorları, hibrit elektrikli sistemler ve biyoyakıtlarla uyumlu motorlar gibi yenilikçi çözümler yer almaktadır [69]. Bu motorlar, yalnızca daha yüksek yakıt verimliliği sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltarak çevresel etkilerin minimize edilmesine de yardımcı olmaktadır. Havacılık endüstrisinin uzun vadeli hedefleri doğrultusunda, bu teknolojiler hem gürültü seviyelerini düşürmek hem de fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu bağlamda, söz konusu motorlar, çevreye duyarlılık açısından endüstrinin karbon nötrlük hedefine ulaşma çabalarının temelini oluşturan kritik bir rol oynamaktadır. Bu bölümde, her bir motor tipinin sahip olduğu yenilikçi özellikler, sağladığı çevre dostu faydalar ve özellikle A321 gibi dar gövdeli ticari uçak modellerinde sunduğu performans avantajları detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Ayrıca, bu motorların ticari havacılığa adaptasyon süreci, altyapı gereksinimleri ve gelecekteki uygulama potansiyelleri de kapsamlı bir şekilde incelenerek, sektördeki sürdürülebilirlik dönüşümüne nasıl katkı sağladıkları analiz edilmektedir.

4.1. Geared Turbofan (GTF) Motorları: PW1100G

Geared Turbofan (GTF) teknolojisi, modern havacılık endüstrisinde kullanılan en dikkat çekici yeniliklerden biri olarak öne çıkmaktadır ve bu teknolojinin getirdiği avantajlar, sektörde sürdürülebilirlik ve verimlilik hedefleri doğrultusunda kritik bir rol oynamaktadır. Şekil 4.1’de gösterilen Geared Turbofan, Pratt & Whitney tarafından geliştirilen ve bu alanda çığır açıcı bir motor modeli olarak kabul edilen PW1100G, GTF teknolojisinin en önemli uygulamalarından birini temsil etmektedir. Bu motor, gelişmiş bir redüksiyon dişli sistemi ile donatılmış olup, fan ve

türbin hızlarını bağımsız olarak optimize ederek hem performansı artırmakta hem de yakıt tüketiminde %15'e varan tasarruf sağlamaktadır. Yakıt verimliliği açısından sağladığı bu üstünlük, havayolu şirketlerinin operasyonel maliyetlerini düşürmesine yardımcı olmakta ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltmaktadır. Bununla birlikte, PW1100G motorunun NOx emisyonlarını geleneksel motorlara kıyasla %50 oranında azaltması, çevre dostu bir teknoloji olarak önemini daha da artırmaktadır. Ayrıca, bu motorun daha düşük gürültü seviyeleri üretmesi hem yolcular hem de havaalanı çevresindeki topluluklar için daha konforlu ve sürdürülebilir bir uçuş deneyimi sunmaktadır. Bu teknoloji, dar gövdeli uçaklar başta olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir ve havacılık endüstrisinin daha temiz ve verimli bir geleceğe doğru ilerlemesine önemli bir katkı sağlamaktadır [70]. Ayrıca, PW1100G motorları, gürültü seviyelerini önemli ölçüde düşürerek, havacılık standartlarına uygun olarak daha sessiz bir uçuş deneyimi sunmaktadır.



Şekil 4.1. Geared Turbofan [70].

Motorun tasarımında kullanılan yüksek bypass oranı, enerji verimliliğini artırırken, bakım maliyetlerini azaltan yenilikçi mühendislik çözümleri ile operasyonel maliyet avantajı sağlamaktadır [71]. Clean Sky 2 gibi uluslararası araştırma projeleri kapsamında geliştirilen bu teknoloji, çevresel etkileri en aza indirerek havacılık sektörünün sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu projeler, yalnızca yeni nesil motor teknolojilerinin geliştirilmesini değil, aynı zamanda karbon emisyonlarını azaltan, yakıt tüketimini optimize eden ve gürültü seviyelerini düşüren yenilikçi çözümlerin havacılık sektöründe uygulanabilir hale getirilmesini de hedeflemektedir. Bu kapsamda, Pratt & Whitney tarafından geliştirilen PW1100G motoru, sahip olduğu yüksek performans özellikleri, önemli düzeyde yakıt tasarrufu sağlayan tasarımı ve çevre dostu teknolojileriyle modern havacılık mühendisliğinin en başarılı örneklerinden biri olarak dikkat çekmektedir. Özellikle NOx emisyonlarını %50 oranında azaltması ve %15'e varan yakıt verimliliği sunması, PW1100G'yi sadece havayolu şirketleri için ekonomik bir seçenek haline getirmekle kalmamış, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik çabalarına önemli katkılar

sağlayan bir teknoloji olarak ön plana çıkarmıştır [71]. Bunun yanı sıra, bu motorun daha düşük gürültü seviyeleri üreterek havaalanı çevresindeki topluluklar üzerinde olumlu etkiler yaratması ve daha konforlu bir uçuş deneyimi sunması, havacılık endüstrisinin gelecekteki ihtiyaçlarına yanıt veren bir çözüm olduğunu kanıtlamaktadır [71]. PW1100G hem ticari havacılık hem de sürdürülebilir mühendislik uygulamaları için önemli bir dönüm noktası olarak değerlendirilmektedir.

PW1100G motorları, A320neo ailesinde ve özellikle A321neo modelinde yaygın olarak kullanılmaktadır [71]. Geleneksel turbofan motorlara göre %16 oranında daha düşük yakıt tüketen bu motor, aynı zamanda karbon emisyonlarını %50'ye kadar azaltabilmektedir [72]. Ayrıca PW1100G, fan hızı ve türbin hızı arasındaki bağımsız ilişki sayesinde motorun daha düşük sıcaklıkta çalışmasını sağlayarak, bakım maliyetlerini düşürmekte ve motorun ömrünü uzatmaktadır [73]. Bu durum hem çevresel sürdürülebilirliği desteklemekte hem de havayolu şirketlerine uzun vadeli ekonomik avantajlar sunmaktadır.

PW1100G motorları, karbon emisyonlarını azaltmanın yanı sıra gürültü seviyelerinde de önemli bir düşüş sağlamaktadır. Düşük fan hızında çalışma prensibi, motorun kalkış ve iniş sırasında ürettiği gürültüyü önemli ölçüde azaltarak havaalanı çevresindeki yerleşim bölgelerinde yaşayan insanların yaşam kalitesini artırır. NASA tarafından yapılan bir çalışmada [74], PW1100G motorları ile donatılmış uçakların gürültü seviyelerinin %75 oranında azaltıldığı ve bu sayede çevresel etkilerin minimize edildiği belirtilmiştir. Özellikle ileri süpürmeli fanlar ve sessiz statorlar gibi gelişmiş tasarımlar, fanın neden olduğu akustik etkileri önemli ölçüde azaltmaktadır [74]. Jet gürültüsünü minimize etmek için ise egzoz hızının düşürüldüğü ve chevron nozullar gibi yenilikçi egzoz tasarımlarının kullanıldığı belirtilmiştir. Bu tasarımlar, jet akışını daha sessiz hale getirerek gürültü seviyelerini düşürmektedir [74]. Bu teknolojiler, GTF motorlarının havacılık standartlarına uyum sağlarken, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine de katkıda bulunmasını sağlamaktadır.

4.2. LEAP-1A Motorları

LEAP motor ailesi, modern havacılık teknolojileri arasında yakıt verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik konularında sağladığı yeniliklerle önemli bir ilerleme kaydetmiş ve bu alanlarda sektördeki standartları yeniden tanımlamıştır [75]. Bir önceki nesil motorlarla kıyaslandığında, yakıt tüketiminde ve karbon dioksit (CO₂) emisyonlarında %15'e varan azalma sağlaması, havayolu şirketleri için operasyonel maliyetlerin düşürülmesi ve çevresel etkilerin azaltılması açısından büyük bir avantaj sunmaktadır. Bunun yanı sıra, LEAP motorlarının azot oksit (NO_x) emisyonları, CAEP/6 standartlarına göre %50'ye kadar daha düşük seviyelerde olmasıyla dikkat çekmekte ve hava kirliliğini azaltmaya yönelik uluslararası hedeflere önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır [75]. Bu üstün özellikler, yalnızca çevresel faydalar sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda havacılık sektöründe sürdürülebilirlik ve performans dengesini optimize etmek için geliştirilen yenilikçi

teknolojilerin ne kadar ileri bir noktaya ulaştığını da göstermektedir. Ayrıca, LEAP motor ailesi, daha düşük gürültü seviyeleri ve geliştirilmiş dayanıklılığıyla, hem yolcuların daha konforlu bir seyahat deneyimi yaşamasını sağlamakta hem de uzun vadeli bakım maliyetlerini düşürerek işletme süreçlerini daha verimli hale getirmektedir. Bu motorlar, modern havacılığın geleceğe dönük sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşması için kritik bir rol üstlenmekte ve hem ticari havacılık hem de çevre dostu mühendislik uygulamalarında bir dönüm noktası olarak değerlendirilmektedir [76]. Motorlar, yüksek baypas oranı, 3D dokuma karbon fiber kompozit fan bıçakları, gelişmiş aerodinamik tasarım ve TAPS II yanma odası gibi yenilikçi teknolojilere sahiptir [76]. Bu özellikler hem yakıt tasarrufu hem de çevresel etkiyi azaltma açısından motorların performansını artırmaktadır. Ayrıca, düşük gürültü seviyeleri sayesinde havacılık standartlarına uygunluk sağlanarak, çevresel düzenlemelerle uyum kolaylaştırılmıştır [76]. Şekil 4.2’de gösterilmiş olan LEAP-1A motoru, Airbus A320neo, Boeing 737 MAX ve Comac C919 gibi uçak modellerine entegre edilerek, modern havacılıkta verimlilik ve performans için yeni bir standart oluşturmaktadır. Bu motorların geliştirilmesinde General Electric ve Safran Aircraft Engines arasındaki iş birliği, yenilikçi teknolojilerin başarıyla uygulanmasına olanak tanımıştır [76].



Şekil 4.2. LEAP-1A [77].

4.3. Ultra-High Bypass (UHB) Motorlar: Rolls-Royce UltraFan

Rolls-Royce tarafından geliştirilen UltraFan, havacılık sektöründe yakıt verimliliği ve sürdürülebilirlik hedeflerini destekleyen devrim niteliğinde bir motor teknolojisi olarak tasarlanmıştır. Önceki nesil Trent 700 motorlarına göre %25 daha yüksek yakıt verimliliği sağlayan bu motor, azot oksit (NOx) emisyonlarında %40, gürültü seviyelerinde ise %35 oranında azalma sunmaktadır [78]. Ayrıca, 100% sürdürülebilir havacılık yakıtlarıyla uyumlu olması, hibrit-elektrikli ve hidrojen yakıtlı sistemlerle entegre edilebilme potansiyeli, UltraFan’ı geleceğin havacılık teknolojisi için önemli bir adım haline getirmektedir. Yenilikçi bir motor mimarisine

sahip olan UltraFan, karbon/titanyum fan kanatları, kompozit malzemeler ve dünyanın en güçlü havacılık şanzımanını içermektedir [78]. Bu şanzıman, 50 MW'a kadar enerji üretmektedir. İleri üretim teknolojileri ve seramik matris kompozit (CMC) malzemeleri sayesinde daha yüksek sıcaklıklara dayanabilen motor, aynı zamanda daha az atıkla üretim imkânı sağlamaktadır [78]. UltraFan demonstratör motorunun ilk testlerinin, İngiltere'nin Derby kentindeki Testbed 80 adlı dünyanın en büyük ve en akıllı kapalı test tesisinde tamamen sürdürülebilir havacılık yakıtları kullanılarak yapılması ve ticari pazara sunulmasının 2030'lu yıllarda gerçekleşmesi planlanmaktadır [78]. Ayrıca, UltraFan ile geliştirilen teknolojilerin mevcut motorlara uygulanmasıyla yakıt tüketiminde daha fazla verimlilik ve emisyon azaltımı sağlanabileceği belirtilmektedir. UltraFan, havacılık endüstrisinde yalnızca yeni bir motor tasarımı sunmakla kalmayıp, aynı zamanda sektördeki sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılması için bir dönüm noktası niteliğinde yenilikçi bir teknoloji platformu olarak dikkat çekmektedir. Bu ileri teknoloji, yakıt verimliliğini artırmak, karbon emisyonlarını azaltmak ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirmek amacıyla tasarlanmış, modern mühendislik çözümlerini bünyesinde barındırmaktadır. UltraFan, daha geniş çaplı fan tasarımı, gelişmiş malzemelerden üretilen hafif bileşenler ve yüksek verimli termodinamik süreçleriyle yalnızca performansı optimize etmekle kalmayıp, işletme maliyetlerini düşürerek havayolu şirketleri için ekonomik bir avantaj sunmaktadır. Bununla birlikte, bu motor, sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF) ve hibrit elektrikli sistemlerle uyumlu yapısıyla, geleceğin düşük emisyonlu uçak motorlarının temelini oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. UltraFan, yalnızca teknik bir yenilik olarak değil, aynı zamanda havacılık endüstrisinin daha temiz, daha sessiz ve çevreye duyarlı bir geleceğe yönelme çabalarının somut bir göstergesi olarak dikkat çekmektedir. Bu ileri teknoloji, mühendislik inovasyonunun sınırlarının ne kadar ileri taşınabileceğini göstermesi bakımından, modern havacılıkta bir dönüm noktası niteliğindedir. UltraFan motorlarının geliştirilmesi, daha düşük yakıt tüketimi ve karbon emisyonları sağlamanın yanı sıra, operasyonel verimliliği artırarak havayolu şirketlerinin maliyetlerini düşürmelerine ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarına olanak tanımaktadır. Aynı zamanda, bu motorların daha düşük gürültü seviyeleri üretmesi hem yolcular hem de havaalanı çevresindeki topluluklar için daha konforlu bir deneyim sunarak havacılığın sosyal ve çevresel etkilerini iyileştirme açısından da önemli bir katkı sağlamaktadır. UltraFan, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla uyumlu yapısıyla gelecekte hibrit ve tamamen elektrikli uçak motorları gibi teknolojilere de kapı aralamakta, bu sayede havacılık endüstrisinin küresel sürdürülebilirlik ve karbon nötrlük hedeflerini destekleyen stratejik bir platform olarak sektöre öncülük etmektedir [79].

5. YENİ NESİL MOTOR TEKNOLOJİLERİNİN MALİYET VE EKONOMİK ETKİLERİ

Havacılık sektöründe çevresel sürdürülebilirliği artırmak amacıyla geliştirilen yeni nesil motor teknolojileri hem yakıt verimliliğini optimize etmekte hem de karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Özellikle yüksek bypass oranı ve yenilikçi materyal kullanımı ile öne çıkan bu motorlar, başlangıçta yüksek yatırım maliyetleri gerektirse de uzun vadede ciddi ekonomik tasarruflar sağlama potansiyeline sahiptir. Rolls-Royce'un geliştirdiği UltraFan motoru, bu teknolojilerin en ileri örneklerinden biridir. UltraFan motorları, karbon fiber ve seramik matrisli kompozitler gibi hafif ancak dayanıklı malzemeler kullanılarak üretilmiştir. Bu ileri materyaller, motorun dayanıklılığını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda daha düşük ağırlık ve daha yüksek performans sağlayarak yakıt tüketimini azaltmaktadır. Bu tür kompozit malzemelerin kullanılması, motorun daha uzun ömürlü olmasını ve yakıt verimliliğinin artırılmasını sağlar [79]. Şirket, Sivil Havacılık biriminde yaklaşık 1.3 milyar pound tasarruf sağlamayı hedefleyen bir program başlatarak personel azaltımı, satın alma maliyetlerinin düşürülmesi ve sermaye yatırım harcamalarının optimize edilmesi gibi önlemler almıştır. Örneğin, Trent 1000 motorunun hizmet maliyetleri 2.1-2.2 milyar pound olarak öngörülmekte olup, 2020 yılı boyunca bu motor için yapılan harcamalar 524 milyon pound seviyesinde gerçekleşmiştir [79]. Ayrıca, 2020 yılında Sivil Havacılık alanındaki sermaye harcamaları yaklaşık 579 milyon pound olarak kaydedilmiş ve bu harcamaların önümüzdeki yıllarda daha da azaltılması hedeflenmiştir [79]. Bununla birlikte, Rolls-Royce'un düşük karbonlu ve sürdürülebilir havacılık teknolojilerine yönelik yatırımları, şirketin Ar-Ge harcamalarının önemli bir bölümünü oluşturarak, hem mevcut endüstriyel gereksinimlere yanıt vermekte hem de geleceğin havacılık ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanan uzun vadeli stratejik hedeflerini desteklemektedir. Rolls-Royce şirketinin bu alandaki yoğun yatırımları, yalnızca yakıt verimliliğini artıran ve karbon emisyonlarını azaltan yenilikçi motor tasarımlarını geliştirmeyi değil, aynı zamanda sürdürülebilir havacılık yakıtları, hibrit elektrikli motor sistemleri ve hidrojenle çalışan motorlar gibi ileri teknolojilerin endüstri genelinde benimsenmesine öncülük etmeyi de amaçlamaktadır. Rolls-Royce, bu stratejik yaklaşımla, hem havayolu şirketlerinin ekonomik beklentilerini karşılayan hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine uyum sağlayan çözümler sunarak, modern havacılığın daha yeşil ve daha çevreci bir geleceğe ulaşmasında lider bir rol üstlenmektedir. Bu yatırımlar, aynı zamanda, küresel havacılık endüstrisinin karşı karşıya olduğu çevresel ve ekonomik zorluklara yenilikçi ve kapsamlı çözümler üretmek için yapılan iş birliklerini ve teknoloji transferlerini de içermektedir.

Büyük filolara sahip olan havayolu şirketleri için, bu tür yakıt tasarrufları yalnızca çevresel faydalar sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda operasyonel maliyetlerde milyonlarca dolarlık ciddi düşüşler anlamına gelmektedir. Özellikle yoğun uçuş operasyonları yürüten havayolu şirketleri,

yakıt verimliliğini artıran yenilikçi motor teknolojileri sayesinde maliyetlerini daha sürdürülebilir bir düzeye çekeabilmekte ve bu durum rekabet avantajı elde etmelerinde önemli bir rol oynamaktadır. İngiltere'nin önde gelen havayolu şirketlerinden biri olan British Airways, bu bağlamda UltraFan motorlarıyla donatılmış uçakları filosuna eklemiş ve bu ileri teknolojiyi kullanarak yıllık yakıt maliyetlerini yaklaşık 1,2 milyon dolar oranında azaltmayı başardığını açıklamıştır. Bu gibi gelişmeler, yalnızca şirketin ekonomik performansını iyileştirmekle kalmamış, aynı zamanda karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltarak çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunmuştur. British Airways'in bu adımı, diğer havayolu şirketlerine de örnek teşkil etmiş ve sektörde yakıt verimliliğine yönelik teknolojik yeniliklerin benimsenmesinin gerekliliğini bir kez daha ortaya koymuştur. Ayrıca, bu tasarruflar, uzun vadede sektördeki ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik anlayışını güçlendirerek, modern havacılığın gelecekteki operasyonel standartlarını şekillendiren önemli bir kilometre taşı olarak değerlendirilmektedir [80].

5.1. Biyoyakıt Kullanımının Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

Biyoyakıtlar, havacılıkta karbon emisyonlarını azaltmak için kullanılan en önemli yeniliklerden biri olarak dikkat çekmektedir. Bitkisel yağlar, atık yağlar, biyokütle gibi organik kaynaklardan üretilen biyoyakıtlar, yenilenebilir özellikleriyle fosil yakıtlara sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır [81]. Biyoyakıtların üretim maliyeti, fosil yakıtlara kıyasla önemli ölçüde yüksektir ve bu durum havacılık sektöründe geniş ölçekli kullanımını sınırlayan temel engellerden biridir. Örneğin, 2016 yılında Jet A1 fosil yakıtının litre başına maliyeti 0.36 USD olarak kaydedilmişken, biyoyakıtların maliyeti genellikle fosil yakıtların 2 ila 7 katı arasında değişmektedir [81]. Avrupa Birliği'nde yapılan bir analiz, biyoyakıtların ekonomik açıdan rekabet edebilir hale gelebilmesi için jet yakıtına kıyasla ton başına 1500 EUR'luk bir fiyat farkının aşılması gerektiğini ortaya koymaktadır [81]. Bu yüksek maliyetlerin temel nedeni, biyoyakıt üretiminde kullanılan bitkisel yağlar ve hayvansal yağlar gibi hammaddelerin, fosil jet yakıtlarından daha pahalı olması ve toplam üretim maliyetinin yaklaşık %80'ini oluşturmasıdır [82]. Ayrıca, lignoselülozik biyokütle gibi ileri biyoyakıt teknolojilerine dayalı üretim süreçlerinin maliyetleri henüz tam olarak belirlenmemiş olsa da bu süreçlerin ticari seviyede de fosil yakıtlardan daha maliyetli olması öngörülmektedir [82]. Bu durum, biyoyakıtların yaygın kullanımını zorlaştıran en büyük etkenlerden biridir. ABD merkezli büyük havayolu şirketlerinden United Airlines, biyoyakıt kullanımını artırmak amacıyla 200 milyon dolarlık yatırım yaparak biyoyakıt üretim tesislerine destek sağlamaktadır [83]. United Airlines, bu tesislerden elde edilen biyoyakıtları filolarında kullanarak yıllık karbon emisyonlarını %10 oranında azaltmayı hedeflemektedir [83]. Avrupa Birliği de biyoyakıtların havacılık sektöründe kullanımını teşvik etmek için çeşitli finansal destekler ve vergi indirimleri sunmaktadır. Almanya merkezli Lufthansa,

biyoyakıt üretiminde kullanılan hammaddelere uygulanan vergi indirimlerinden faydalanarak biyoyakıt maliyetlerini dengelemekte ve yıllık yaklaşık 10 milyon dolar tasarruf sağlamaktadır [84]. Bu teşvikler, biyoyakıtların yaygınlaşmasını sağlamak ve havacılık sektöründe fosil yakıt bağımlılığını azaltmak amacıyla kritik bir rol oynamaktadır.

5.2. Elektrikli ve Hibrit Motorların Ekonomik Analizi

Elektrikli ve hibrit motor teknolojileri, havacılık sektöründe uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada umut vadeden çözümlerden biridir. Elektrikli motorlar, kısa mesafeli uçuşlarda fosil yakıt tüketimini tamamen ortadan kaldırarak karbon emisyonlarını sıfıra yakın bir seviyeye indirmektedir. Ancak, bu tür motorların geliştirilmesi için yüksek Ar-Ge maliyetleri gerekmektedir ve batarya teknolojilerinin yetersizliği, bu teknolojinin ticari havacılıkta geniş çapta kullanılmasını şu an için sınırlamaktadır. MagniX gibi şirketler, tamamen elektrikli uçak motorları üzerinde çalışmakta olup, bu motorların maliyetinin yaklaşık 10 milyon doları bulduğu bildirilmektedir [85]. Bu maliyet, henüz ticari uçuşlar için uygun hale gelmemiştir. Ayrıca, İsveç merkezli SAS Havayolları, hibrit-elektrikli motorlarla kısa mesafeli uçuşlarda %50 daha az fosil yakıt kullanarak karbon emisyonlarını önemli ölçüde düşürmeyi planlamaktadır [86]. İsveç hükümeti tarafından sağlanan teşviklerle desteklenen bu projeler, elektrikli ve hibrit motor teknolojilerinin havacılıkta çevresel sürdürülebilirlik için umut vadeden bir çözüm olarak görülmesini sağlamaktadır.

Türkiye’de İstanbul Teknik Üniversitesi’nde yapılan bir çalışmada [87], hibrit-elektrikli motor sistemleri üzerine çalışmalar yürütmektedir. Bu çalışmalar, yerel teknolojik altyapının güçlendirilmesi ve Türkiye’nin kısa mesafeli iç hat uçuşlarında hibrit-elektrikli uçakları kullanma potansiyelini artırma amacı taşımaktadır. Hibrit motor sistemlerinin Türkiye’de uygulanabilirliği üzerine yapılan analizler, bu teknolojinin ülke ekonomisine sağlayacağı katkılar ve fosil yakıt tüketimini azaltma potansiyeli gibi unsurları kapsamaktadır. Ancak, elektrikli uçakların uzun mesafeli uçuşlar için geliştirilmesi hala ekonomik ve teknolojik engellerle karşı karşıyadır. Bu nedenle, kısa mesafeli uçuşlarda hibrit-elektrikli motorların benimsenmesi, Türkiye’nin havacılık sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma yolunda atacağı ilk adımlardan biri olabilir.

5.3. Karbon Dengeleme Projeleri ve Ekonomik Faydaları

Karbon dengeleme projeleri, havacılık sektöründe karbon ayak izini azaltma amacıyla uygulanan stratejik bir yaklaşımdır [88]. Havayolu şirketleri, uçuş sırasında üretilen karbon emisyonlarını telafi etmek amacıyla orman dikimi, yenilenebilir enerji projeleri veya enerji verimliliği çalışmaları gibi çeşitli projelere fon sağlamaktadır. Bu projeler, karbon kredisi adı verilen sertifikalarla desteklenir ve ton başına yaklaşık 15-30 dolar arasında maliyet oluşturur [89].

Singapur Havayolları, karbon dengeleme projelerine 50 milyon dolarlık bir bütçe ayırarak yıllık karbon emisyonlarını %20 oranında azaltmayı hedeflemektedir [90]. Bu kapsamda Singapur Havayolları, orman yenileme projeleri, rüzgar ve güneş enerjisi santralleri gibi çevresel projelere yatırım yapmaktadır [90]. British Airways'in 2020 yılı sürdürülebilirlik raporunda, karbon nötrlüğe ulaşmak amacıyla sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik kapsamlı stratejiler sunulmuştur. Şirket, uçak filosunu daha yakıt verimli modellerle yenileyerek ve eski uçakları emekliye ayırarak emisyonlarını düşürmeyi hedeflemektedir [88]. Ayrıca, ofisler, hangarlar ve veri merkezlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranını artırmış, bu oran 2020 yılında %83'e ulaşmıştır [91]. Karbon denkleştirme programları kapsamında hem zorunlu hem gönüllü mekanizmalarla emisyon dengelemesi yapılmaktadır. Şirket, operasyonlarının çevresel etkisini en aza indirmek için modern teknolojiye yatırım yaparak sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemektedir.

Türk Hava Yolları'nın karbon dengeleme stratejileri kapsamında, CORSIA (Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü'nün Karbon Dengeleme ve Azaltma Planı) programı çerçevesinde, ilgili uçuşlardan kaynaklanan karbon emisyonlarının düzenli olarak raporlanacağı ve bağımsız kuruluşlar tarafından denetleneceği belirtilmiştir [92]. Şirket, ilerleyen yıllarda temel yıl değerlerinin üzerinde gerçekleşen emisyonları nötrlemeyi taahhüt etmektedir. Ayrıca, sürdürülebilir havacılık yakıtı (SAF) kullanımını artırarak ve yeni nesil enerji verimli uçaklarla operasyonel iyileştirmeler yaparak karbon ayak izini azaltmayı hedeflemektedir [92]. Bu kapsamda, SAF kullanılan uçuşların farklı destinasyonlara genişletilmesi ve uçak filosunun %75'inin yeni nesil modellerden oluşması planlanmıştır.

Havacılık sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak, günümüzün en önemli stratejik öncelikleri arasında yer almaktadır. Bu hedeflere yönelik gerçekleştirilen yenilikler, başlangıçta yüksek maliyet gerektiren yatırımları kapsasa da uzun vadede önemli ekonomik ve çevresel faydalar sağlamaktadır. Özellikle teknolojik gelişmelerin hız kazandığı bir dönemde, yeni nesil motor teknolojileri, biyoyakıtların kullanımı, elektrikli ve hibrit motor sistemlerinin geliştirilmesi gibi girişimler, hem işletme maliyetlerini düşürmekte hem de çevresel etkileri önemli ölçüde azaltmaktadır. Karbon dengeleme projeleri de bu bağlamda sektörün daha sürdürülebilir bir yapıya kavuşmasında kritik bir rol oynamaktadır.

Yeni nesil motor teknolojilerinin sektöre katkıları incelendiğinde, yakıt verimliliği ve emisyon azaltımı açısından önemli sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bu motorlar, geleneksel motorlara kıyasla daha düşük yakıt tüketimi sağlamakta ve bu durum, hem çevresel hem de ekonomik fayda sunmaktadır. Elektrikli ve hibrit motor sistemleri, sektörün geleceğini şekillendiren yenilikçi teknolojiler arasında yer almaktadır. Bu sistemler, uçakların operasyonel esnekliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda enerji verimliliğini maksimum seviyeye çıkararak maliyetlerin azalmasını sağlamaktadır. Elektrikli uçak prototipleri üzerinde yapılan testler, kısa mesafeli uçuşlar için bu tür sistemlerin uygulanabilirliğini kanıtlamıştır. Ayrıca, hibrit motor

sistemleri, hem elektrikli hem de fosil yakıtlı güç kaynaklarını bir araya getirerek enerji dönüşümünde önemli bir köprü görevi görmektedir.

Sonuç olarak, havacılık sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma çabaları, sadece çevresel etkileri azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda uzun vadede daha ekonomik bir işletme yapısına zemin hazırlamaktadır. Başlangıçta yüksek yatırım maliyetleri gerektiren bu yenilikler, teknolojik gelişmelerle birlikte hem ekonomik hem de çevresel faydalar sunmaktadır.

Türkiye'nin ve dünyanın bu alandaki girişimleri, sektörü daha çevre dostu ve verimli bir geleceğe taşıma noktasında kritik bir önem arz etmektedir. Bu çabalar, havacılık sektörünün hem günümüz hem de gelecek nesiller için daha sürdürülebilir bir yapı oluşturma kararlılığını ortaya koymaktadır.



6. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK HAREKETLERİNİN HAVAYOLU ŞİRKETLERİNE ETKİLERİ

Küresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda artan çevresel duyarlılık, havacılık sektörünü operasyonel süreçlerinden teknolojik altyapısına kadar pek çok alanda dönüşüme zorlamaktadır. Uluslararası politikaların sıkılaşması, sürdürülebilir havacılık yakıtlarının geliştirilmesi ve yeşil enerji altyapısının yaygınlaşması gibi küresel çabalar, havayolu şirketlerinin uzun vadeli stratejik kararlarını doğrudan etkilemektedir.

Bununla birlikte, bu süreçler, teknolojik yenilikler ve finansal kaynakların etkin kullanımı gibi birçok boyutta karmaşık bir uyum sürecini de beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, sürdürülebilirlik hareketlerinin havayolu şirketlerine olan etkilerini anlamak, sektördeki mevcut dinamikleri ve gelecekteki dönüşüm senaryolarını değerlendirmek açısından önem taşımaktadır.

Havayolu şirketleri, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda birçok yenilikçi adım atarak sektörde çevresel etkileri azaltmayı ve karbon nötrlüğüne ulaşmayı amaçlayan projeler geliştirmiştir. Örneğin, sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) kullanımı, uçuşlarda enerji verimliliğini artıran yeni nesil motor teknolojilerinin benimsenmesi ve uçuş rotalarının optimize edilmesi gibi uygulamalar, bu çabaların somut örnekleri arasında yer almaktadır.

Ayrıca, bazı havayolu şirketleri karbon dengeleme programları başlatarak, yolcuların uçuş kaynaklı emisyonlarını telafi etmelerine olanak tanımaktadır. Teknolojik inovasyonların yanı sıra, operasyonel süreçlerde yapılan iyileştirmeler, örneğin kalkış ve iniş prosedürlerinin daha verimli hale getirilmesi ve filo modernizasyonu gibi girişimler, havayolu şirketlerinin çevresel ayak izini azaltma yönünde attıkları adımlar arasında öne çıkmaktadır.

Bu tür önlemler, sektörün daha sürdürülebilir bir yapıya geçişini hızlandırırken aynı zamanda toplumsal sorumlulukların yerine getirilmesine de katkı sağlamaktadır. British Airways karbon nötrlüğe ulaşmayı ve yeşil havacılık uygulamalarını geliştirmeyi hedefleyen bir dizi stratejik girişimde bulunmaktadır.

Şirket, düşük karbon salınlı teknolojilere yatırım yaparak operasyonel süreçlerini daha sürdürülebilir hale getirmeyi amaçlamakta ve sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) kullanımını artırmayı planlamaktadır [92].

Karbon dengeleme projeleri üzerine yapılan akademik çalışmalar, havayolu şirketlerinin karbon ayak izini azaltmada önemli bir araç olarak karbon dengeleme stratejilerini değerlendirmektedir. World Economic Forum'un (2021) yayınladığı bir raporda, karbon dengeleme, bir organizasyonun faaliyetleri sonucunda oluşan karbon emisyonlarının etkisini telafi etmek amacıyla, başka yerlerde emisyonların azaltılmasını veya atmosferdeki karbonun uzaklaştırılmasını sağlayan projelere finansal destek sağlanmasını ifade etmektedir [92]. Bu süreç, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji üretimi, yeniden ağaçlandırma gibi yöntemlerle karbon

emisyollarının azaltılmasının ardından, kalan emisyonların denkleştirilmesi için kullanılmaktadır. Karbon dengeleme stratejilerinin etkinliği, desteklenen projelerin ek, şeffaf, kalıcı ve sürdürülebilir olmasına bağlıdır. Ek kriteri, projenin yalnızca destek olmadan gerçekleşmeyeceği anlamına gelirken, kalıcılık, karbonun uzun süreli olarak atmosferden uzak tutulmasını gerektirmektedir [93]. Ayrıca, karbon giderim projelerine öncelik verilmesi, doğrudan atmosferden karbonu çıkarmayı hedeflediği için önemlidir. Bu çerçevede, karbon dengeleme, net sıfır karbon hedeflerine ulaşma yolunda tamamlayıcı bir strateji olarak kullanılmakta ve enerji sektörü ile diğeri ilgili endüstrilerde dönüşümü teşvik etmektedir.

ABD merkezli United Airlines, biyoyakıt kullanımını artırmak amacıyla büyük bir yatırım gerçekleştirmiş ve biyoyakıt üretim tesislerine 200 milyon dolar ayırmıştır. United Airlines, bu yatırımlarla yıllık karbon emisyonlarını %10 oranında azaltmayı hedeflemektedir [94]. Şirket, biyoyakıtların çevresel sürdürülebilirlik için önemini vurgularken, biyoyakıt kullanımı sayesinde enerji maliyetlerinin düşeceği öngörüsüyle uzun vadeli ekonomik bir avantaj sağlamayı amaçlamaktadır. Ancak, biyoyakıtların halen yüksek maliyetli olması, kısa vadede United Airlines'ın operasyonel maliyetlerinde artışa yol açmaktadır [94]. Biyoyakıtların havacılık sektöründeki potansiyel faydalarını inceleyen akademik çalışmalar, bu tür yakıtların karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. International Renewable Energy Agency [95], biyoyakıtların fosil yakıtlara kıyasla %80'e kadar daha düşük karbon emisyonu sağladığını belirtmektedir. Ancak, biyoyakıtların yüksek üretim maliyetleri, bu yakıtların geniş çapta ticari havacılıkta kullanımını zorlaştırmaktadır.

United Airlines örneği, Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (IRENA) analizleriyle uyumlu bir şekilde, biyoyakıtların çevresel avantajlarına rağmen ekonomik zorlukların bu yakıtların yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biri olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle biyoyakıtların üretim maliyetlerinin yüksek olması, havayolu şirketlerinin bu sürdürülebilir enerji kaynağını geniş ölçekte kullanmasını sınırlamakta ve sektörde daha büyük bir dönüşümün gerçekleşmesini yavaşlatmaktadır. Bu durum, yalnızca teknoloji geliştirme ve üretim süreçlerinin verimliliğini artırmaya yönelik çalışmaları değil, aynı zamanda bu alanda daha kapsamlı devlet teşviklerini ve finansal destek mekanizmalarını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca, biyoyakıtların maliyetlerinin düşürülmesi ve havayolu şirketleri için ekonomik açıdan daha cazip hale getirilmesi, bu sürdürülebilir enerji kaynağının yalnızca çevresel etkilerin azaltılmasına değil, aynı zamanda sektörde uzun vadeli maliyet tasarrufu sağlayan bir çözüm haline gelmesine de olanak tanıyacaktır. Bu bağlamda, biyoyakıtların ekonomik engellerinin aşılması, sürdürülebilir havacılık hedeflerine ulaşmak için hem kamu hem de özel sektör iş birliğinin önemini daha da belirgin hale getirmektedir.

Almanya merkezli Lufthansa, Avrupa Birliği tarafından sağlanan teşvikler doğrultusunda biyoyakıt kullanımını teşvik eden bir havayolu şirkettir. Biyoyakıt kullanımını artırmak amacıyla,

biyoyakıt üretiminde kullanılan hammaddelere yönelik vergi indirimlerinden faydalanarak yıllık yaklaşık 10 milyon dolar tasarruf etmektedir [96]. Biyoyakıtlar sayesinde karbon ayak izini azaltan Lufthansa, çevreye duyarlı bir marka imajı oluşturmuş ve müşteri memnuniyetini artırmıştır. Ancak, biyoyakıt maliyetlerinin yüksekliği hala şirketin kâr marjını zorlayan bir faktör olmaya devam etmektedir. Avrupa Komisyonu'nun biyoyakıt teşvikleri üzerine yaptığı araştırmalar, biyoyakıtların yüksek maliyetli olması nedeniyle devlet desteği ve sübvansiyonlarla desteklenmesi gerektiğini göstermektedir [96]. Biyoyakıtlar, özellikle çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunmasına rağmen, maliyet etkinlik açısından henüz fosil yakıtlarla rekabet edememektedir. Lufthansa'nın biyoyakıt maliyetlerini dengelemek için aldığı vergi indirimleri, bu akademik analizlerle paralellik göstermektedir. Ancak, akademik literatürde de vurgulandığı gibi, biyoyakıtların geniş çapta benimsenebilmesi için üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve daha fazla devlet desteği gerekmektedir [97].

Singapore Airlines'ın 2023/2024 Sürdürülebilirlik Raporu, şirketin çevresel dönüşüm ve sürdürülebilirlik hedeflerini gerçekleştirmek için benimsediği stratejileri detaylandırmaktadır. Şirket, 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonuna ulaşmayı taahhüt etmekte ve bu doğrultuda sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) kullanımını artırmayı, yakıt verimliliği yüksek yeni nesil uçaklarla filosunu yenilemeyi ve operasyonel süreçlerini optimize etmeyi hedeflemektedir [98]. SAF kullanımının sektördeki karbon emisyonlarını azaltmada kilit bir rol oynadığı belirtilerek, toplam yakıt tüketiminin %5'inin 2030 yılına kadar SAF ile karşılanması planlanmıştır [98]. Bunun yanı sıra, şirket enerji verimliliğini artırmak amacıyla binalarında güneş panelleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanarak karbon ayak izini azaltmaya yönelik somut adımlar atmıştır. Atık yönetimi ve geri dönüşüm uygulamaları da sürdürülebilirlik stratejilerinin temel unsurları arasında yer almakta; uçak içi atıkların azaltılması ve endüstri standartlarının geliştirilmesi için denetimler gerçekleştirilmektedir. Ek olarak, hava trafik rotalarının optimize edilmesi gibi dijital çözümler, operasyonel verimliliği artırırken emisyonların azaltılmasını desteklemektedir. Şirket, çevresel hedeflerini sosyal sorumluluk girişimleriyle birleştirerek, toplumsal faydayı ve sürdürülebilir kalkınmayı destekleyen kapsamlı bir strateji ortaya koymaktadır.

Qantas Airways, karbon nötr hedeflerine ulaşmak için elektrikli ve hibrit motor teknolojilerine yatırım yapmaktadır. Şirket, kısa mesafeli uçuşlarda bu teknolojileri kullanarak karbon emisyonlarını azaltmayı hedeflemekte ve çevreye duyarlı bir marka imajı oluşturmaktadır. Ancak, hibrit motorların batarya teknolojilerindeki sınırlılıklar ve yüksek maliyetler, Qantas için ekonomik açıdan bir engel oluşturmaktadır [99]. Elektrikli ve hibrit motorların havacılık sektöründeki etkilerini inceleyen araştırmalar, bu teknolojilerin çevresel sürdürülebilirlik sağlama potansiyeline sahip olduğunu ancak batarya teknolojilerinin henüz ticari havacılık için yeterli olmadığını göstermektedir. Bu durum, akademik literatürde sıkça vurgulanmaktadır ve elektrikli

uçak motorlarının daha geniş çapta uygulanabilmesi için teknolojik gelişmelere ve maliyetlerin düşürülmesine ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır [99].

Türk Hava Yolları, biyoyakıt kullanımını ve karbon dengeleme projelerini destekleyerek çevresel sürdürülebilirlik alanında önemli bir rol üstlenmektedir. Biyoyakıt kullanımı, THY'nin karbon emisyonlarını düşürmesine yardımcı olmaktadır. Ancak, biyoyakıtların yüksek maliyetleri, şirketin operasyonel maliyetlerini artırarak kârlılığı üzerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır. Biyoyakıtların ekonomik etkileri üzerine yapılan çalışmalar, yüksek maliyetlerinin havayolu şirketlerinin kârlılığı üzerinde baskı yarattığını göstermektedir [98]. THY'nin biyoyakıt kullanımı üzerindeki ekonomik zorlukları, biyoyakıt maliyetlerinin düşürülmesi ve devlet desteğinin artırılması gerektiğini vurgulayan akademik analizlerle paralellik göstermektedir.

Bu örneklerde, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için yapılan yatırımların, kısa vadede maliyet yükü yaratmasına karşın uzun vadede çevre dostu bir yapıya ulaşmada etkili olduğu görülmektedir.

Çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda havacılık sektöründe yapılan yenilikler ve bu yeniliklerin ekonomik etkileri üzerine yapılan analizler, çeşitli yöntemlerle derinlemesine incelenmektedir. Ancak, havayolu şirketlerinin çevresel sürdürülebilirlik uygulamaları ile finansal sonuçları arasında ilişki kurmak, çok sayıda değişkenin etkisi nedeniyle karmaşık bir süreçtir. Bu bağlamda, çoklu doğrusal regresyon analizi, farklı faktörlerin işletme maliyetleri, yakıt tasarrufu, karbon emisyonları ve müşteri memnuniyeti üzerindeki etkilerini analiz etmede etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Çoklu doğrusal regresyon analizi, birden fazla bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisini ölçmek için kullanılır ve böylece karmaşık ilişkilerin daha net bir şekilde anlaşılmasını sağlar [100].

Örneğin, havacılık sektöründe biyoyakıt kullanımının karbon emisyonları ve yakıt maliyetleri üzerindeki etkilerini değerlendiren bir analizde, biyoyakıt maliyetleri, biyoyakıt kullanım oranı, karbon emisyonları ve toplam yakıt tüketimi gibi birçok bağımsız değişken göz önüne alınmalıdır. Bu çoklu bağımsız değişkenlerin tek bir bağımlı değişken üzerindeki etkisini analiz etmek, çoklu doğrusal regresyon analizinin sunduğu avantajlardan biridir [100]. Böyle bir analiz, yalnızca biyoyakıt kullanımının etkisini değil, aynı zamanda elektrikli motor teknolojilerinin ve operasyonel stratejilerin maliyetler üzerindeki etkisini de kapsayan daha geniş bir bakış açısı sağlar.

Bu analizin havayolu şirketleri açısından değeri büyüktür; çünkü şirketler, farklı yenilikçi stratejilerin kârlılık ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini sayısal verilerle değerlendirme imkânına sahip olmaktadır. Örnek olarak, United Airlines ve Lufthansa gibi biyoyakıt kullanımı alanında yenilikler yapan havayolu şirketleri üzerinde yapılan bir çoklu doğrusal regresyon analizi, biyoyakıt maliyetlerinin operasyonel maliyetler üzerindeki etkisini ve biyoyakıt kullanımının müşteri memnuniyetine katkısını değerlendirebilir. Aynı şekilde Pegasus Airlines'ın "Yeşil Uçuş"

programının müşteri sadakati üzerindeki etkisi, çoklu doğrusal regresyon analizi ile değerlendirilebilir ve bu analiz sayesinde şirketin çevresel sürdürülebilirlik stratejilerinin finansal sonuçları hakkında daha kesin bilgiye ulaşılabilir [101].

Bu çerçevede, çoklu doğrusal regresyon analizi, çevresel sürdürülebilirlik yeniliklerinin yalnızca bireysel etkilerini değil, aynı zamanda bu faktörlerin şirketlerin genel performansına olan doğrudan ve dolaylı katkılarını anlamak için güçlü ve kapsamlı bir araç sağlamaktadır. Bu yöntem, özellikle sürdürülebilirlik uygulamalarının finansal getirileri, operasyonel verimlilik üzerindeki etkileri ve müşteri memnuniyeti gibi göstergelerle olan ilişkilerini analiz ederek, havacılık şirketlerinin uzun vadeli stratejilerini şekillendirmelerine olanak tanımaktadır. Havacılık sektöründe sürdürülebilirlik ile kârlılık arasında güçlü bir ilişki kurma çabası, veri tabanlı karar alma süreçlerini daha etkili hale getirmenin yanı sıra, şirketlerin çevresel ve ekonomik hedeflerini uyumlu bir şekilde dengelemesine yardımcı olur. Bu analizler, yalnızca mevcut sürdürülebilirlik stratejilerinin etkinliğini değerlendirmekle kalmayıp, aynı zamanda gelecekte benimsenmesi gereken yenilikçi uygulamaların belirlenmesine rehberlik ederek, sektörde daha geniş kapsamlı dönüşümlere kapı aralamaktadır. Bu bağlamda, çoklu doğrusal regresyon analizi gibi nicel yaklaşımlar, havacılık sektörünün yalnızca çevresel hedeflere ulaşmasını değil, aynı zamanda rekabet gücünü artırarak kârlı ve sürdürülebilir bir büyüme modeli oluşturmasını destekleyen önemli bir araçtır.

7. ÇOKLU DOĞRUSAL REGRESYON ANALİZİNİN TANIMI VE TEMEL KAVRAMLARI

Çoklu doğrusal regresyon analizi, bir bağımlı değişken ile birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi çözümlmek için kullanılan gelişmiş bir istatistiksel yöntemdir [102]. Bu analiz, bağımlı değişkendeki değişimlerin, birden fazla bağımsız değişkene bağlı olarak nasıl etkilendiğini incelemek amacıyla geliştirilmiştir. Bu analiz, özellikle birçok faktörün bir sonucu etkilediği karmaşık sistemlerin incelenmesi açısından oldukça kullanışlıdır [102].

Birçok gerçek saha uygulamasında çoklu doğrusal regresyon analizinin önemi gözler önüne serilmektedir. Örneğin, bir havayolu şirketinin yıllık gelirini etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Yakıt maliyetleri, Doluluk Oranı (Load Factor - LF), Koltuk Başına Maliyet ve Gelir (CASK ve RASK) Kâra Geçiş Doluluk Oranı (Break-Even Load Factor – BELF Filo Standardizasyonu pazar koşulları ve müşteri memnuniyeti gibi farklı faktörlerin tümü, şirketin yıllık kârını ve gelir düzeyini etkileyebilmektedir [103]. Bu gibi durumlarda, sadece bir faktörün değil, tüm faktörlerin aynı anda analiz edilmesi ve bağımlı değişken üzerindeki etkilerinin ayrıştırılması gerekmektedir. Çoklu doğrusal regresyon analizi, bu tür karmaşık ilişkileri ele alarak bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki bireysel ve ortak etkilerini ayrı ayrı belirlemek ve analiz etmek için ideal bir yöntem sunmaktadır [103]. Çoklu doğrusal regresyon analizinin amacı, bağımlı değişken ile birden fazla bağımsız değişken arasında gözlemlenen ilişkileri matematiksel bir modelle ifade etmek, bu ilişkileri sayısal olarak ölçmek ve gelecekteki değerleri tahmin etmek için bir yapı sunmaktır.

Çoklu doğrusal regresyon modelinde, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayılmaktadır [104]. Yani bağımlı değişkendeki değişimler, bağımsız değişkenlerdeki doğrusal değişimlerle açıklanabilmektedir. Örneğin, bir bağımsız değişkendeki artış veya azalma, bağımlı değişkende doğrusal bir artış veya azalmaya neden oluyorsa, bu ilişki doğrusal olarak kabul edilir. Doğrusallık varsayımı, modelin temel varsayımlarından biridir ve modelin güvenilir sonuçlar üretebilmesi için bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin doğrusal olması gereklidir. Eğer bağımsız değişkenler arasındaki ilişki doğrusal değilse, çoklu doğrusal regresyon modeli hatalı sonuçlar verebilir veya bağımlı değişkendeki değişimi yeterince açıklayamayabilir. Bu nedenle, model kurulmadan önce bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin doğrusal olup olmadığı dikkatlice incelenmelidir [104].

Çoklu doğrusal regresyon analizinde, bir bağımlı değişkenin (y) birden fazla bağımsız değişken ($x_1, x_2, \dots, x_k$) ile olan doğrusal ilişkisini modellemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Bu yöntemin genel denklemi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad [105]. \quad (1)$$

Bu denklemde, y bağımlı değişkeni temsil ederken, $x_1, x_2, \dots, x_k$ bağımsız değişkenleri ifade etmektedir. β_0 sabit terimi, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ regresyon katsayıları ve ε hata terimini temsil etmektedir. Regresyon katsayıları ($\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$), bağımsız değişkenlerdeki bir birimlik değişimin bağımlı değişken üzerindeki etkisini açıklamaktadır. Hata terimi (ε) ise modelin, bağımsız değişkenlerle açıklanamayan varyansı ifade eder ve genellikle normal dağılıma sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu modelin temel varsayımları arasında bağımsız değişkenlerin doğrusal ilişki kurması, hata terimlerinin ortalaması sıfır olması ($E(\varepsilon)=0$), hata terimlerinin sabit varyansa (homoskedastisite) sahip olması ve bağımsız değişkenler arasında çoklu ilişki olmaması yer almaktadır [106].

Çoklu doğrusal regresyon analizinin bir diğer avantajı, verilerden geleceğe yönelik tahminler yapma imkânı sunmasıdır. Bağımsız değişkenlerin değerleri bilindiğinde, çoklu doğrusal regresyon modeli yardımıyla bağımlı değişkenin gelecekte alabileceği değerler tahmin edilebilmektedir [107]. Bu özellik, özellikle finans, pazarlama, mühendislik, sosyal bilimler ve biyoloji gibi alanlarda oldukça kullanılmaktadır. Örneğin, bir işletmenin satış tahminlerini veya pazarlama kampanyalarının etkinliğini değerlendirmek için çoklu doğrusal regresyon analizi kullanılarak ileriye yönelik projeksiyonlar yapılabilir. Bu projeksiyonlar, işletmelerin stratejik kararlarını destekleyerek, kaynakları daha verimli kullanmalarına ve hedeflerine ulaşmalarına yardımcı olmaktadır [107].

Çoklu doğrusal regresyon analizinin güvenilir sonuçlar verebilmesi için belirli varsayımların sağlanması gereklidir. Bu varsayımlar arasında en önemli olanlardan biri de bağımsız değişkenler arasında multikolineerlik bulunmamasıdır [108]. Multikolineerlik, bağımsız değişkenlerin kendi aralarında yüksek korelasyon gösterdiği durumlarda ortaya çıkar ve modelin doğruluğunu olumsuz etkilemektedir. Multikolineerlik problemi, çoklu doğrusal regresyon analizinde bağımsız değişkenlerin etkilerinin doğru bir şekilde ayrıştırılmasını zorlaştırır. Örneğin, yakıt maliyetleri ve biyoyakıt kullanımı gibi faktörlerin bağımsız değişkenler olarak kullanıldığı bir analizde, eğer bu iki değişken birbirleriyle yüksek korelasyon gösteriyorsa, multikolineerlik problemi ortaya çıkar ve modelin güvenilirliği azalır [108].

Çoklu doğrusal regresyon analizi, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini incelemenin yanı sıra, hata terimlerinin dağılımını da dikkate almaktadır. Hata terimleri, modelde açıklanamayan varyasyonları temsil eder ve modelin doğruluğunu belirlemede önemli bir role sahiptir [109]. Hata terimlerinin normal dağıldığı varsayımı, modelin geçerliliği için önemlidir. Eğer hata terimleri normal dağılıma sahip değilse, modelin tahminleri yanıltıcı olabilir ve sonuçların güvenilirliği azalmaktadır [109]. Dolayısıyla, çoklu doğrusal regresyon analizi yapılırken hata terimlerinin dağılımının dikkatlice incelenmesi ve normallik varsayımının sağlanıp sağlanmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu tür kontroller, modelin daha güvenilir ve sağlam sonuçlar üretmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak, çoklu doğrusal regresyon analizi, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki doğrusal ilişkileri inceleyen kapsamlı bir istatistiksel tekniktir. Bu teknik, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini ayrıştırarak, karmaşık sistemleri analiz etme ve gelecek hakkında tahminlerde bulunma imkânı sunar. Çoklu doğrusal regresyon analizinin sağlıklı bir şekilde uygulanabilmesi için doğrusal ilişki, bağımsızlık, normallik ve sabit varyans gibi varsayımlar dikkatlice kontrol edilmelidir. Bu varsayımlar sağlandığında, çoklu doğrusal regresyon analizi, çeşitli alanlarda geniş uygulama yelpazesi ile veri tabanlı karar alma süreçlerini destekleyen güçlü bir araç olarak öne çıkar.

7.1. Çoklu Doğrusal Regresyon Analizinin Varsayımları ve Özellikleri

Çoklu doğrusal regresyon analizi, sağlıklı ve güvenilir sonuçlar üretebilmesi için bazı temel varsayımların sağlanması gerektirmektedir. Bu varsayımlar, modelin doğru bir şekilde tahmin yapabilmesini ve bağımlı değişken üzerindeki etkilerin daha doğru bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır. Eğer bu varsayımlar ihlal edilirse, modelin ürettiği sonuçlar yanıltıcı olabilir ve karar alma süreçlerinde hatalı sonuçlara yol açabilir. Bu varsayımlar aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır:

7.1.1. Doğrusallık Varsayımı

Doğrusallık varsayımı, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olduğunu kabul etmektedir. Bu varsayım, bağımlı değişken üzerindeki değişimlerin, bağımsız değişkenlerde meydana gelen doğrusal değişimlerle açıklanabileceğini öngörmektedir [110]. Doğrusallık varsayımı, modelin doğruluğunu belirleyen en temel faktörlerden biridir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olmadığında, model tahminlerde yetersiz kalmakla birlikte bağımlı değişken üzerindeki değişimlerin gerçek nedenlerini doğru bir şekilde yansıtamamaktadır. Eğer bu varsayım ihlal edilirse, modelde kullanılan katsayılar güvenilir hale gelir ve model, bağımlı değişkeni yetersiz bir doğrulukla açıklayabilmektedir [110].

Bu varsayımı sağlamak amacıyla genellikle bağımlı değişken ve bağımsız değişkenler arasında bir korelasyon analizi yapılır. Bu analiz, bağımlı değişkenin doğrusal bir eğilim gösterip göstermediğini test eder ve elde edilen sonuçlara göre modele doğrusal olmayan ilişkiler dahil edilmesi gerekebilir [111]. Eğer doğrusal bir ilişki mevcut değilse, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi daha iyi yansıtabilmek için logaritmik, polinom veya başka bir doğrusal olmayan dönüşüm uygulanabilir. Böylece, model doğruluğunu artırarak daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır.

7.1.2. Bağımsızlık Varsayımı

Bağımsızlık varsayımı, bağımsız değişkenlerin birbirleriyle ilişkisiz olmaları gerektiğini belirtmektedir [112]. Bu varsayıma göre, her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisi bağımsız olarak değerlendirilir. Bağımsızlık varsayımı, bağımsız değişkenler arasındaki ilişkilerin modelin sonuçlarını etkilemesini önler. Eğer bağımsız değişkenler arasında bir ilişki varsa, multikolineerlik adı verilen bir sorun ortaya çıkmaktadır [113]. Multikolineerlik, bağımsız değişkenlerin katsayılarının güvenilirliğini düşürerek tahmin hatalarına yol açar. Bu durum, bağımsız değişkenlerin etkilerinin ayrıştırılmasını zorlaştırarak modelin doğruluğunu olumsuz etkiler ve bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki bireysel katkılarının ölçülmesini güçleştirir [113]. Multikolineerlik tespiti için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Örneğin, VIF (Variance Inflation Factor) değerleri, bağımsız değişkenlerin birbiriyle ne kadar ilişkili olduğunu ölçmek için kullanılır. VIF değerleri 10'un üzerinde olduğunda, multikolineerliğin ciddi bir sorun olduğunu ve model sonuçlarını yanıltıcı hale getirebileceğini gösterir. Bu durumda, modelde kullanılan bağımsız değişkenlerden bazıları çıkarılabilir veya veri dönüşümleri yapılabilir. Böylece modeldeki bağımsızlık varsayımı sağlanarak daha doğru sonuçlar elde edilebilir [113].

7.1.3. Hata Terimlerinin Normallik Varsayımı

Hata terimlerinin normal dağıldığı varsayımı, modelin geçerliliği açısından önemli bir yer tutar. Bu varsayım, modelde tahmin edilen değerlerin hata paylarının normal bir dağılım sergilemesi gerektiğini ifade etmektedir. [114]. Hata terimlerinin normal dağılım göstermesi, modelin tahmin ettiği değerlerin simetrik bir şekilde dağıldığını ve aşırı uç değerlerin analiz sonuçlarını etkilemediğini gösterir. Normallik varsayımı ihlal edildiğinde, model sonuçları yanıltıcı olabilir ve modelin katsayıları güvenilirlik açısından zayıflamaktadır [114].

Hata terimlerinin normallik varsayımının sağlanması, özellikle modelin hipotez testleri açısından kritik bir öneme sahiptir. Eğer hata terimleri normal bir dağılım göstermiyorsa, parametrelerin tahmininde yanlışlar oluşabilir ve bu durum istatistiksel testlerin sonuçlarını da geçersiz kılabilir. Normallik varsayımı, grafiksel analizlerle veya Shapiro-Wilk ve Kolmogorov-Smirnov testleri gibi istatistiksel testlerle incelenebilir. Eğer normallik varsayımı sağlanmıyorsa, veri dönüşümleri yapılabilir veya istatistiksel yöntemlerle hata terimlerinin normal dağılım göstermesi sağlanabilir [115].

7.1.4. Sabit Varyans (Homoskedastisite) Varsayımı

Homoskedastisite, hata terimlerinin varyansının sabit olduğunu varsaymaktadır [116]. Yani hata terimlerinin varyansı, bağımsız değişkenlerin değerlerine göre değişmez. Bu varsayım, modelin her bir gözlem için aynı hata payına sahip olduğunu ve veri setindeki sapmaların dengeli

olduğunu belirtmektedir [116]. Eğer hata terimlerinin varyansı sabit değilse, yani heteroskedastisite varsa, modelin katsayıları tahmin edilirken hata payları artar ve model sonuçları güvenilir olmaktan çıkar. Heteroskedastisite, bağımsız değişkenlerin yüksek veya düşük değerlerinde hata paylarının farklı olmasına neden olarak modelin doğruluğunu olumsuz etkiler [116].

Heteroskedastisite, modelin tahmin ettiği değerlerin bağımsız değişkenlerin belirli aralıklarında daha büyük hata payları göstermesi durumunda ortaya çıkar. Bu durum, özellikle büyük veri setlerinde veya geniş veri dağılımlarında sık karşılaşılan bir sorundur. Heteroskedastisiteyi tespit etmek için Breusch-Pagan testi, White testi gibi yöntemler kullanılmaktadır [117]. Eğer heteroskedastisite tespit edilirse, modelin hata terimlerini sabitlemek için ağırlıklı en küçük kareler (Weighted Least Squares) yöntemi veya veri dönüşümleri uygulanabilir. Bu tür düzeltme yöntemleri, modelin daha doğru tahminler yapmasını ve analiz sonuçlarının güvenilirliğini artırır [117].

Bu temel varsayımlar sağlandığında, çoklu doğrusal regresyon analizi daha güvenilir ve geçerli sonuçlar sunar. Ancak, bu varsayımların ihlal edilmesi durumunda modele alternatif yöntemler veya veri dönüşümleri uygulanması gerekebilir. Bu tür düzenlemeler, modelin geçerliliğini artırarak güvenilir sonuçların elde edilmesine olanak sağlar.

8. ÇOKLU DOĞRUSAL REGRESYON ANALİZİNİN UYGULAMA ALANLARI VE KULLANIM ALANLARI

Çoklu doğrusal regresyon analizi, birçok farklı disiplinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Ekonomi, mühendislik, biyoloji, pazarlama ve sağlık gibi alanlarda özellikle faydalı olan bu analiz yöntemi, çok sayıda faktörün bir sonuca nasıl etki ettiğini anlamak için kullanılmaktadır. Her bir alanın kendine özgü ihtiyaçlarına göre uyarlanabilir yapısı, çoklu doğrusal regresyon analizini esnek ve etkili bir araç haline getirir [118]. Çoklu doğrusal regresyon analizi, tarım bilimlerinde çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı destekleyen önemli bir istatistiksel yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, tarımsal üretim süreçlerinde değişkenler arasındaki ilişkileri anlamak ve bu ilişkilerin mekânsal ve zamansal değişimlerini değerlendirmek için kullanılmaktadır [118]. Özellikle azot kullanım verimliliği (NUE) gibi kritik göstergelerin analizi, bu yöntemin uygulama alanları arasında yer almaktadır.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü'nün yapmış olduğu bir çalışmada tarımsal azot kullanım verimliliği üzerine yapılan incelemelerde, çoklu doğrusal regresyon (SMLR) ve Rastgele Orman (RF) modelleri kullanılmıştır [119]. Azot kullanım verimliliğinin iki temel göstergesi olan kısmi faktör verimliliği (PFPN) ve kısmi besin dengesi (PNBN), bölgesel ve zamansal düzeyde analiz edilmiştir [119]. Bu analizde, toprak özellikleri, mahsul türleri, iklimsel değişkenler ve tarımsal yönetim uygulamaları gibi çok sayıda bağımsız değişkenin azot kullanım verimliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, PFPN'nin bölgenin kuzey kesimlerinde daha yüksek olduğu ve PNBN'nin ise güneyden kuzeye doğru arttığına işaret etmektedir.

Regresyon analizi, ekonomik değişkenler arasındaki ilişkileri anlamak, bu ilişkileri kantitatif olarak ifade etmek ve ekonomik teorileri test etmek için temel bir araç olarak kullanılmaktadır. Ekonometrik modeller, bağımlı bir değişkenin bağımsız değişkenlerden nasıl etkilendiğini ölçmek, bu etkilerin büyüklüğünü tahmin etmek ve ekonomik politikaların etkilerini değerlendirmek için tasarlanmaktadır [120]. Örneğin, gelir ve tüketim arasındaki ilişkiyi inceleyen bir ekonomist, regresyon analizi yardımıyla gelirdeki bir birimlik artışın tüketim üzerindeki etkisini hesaplayabilir. Bu yöntem, ekonomik teorilerin öngördüğü ilişkilerin ampirik olarak doğrulanmasını veya reddedilmesini sağlayarak, teorilerin geçerliliğini değerlendirme imkânı sunar [120]. Ayrıca, ekonomik politika yapıcılar için öngörülerde bulunarak, belirli politika değişikliklerinin olası sonuçlarını analiz etmeye olanak tanır. Regresyon analizi, tahmin edilen parametrelerin doğruluğunu ve anlamlılığını istatistiksel kriterlere dayalı olarak değerlendirme süreçlerini içerir; bu da modelin güvenilirliğini ve karar alıcılar için sağladığı rehberliği artırır [120]. Böylece, ekonomik büyüme, enflasyon, işsizlik gibi makroekonomik değişkenlerin analizi ve tahmininde, regresyon analizi vazgeçilmez bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Regresyon analizi, sağlık sektöründe değişkenler arasındaki ilişkilerin analiz edilmesi ve geleceğe yönelik tahminler yapılmasında kritik bir araçtır. Bu yöntem, özellikle bağımlı bir değişkenin bağımsız değişkenler üzerindeki etkisinin anlaşılmasına olanak sağlar. Sağlık araştırmalarında regresyon analizi, hastalıkların teşhisi ve seyri, tedavi yöntemlerinin etkinliği, risk faktörlerinin belirlenmesi ve hasta sonuçlarının öngörölmesi gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [121]. Bu bağlamda, doğru model seçimi, veri kalitesinin sağlanması ve analiz sonuçlarının klinik uygulamalarla ilişkilendirilmesi önemlidir. Modelin genellenebilirliğinin ve geçerliliğinin sağlanması, sonuçların güvenilirliği açısından gereklidir. Regresyon analizi, özellikle sağlık alanında karmaşık ilişkilerin incelenmesi ve klinik karar destek sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayarak bilimsel ilerlemeye hizmet etmektedir [121]. Bu analiz türünün başarılı bir şekilde uygulanması hem istatistiksel hem de klinik açıdan dikkatli bir değerlendirme gerektirir.

Sonuç olarak, çoklu doğrusal regresyon analizi, farklı disiplinlerde karmaşık veri setlerini anlamlandırmada etkili bir araç olarak hem teorik araştırmalara hem de pratik uygulamalara değerli katkılar sağlamaktadır. Bu analiz yöntemi, karar vericilere daha bilinçli ve veri odaklı stratejiler geliştirme imkânı sunarak, çeşitli sektörlerde yenilikçi çözümlerin önünü açmaktadır.

8.1. Çoklu Doğrusal Regresyon Analizinin Avantajları ve Kısıtlamaları

Regresyon analizi, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkilerin anlaşılmasında ve geleceğe yönelik tahminlerde önemli bir araç olarak öne çıkar. Veri setlerindeki eğilimleri ve faktörler arasındaki bağlantıları ortaya koyarak, hangi değişkenlerin önemli olduğunu ve bu değişkenlerin nasıl etkileşimde bulunduğunu anlamamızı sağlamaktadır [122]. Bu analiz, yalnızca mevcut durumun analizini yapmakla kalmaz, aynı zamanda gelecekteki olası eğilimler hakkında öngörülerde bulunmamıza da olanak tanır; bu özellik, özellikle finans ve iş dünyasında stratejik planlamada büyük fayda sağlamaktadır [122]. Aynı zamanda, regresyon analizi karar verme süreçlerini iyileştirir; sezgilere dayalı hataları minimize eder ve veri odaklı bir yaklaşım benimsenmesini sağlar. Analizin doğrusal ve doğrusal olmayan modelleri, farklı veri türlerine ve problemlerine uyum sağlama esnekliği sunarak, sağlık, ekonomi, çevre bilimi gibi birçok alanda geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Ayrıca, regresyon analizi araştırmacılara hipotezlerini test etme ve bu hipotezlere dair güçlü kanıtlar sunma imkânı tanır. Bu sayede hem akademik araştırmalarda hem de ticari uygulamalarda güvenilir sonuçlar elde etmek için vazgeçilmez bir yöntemdir.

Regresyon analizi, güçlü bir istatistiksel araç olmasına rağmen, bazı önemli sınırlamaları ve kısıtlamaları beraberinde getirir. En temel sorunlardan biri, "atlanan değişken yanlılığı" olarak bilinen, modele dahil edilmeyen veya ölçölmesi mümkün olmayan faktörlerin sonuçlar üzerindeki etkisidir [123]. Bu durum, modelin yalnızca belirli bir düzeyde açıklama gücü sunmasına neden olur ve elde edilen sonuçların tam bir kesinlik taşımasına yol açar. Bununla bağlantılı olarak,

"endojenlik" problemi de sıklıkla karşılaşılır; bu, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişkinin nedensellik yönünün net bir şekilde belirlenememesi durumudur [124]. Böyle bir senaryoda, değişkenler arasındaki etkileşimler karmaşık hale gelir ve sonuçlar yanıltıcı olabilir. Ayrıca, regresyon analizinde kullanılan veri setinin büyüklüğü kritik bir rol oynar; küçük bir örneklem büyüklüğü, modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini sınırlandırır, çünkü yeterli çeşitlilikte veri olmadan doğru bir analiz yapmak zordur. Modelin belirli varsayımlarını ihlal etmek, özellikle doğrusal ilişki, homoscedasticity (sabit hata varyansı) ve bağımsızlık gibi koşullar sağlanmadığında, sonuçların güvenilirliğini ciddi şekilde zayıflatır [125]. Son olarak, modeller genellikle yalnızca belirli bir bağlam veya veri türü için tasarlanmıştır, bu da genellenebilirliği sınırlar ve farklı bağlamlara uyarlanmasını zorlaştırmaktadır [125]. Bu sınırlamalar, analiz sürecinde alınan kararların dikkatle değerlendirilmesi ve sonuçların özenle yorumlanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Modelleme sürecinde şeffaflık, bu sınırlamaların etkisini azaltmak ve sonuçların güvenilirliğini artırmak için kritik bir gerekliliktir.

9. ARAŞTIRMANIN YÖNTEMİ

Araştırmada kullanılan veri seti, bir bağımlı değişken ve sekiz adet bağımsız değişkenden oluşmaktadır. Bağımlı değişken, A321 uçak modelinde "harcanan yakıt" olarak tanımlanmıştır. Bu değişken, uçuş operasyonlarında enerji verimliliği ve maliyet optimizasyonu açısından kritik bir öneme sahiptir. Bağımsız değişkenler ise "yolcu sayısı", "uçuş seviyesi", "uçuş mesafesi", "ortalama rüzgar", "ortalama hız", "uçuş süresi (dakika)", "uçak kalkış ağırlığı" ve "toplam yakıt" şeklinde sıralanmaktadır. Bu değişkenler, uçuş performansı ve yakıt tüketimi arasındaki ilişkiyi modellemek amacıyla dikkatlice seçilmiştir.

Analizde kullanılan veriler, İstanbul Havalimanı'ndan elde edilen 2024 yılının aralık ayı, 2025 yılına ait ocak ve şubat aylarına dair uçuş bilgilerini içermektedir. İstanbul Havalimanı, Türkiye'nin en yoğun hava trafiğine sahip merkezlerinden biri olması nedeniyle, güvenilir ve geniş bir veri seti sağlamaktadır. Çalışmanın temel amacı, bağımsız değişkenlerin harcanan yakıt üzerindeki etkisini modellemek ve bu model doğrultusunda tahmin yapabilmektir. Bu amaç doğrultusunda, üç aylık uçuş verileri model oluşturma sürecinde eğitilmiş, bir aylık uçuş verileri ise modelin tahmin kapasitesini değerlendirmek için kullanılmıştır. Üç aylık verilerin modelleme sürecinde tercih edilmesinin nedeni, bu sürenin yeterli veri çeşitliliği ve güvenilir sonuçlar elde etmek için uygun bir zaman dilimi sunmasıdır.

Bağımlı ve bağımsız değişkenlerin seçiminde, uçuş operasyonlarına yönelik literatürdeki önceki çalışmalar ve havacılık sektöründe uygulanan standartlar dikkate alınmıştır. "Yolcu sayısı", uçağın taşıdığı toplam yük üzerinde doğrudan bir etkisi olduğundan, yakıt tüketimini belirleyen önemli bir faktördür. Benzer şekilde, "uçuş seviyesi" ve "uçuş mesafesi" gibi değişkenler, uçuş dinamiklerini ve yakıt verimliliğini doğrudan etkileyen operasyonel parametreler arasında yer almaktadır. "Ortalama rüzgar" ve "ortalama hız", uçuş esnasında uçağın maruz kaldığı çevresel koşulları yansıtarak yakıt tüketimine olan etkilerini anlamak için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, "uçuş süresi" ve "uçak kalkış ağırlığı", uçak performansını belirleyen temel unsurlar arasında yer almakta, "toplam yakıt" değişkeni ise uçuş öncesinde depolanan yakıt miktarını ifade etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında 110 adet ayrı A321 uçak filosuna ait gerçek uçuş verileri yukarıda verilen uçuş seviyesi, ortalama rüzgar, ortalama hız, yolcu sayısı, uçuş süresi, uçak kalkış ağırlığı gibi parametreleri de içine alacak şekilde toplanarak analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, araştırma kapsamında kullanılan modelin oluşturulması ve doğrulanması süreçlerinde ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir. Modelleme aşamasında 110 adet uçuş verilerinin tercih edilmesi, veri setinin mevsimsel değişkenlik ve operasyonel farklılıklar gibi olası etkileri içermesini sağlamıştır. Eğitilen modelin doğruluğunu test etmek ve gelecekteki uçuşlar için yakıt tüketimini tahmin etmek amacıyla üç aylık uçuş verileri temel alınmıştır. Bu yaklaşım, hem modelin genelleme kapasitesini hem de gerçek operasyonel koşullara uygunluğunu değerlendirme imkanı sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkilerin detaylı bir şekilde analiz edilmesini sağlamış ve harcanan yakıt miktarını tahmin etme kapasitesine sahip bir model geliştirilmiştir. İstanbul Havalimanı verilerine dayalı olarak gerçekleştirilen bu araştırma, havacılık sektöründe enerji verimliliği ve operasyonel performansın artırılmasına yönelik değerli bir katkı sunmaktadır. Elde edilen bulgular, hem sektörel uygulamalarda hem de gelecekte yapılacak akademik çalışmalarda rehberlik edebilecek niteliktedir.

Yapılan uygulamada operasyon boyunca harcanan yakıtı tahmin edebilmek için sekiz adet bağımsız değişken olan çoklu doğrusal regresyon analizi ve çoklu doğrusal regresyon analizinin diğer ön testleri olan normallik dağılımı, doğrusallık, çoklu doğrusallık, korelasyon, uç değerler, çarpıklık ve basıklık değerleri ölçülmüştür. Çoklu doğrusal regresyon analizinin formülü

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon \quad [2] \text{ şeklindedir [126].}$$

Bu formülde:

y : Bağımlı değişken

$x_1, x_2, \dots, x_p$: Bağımsız değişkenler

β_0 : Kesişim noktası

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$: Regresyon katsayıları (bağımsız değişkenlerin katsayıları)

ε : Hata terimini ifade etmektedir [126].

Araştırmanın konusu olan veri setlerinde ise şu şekilde formülize edilebilir:

y : Harcanan yakıt

x_1 : Yolcu sayısı

x_2 : Uçuş seviyesi

x_3 : Uçuş mesafesi

x_4 : Ortalama rüzgar

x_5 : Ortalama hız

x_6 : Uçuş süresi (dakika)

x_7 : Uçak kalkış ağırlığı

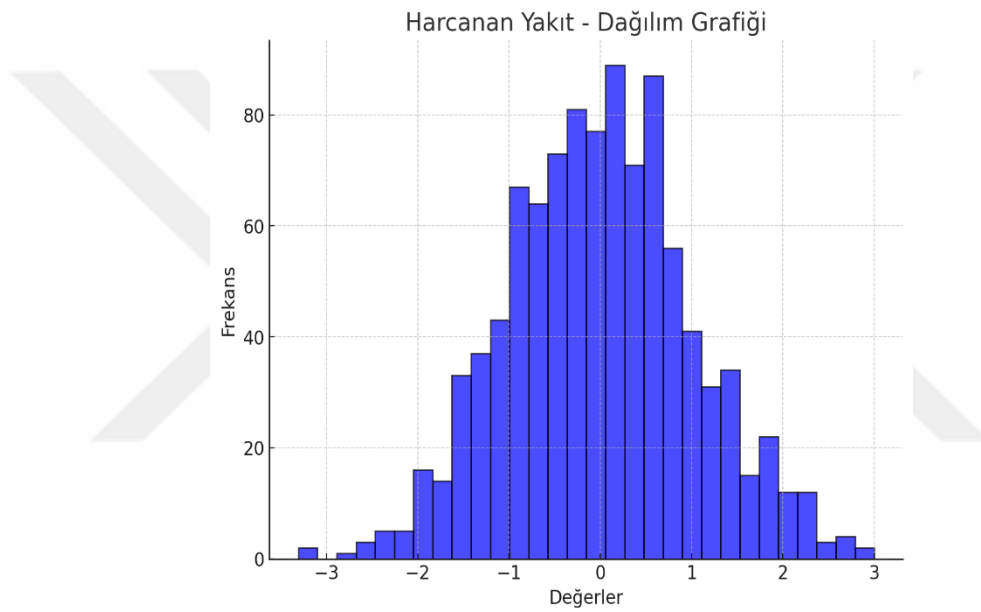
x_8 : Toplam yakıtı temsil etmektedir.

Araştırmaya konu olan modelin H1 hipotezi ise uçuş sırasındaki yakıt tüketimi, operasyonel verimliliği etkileyen faktörlere bağlıdır ve bu faktörler arasında yolcu sayısı, uçuş seviyesi, uçuş mesafesi, ortalama rüzgar, ortalama hız, uçuş süresi (dakika), uçak kalkış ağırlığı ve toplam yakıt yükünü içinde barındırmaktadır. Modelin alfa değeri 0,05 şeklinde sınırlandırılmıştır. Modelin çarpıklık basıklık değerleri ise Tablo 9.1 de verildiği şekilde oluşturulmuştur:

Tablo 9.1. Çarpıklık - Basıklık Değerleri

	HARCANAN YOLCU YAKIT	YOLCU SAYISI	UÇUŞ MESAFESİ	ORTALAMA RÜZGAR	ORTALAMA HIZ	UÇUŞ SÜRESİ (DAKİKA)	UÇAK KALKIŞ AĞIRLIĞI	TOPLAM YAKIT
Çarpıklık	1,14	0,27	0,94	0,94	0,22	0,65	0,59	0,94
Basıklık	0,69	-0,34	1,15	1,37	-0,81	0,33	-0,74	0,27

Değişkenlerin çarpıklık ve basıklık değerlerine bakıldığında tüm değerlerin -2 ile +2 arasında olduğu görülmüş olup normallik dağılımına uygun olduğu gözlemlenmiştir.

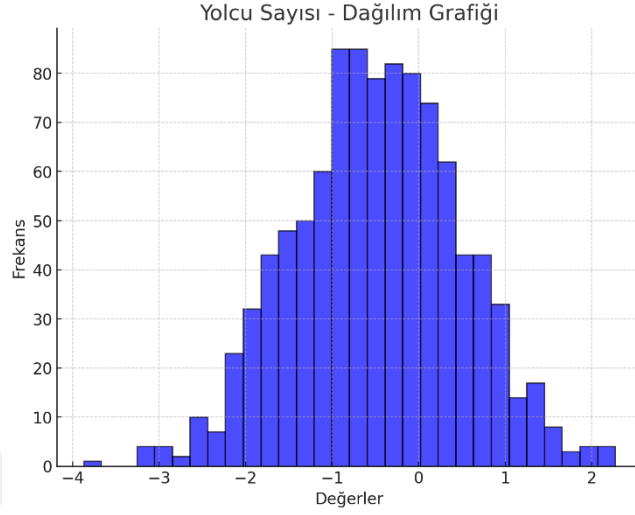


Şekil 9.1. Harcanan yakıt dağılım grafiği

Şekil 9.1 harcanan yakıt dağılım grafiğini vermektedir. Bu grafikte yer alan frekans değeri belirli bir aralıktaki veri noktalarının sayısını ifade eden bir ölçüt olmakla birlikte dağılımın yoğunluk seviyesini göstermektedir. Tabloda değerler olarak belirtilen eksen ise analiz edilen değişkenin (örneğin, harcanan yakıt miktarının normalize edilmiş hali) aldığı farklı aralıkları temsil ettiğini göstermektedir. Dağılımın simetrik ve çan şeklinde olduğu görülmektedir; bu durum, dağılımın normal dağılıma büyük ölçüde uygun bir yapı sergilediğini göstermektedir. Simetrik yapı, merkezi eğilim ölçütlerinin (ortalama, medyan ve mod) birbirine yakın olduğunu ve verilerin büyük kısmının dağılımın orta bölgesinde yoğunlaştığını ortaya koyar. Uç değerlerin sıklığının azalması da bu yapıyı desteklemektedir.

Normal dağılıma uygun bir yapı, istatistiksel analizlerde normallik varsayımına dayalı testler için güçlü bir temel oluşturur. Bu durum, elde edilen verilerin hem güvenilirliğini artırır hem

de analizlerin doğruluğunu destekler. Şekil 9.1 de görülen çan şekli, verilerin düzenli bir şekilde dağılmış olduğunu işaret ederken, normallik varsayımı altında yapılan modelleme çalışmalarına olanak tanır.



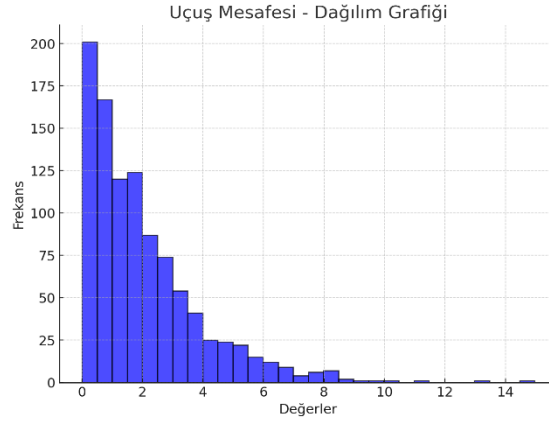
Şekil 9.2. Yolcu sayısı dağılım grafiği

Şekil 9.2 de verilen yolcu sayısı frekans dağılım grafiği incelendiğinde hafif sola çarpık bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 9.2’de frekans olarak gösterilen eksen, belirli bir yolcu sayısı aralığında kaç uçuşun gerçekleştiğini ifade ederken, değerler ekseni yolcu sayısının normalize edilmiş dağılımını temsil etmektedir. Normal dağılıma yakın bir yapı sergileyen bu grafik, uçuşların büyük çoğunluğunun belirli bir yolcu kapasitesinde gerçekleştiğini ve aşırı düşük veya yüksek yolcu sayısına sahip uçuşların daha nadir olduğunu göstermektedir. Bu durum, veri setinde bazı değerlerin dağılımın sol tarafında daha fazla yoğunlaştığını ve dolayısıyla simetrik bir yapıya kıyasla küçük bir sapmanın mevcut olduğunu göstermektedir. Ancak, bu sapmanın belirgin bir düzeyde olmadığı ve genel itibarıyla dağılımın normal dağılıma yakın bir yapı sergilediği de dikkat çekmektedir.

Hafif sola çarpıklık, genellikle düşük değerlerin yoğunluğunun yüksek olduğu veri setlerinde ortaya çıkmakta olup, ortalama, medyan ve mod gibi merkezi eğilim ölçütleri arasındaki farkların minimal düzeyde kaldığını ifade eder. Bu tür bir dağılım yapısı, verilerin büyük bir kısmının normal dağılıma uygunluk gösterdiği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, bu küçük çarpıklık, normallik varsayımı altında gerçekleştirilecek istatistiksel analizlerin sonuçlarını önemli ölçüde etkilemeyecek düzeydedir.

Elde edilen bu bulgular, dağılımın genellikle normal dağılımın temel özelliklerine uygun bir yapı sergilediğini ve yalnızca sınırlı bir sapma içerdiğini ortaya koymaktadır. Hafif sola çarpıklığın varlığı, dağılımın normalliğini tamamen geçersiz kılmamakla birlikte, analiz süreçlerinde göz önünde bulundurulması gereken bir unsur olarak değerlendirilebilir. Sonuç olarak,

bu dağılım, istatistiksel testler ve modelleme çalışmaları için genellikle yeterli bir uygunluk sunmaktadır.

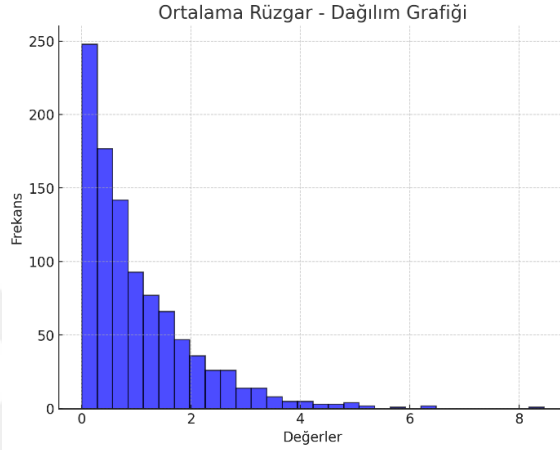


Şekil 9.3. Uçuş mesafesi dağılım grafiği

Şekil 9.3 de verilen uçuş mesafesi dağılım grafiğinde frekans, belirli bir uçuş mesafesi aralığında gerçekleşen uçuş sayısını, değerler ise uçuş mesafelerinin dağılımını temsil etmektedir. Pozitif çarpıklık gösteren bu dağılım, kısa mesafeli uçuşların daha yaygın olduğunu, uzun mesafeli uçuşların ise nadiren gerçekleştiğini göstermektedir. Grafiğin incelenmesi sonucunda, sağ kuyruğun uzun olduğu ve belirgin bir şekilde sağ çarpık bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, veri setinde yüksek değerlere sahip gözlemlerin sayısının az olmasına rağmen, bu tür değerlerin dağılımının sağ tarafında daha geniş bir alana yayıldığını göstermektedir. Sağ çarpıklık, veri setindeki uç değerlerin etkisinin arttığını ve merkezi eğilim ölçütlerinden ortalama değer, medyan ve mod gibi diğer ölçütlerden daha yüksek olmasına neden olduğunu ifade etmektedir. Bu durum, verilerin dağılımının simetrik olmadığını ve dolayısıyla normal dağılıma uygunluk göstermediğini açıkça ortaya koymaktadır.

Yukarıda gösterilen şekilde, pozitif çarpıklık (sağa çarpık) gösteren bir dağılıma sahiptir, yani kısa mesafeli uçuşların daha sık gerçekleştiği, uzun mesafeli uçuşların ise nadiren görüldüğü anlaşılmaktadır. Bu durum, genellikle havayolu operasyonlarında kısa mesafeli iç hat uçuşlarının daha fazla olmasına veya bölgesel taşımacılığın yoğunluğuna işaret etmektedir. Normal dağılımın temel özelliklerinden biri olan simetrik çan şekli, sağ çarpık bir dağılımda yerini dengesiz bir yapıya bırakmaktadır. Sağ kuyruğun uzun olması, veri setindeki uç değerlerin analizde daha fazla dikkate alınması gerektiğini işaret etmektedir. Özellikle bu tür bir dağılım, yüksek değerlerin daha sık veya daha etkili olduğu durumları temsil ederken, standart normallik varsayımlarına dayalı analizlerin uygulanabilirliğini sınırlayabilir. Bu bağlamda, dağılımın sağ çarpık olduğu tespit edildiğinde, verilerin analizinde farklı yöntemlerin tercih edilmesi gerekebilir.

Sonuç olarak, sağ kuyruğun uzunluğu ve sağ çarpıklığın belirgin olması, veri setinin normal dağılım özelliklerinden uzaklaştığını açıkça göstermektedir. Bu tür bir dağılım yapısı, istatistiksel analizlerin ve sonuçların yorumlanmasında dikkatli bir yaklaşımı gerektirir. Verilerin bu karakteristiği, özellikle uç değerlerin yoğun olduğu durumlarda, analitik süreci ve kullanılan yöntemlerin seçimini doğrudan etkilemektedir. Sağ çarpık bir dağılımın varlığı, normallik varsayımına dayanmayan alternatif istatistiksel yöntemlerin kullanılmasını gerektirebilir.



Şekil 9.4. Ortalama rüzgar dağılım grafiği

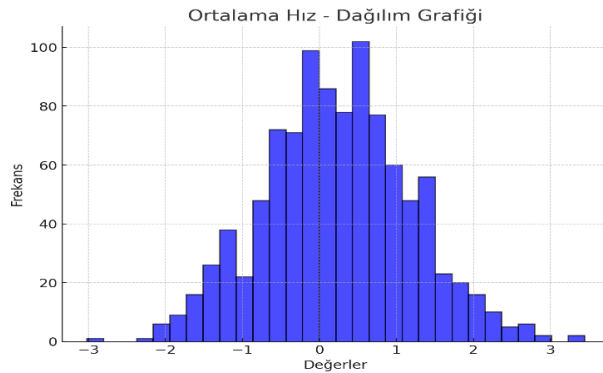
Şekil 9.4’de ortalama rüzgar dağılımının analizi tablosu gösterilmektedir. Grafikte bulunun frekans, belirli bir rüzgar hızı aralığında kaç uçuşun gerçekleştiğini, değerler ise uçuşlarda gözlemlenen rüzgar hızlarının dağılımını göstermektedir. Pozitif çarpıklık sergileyen bu dağılım, düşük rüzgar hızlarının daha yaygın olduğunu, yüksek rüzgar hızlarının ise nadir olarak meydana geldiğini ifade etmektedir. Yapılan analiz sonucunda, çok sağ çarpık bir yapıya sahip olduğu ve uç değerlerin oldukça yoğun bir şekilde biriktiği gözlemlenmiştir. Bu durum, veri setinde yüksek değerlere sahip gözlemlerin hem daha sık hem de daha etkili bir şekilde yer aldığını göstermektedir. Sağ çarpıklığın bu denli belirgin olması, dağılımın simetrik bir yapıya sahip olmadığını ve dolayısıyla normal dağılım özelliklerinden uzaklaştığını ortaya koymaktadır. Normal dağılımın temel özelliklerinden biri olan simetri ve çan şekli, bu dağılımda yerini sağ tarafa doğru uzayan bir kuyruk yapısına ve bu bölgedeki yoğunlaşmalara bırakmıştır.

Uç değerlerin yoğun bir şekilde dağılımın sağ tarafında toplanması, merkezi eğilim ölçütleri üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Özellikle, ortalama değer, medyan ve moddan belirgin şekilde farklılaşmakta ve bu da çarpıklığın derecesini daha açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu tür bir dağılım yapısı, veri setindeki uç değerlerin analitik süreçlerde dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır. Sağ kuyruğun uzunluğu ve uç değerlerin yoğunluğu, hem dağılımın

genel karakteristiğini hem de analizlerin yorumlanma biçimini etkileyen kritik unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

Şekil 9.4, düşük rüzgar hızlarının yüksek frekansla gözlemlendiğini, yüksek rüzgar hızlarının ise nadiren meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum, uçuşların büyük çoğunluğunun düşük rüzgar etkisi altında gerçekleştiğini ve rüzgarın yakıt tüketimi üzerindeki etkisinin genellikle minimal olduğunu göstermektedir. Ancak, nadir görülen yüksek rüzgar hızları, yakıt tüketiminde belirli uç değerler yaratabilmektedir. Şekil 9.4’de uçuşların büyük çoğunluğunun düşük rüzgar hızları altında gerçekleştiğini gösterdiği için, genel yakıt tüketiminin öngörülebilir ve istikrarlı olduğunu söylemek mümkündür. Düşük rüzgar hızları, uçuş planlamasında büyük dalgalanmalara neden olmazken, nadiren meydana gelen yüksek rüzgar hızları bazı uçuşlarda yakıt tüketimini artırabilir veya azaltabilir. Bu nedenle, uçuş operasyonlarında yakıt verimliliği açısından rüzgarın etkisi çoğunlukla düşük seviyede kalırken, az sayıdaki yüksek rüzgar koşulu operasyonel planlamada dikkate alınmalıdır.

Sonuç olarak, çok sağ çarpık bir yapıya sahip olan ve uç değerlerin belirgin bir şekilde yoğunlaştığı bu dağılım, normallik varsayımına uygunluk göstermemektedir. Bu tür bir dağılım yapısı, veri setinin analizinde standart yöntemlerden ziyade, uç değerlerin ve çarpıklığın etkilerini dikkate alabilecek alternatif istatistiksel yaklaşımların tercih edilmesini gerektirmektedir. Bu durum, elde edilen sonuçların daha doğru bir şekilde yorumlanabilmesi ve analizlerin güvenilirliğinin artırılması açısından önem taşımaktadır. Sağ çarpıklığın ve uç değer yoğunluğunun bu denli belirgin olduğu bir dağılımda, geleneksel normallik varsayımlarına dayalı yöntemlerin sınırlı bir kullanım alanına sahip olacağı açıktır.



Şekil 9.5. Ortalama hız dağılım grafiği

Şekil 9.5’deki dağılım grafiğinde bulunan frekans, belirli bir hız aralığında gerçekleşen uçuş sayısını, değerler ise ortalama hız değişkeninin dağılımını ifade etmektedir. Normal dağılıma yakın bir yapı sergilemesi, uçuşların büyük çoğunluğunun belirli bir hız aralığında gerçekleştirildiğini ve operasyonel hız değişkenliğinin düşük olduğunu göstermektedir. Ortalama

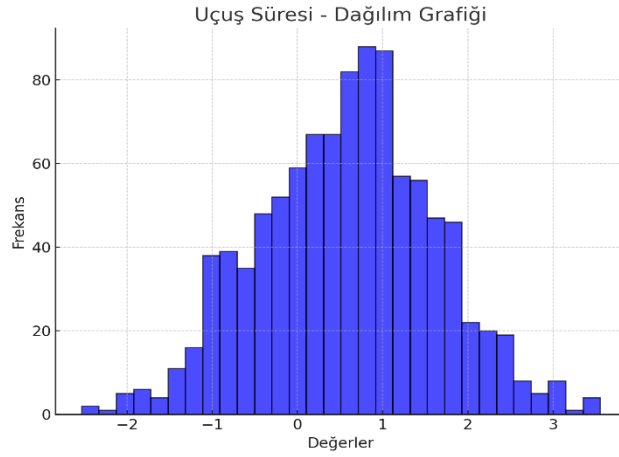
hız dağılım grafiğinin incelenmesi sonucunda, genel olarak simetrik ve çan şeklinde bir yapı sergilediği, ancak küçük bir sağ çarpıklık barındırdığı tespit edilmiştir. Bu durum, veri setindeki değerlerin büyük bir kısmının merkezi eğilim etrafında yoğunlaştığını, ancak dağılımın sağ tarafında hafif bir uzama olduğunu göstermektedir. Sağ çarpıklığın derecesinin düşük olması, bu sapmanın genel dağılım yapısı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını ve dolayısıyla verilerin büyük ölçüde normal dağılıma uygun bir trend izlediğini ortaya koymaktadır.

Normal dağılım, istatistiksel analizlerde temel bir referans noktası olarak kabul edilmektedir ve elde edilen bu bulgular, veri setinin normallik varsayımlarını büyük ölçüde karşıladığını işaret etmektedir. Küçük bir sağ çarpıklığın varlığı, dağılımın tamamen simetrik olmadığına dair bir ipucu sunmakla birlikte, bu sapma, merkezi eğilim ölçütlerinin (ortalama, medyan ve mod) birbirine yakın olmasını engelleyecek kadar büyük değildir. Bu durum, normallik varsayımı altında gerçekleştirilecek istatistiksel analizlerin geçerliliğini önemli ölçüde desteklemektedir.

Dağılımın simetrik yapısını büyük ölçüde koruyarak çan şekline yakın bir formda seyretmesi, veri setinin güvenilirliği ve analizlerde kullanılabilirliği açısından olumlu bir tablo çizmektedir. Sağ çarpıklığın küçük düzeyde kalması, uç değerlerin etkisinin sınırlı olduğunu ve dağılımın genel eğilimi üzerinde belirgin bir bozulmaya yol açmadığını göstermektedir. Bu özellik, veri setinin hem görsel hem de istatistiksel açıdan normal dağılıma yakın bir yapı sergilediğini desteklemektedir.

Şekil 9.5'deki normal dağılıma yakın hız dağılımı, uçuşların genellikle optimum yakıt verimliliği sağlayan hız aralığında gerçekleştirildiğini göstermektedir. Aşırı düşük veya yüksek hızlardan kaçınılması, yakıt tüketiminin istikrarlı kalmasını ve operasyonel planlamanın daha öngörülebilir olmasını sağlar. Bu durum, uçuşların en verimli hız rejiminde gerçekleştirildiğini ve yakıt maliyetlerinin minimize edildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, dağılımın büyük ölçüde simetrik ve çan şeklinde olması, verilerin normal dağılıma uygun bir trend izlediğini açıkça ortaya koymaktadır. Küçük bir sağ çarpıklığın varlığına rağmen, dağılımın genel özellikleri normallik varsayımlarını desteklemekte ve bu da veri setinin analitik süreçlerde kullanılabilirliğini artırmaktadır. Bu yapısı itibarıyla, dağılım, istatistiksel modelleme ve testlerde güvenilir sonuçlar elde edilmesine imkan tanımaktadır.



Şekil 9.6. Uçuş süresi dağılım grafiği

Şekil 9.6’da frekans eksenini, belirli bir uçuş süresi aralığında kaç uçuşun gerçekleştiğini, değerler eksenini ise uçuş süresi değişkeninin dağılımını göstermektedir. Normal dağılıma benzer bir yapı sergilemesi, uçuş sürelerinin büyük ölçüde öngörülebilir olduğunu ve operasyonel süre değişkenliğinin düşük seviyede kaldığını göstermektedir. dağılımın analizi sonucunda, çan şeklinde ve hafif sağ çarpık bir yapı sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, veri setinin büyük ölçüde simetrik bir yapıya sahip olduğunu, ancak sağ tarafında küçük bir uzama bulunduğunu göstermektedir. Hafif sağ çarpıklık, yüksek değerlere sahip verilerin dağılımın sağ kuyruk kısmında bir miktar yoğunlaşmasıyla ortaya çıkmakta, ancak bu sapma dağılımın genel özelliklerini bozacak derecede güçlü değildir. Bu bağlamda, dağılım, normal dağılıma uygun bir trend izlemektedir.

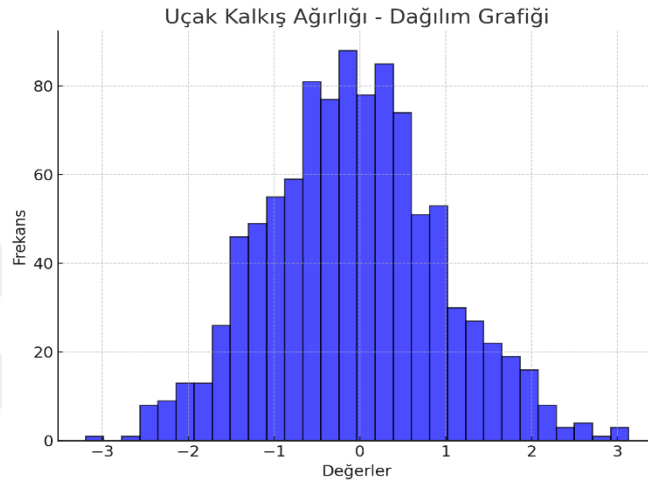
Çan şeklindeki dağılım, veri setinin merkezi eğilim ölçütlerinin (ortalama, medyan ve mod) birbirine yakın olduğunu ve verilerin büyük bir kısmının dağılımın merkezi etrafında yoğunlaştığını göstermektedir. Hafif sağ çarpıklığın varlığına rağmen, bu durum normallik varsayımlarını büyük ölçüde destekleyen bir yapı sunmaktadır. Sağ çarpıklığın derecesinin düşük olması, uç değerlerin etkisinin sınırlı kaldığını ve verilerin genel trendinin normal dağılıma paralel bir seyir izlediğini işaret etmektedir.

Bu tür bir dağılım yapısı, veri setinin analitik süreçlerde kullanımını kolaylaştıran ve normallik varsayımı altında yapılan testlerin geçerliliğini destekleyen bir özellik taşımaktadır. Çan şekli, verilerin dengeli bir şekilde dağıldığını, uç değerlerin dağılımın genel görünümüne fazla etki etmediğini ve analiz sonuçlarının güvenilirliğini artırdığını göstermektedir. Hafif sağ çarpıklığın varlığı, analizlerde dikkate alınması gereken bir faktör olmakla birlikte, dağılımın genel yapısını bozmamakta ve normallik varsayımını ihlal etmemektedir.

Şekil 9.6’da gösterilen uçuş sürelerinin normal dağılıma yakın olması, uçuşların büyük çoğunluğunun öngörülebilir sürelerde gerçekleştiğini ve operasyonel istikrarın sağlandığını göstermektedir. Bu durum, yakıt tüketiminin büyük dalgalanmalar göstermediğini ve planlamanın

daha verimli yapılabildiğini ifade etmektedir. Uçuş sürelerinde ani değişiklikler olmadığından, yakıt tüketimi optimize edilebilir ve gereksiz yakıt harcamaları minimize edilmektedir.

Sonuç olarak, çan şeklindeki dağılım ve hafif sağ çarpıklık, veri setinin büyük ölçüde normal dağılıma uygun bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu durum, veri setinin istatistiksel analizlerde kullanılabilirliğini artırmakta ve elde edilen sonuçların güvenilirliğini desteklemektedir. Küçük çaplı sağ çarpıklık, dağılımın karakteristiğine dair önemli bir ipucu sunarken, veri setinin normallik varsayımı altında güvenle değerlendirilebileceğini göstermektedir.



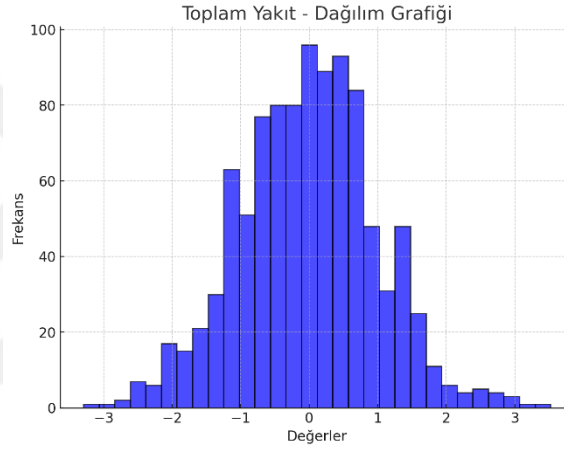
Şekil 9.7. Uçak kalkış ağırlığı dağılım grafiği

Şekil 9.7'deki frekans eksenini, belirli bir kalkış ağırlığı aralığında kaç uçuşun gerçekleştiğini, değerler ise uçakların kalkış ağırlıklarının dağılımını göstermektedir. Normal dağılım eğilimi, uçakların genellikle standart bir kalkış ağırlığı aralığında çalıştığını ve operasyonel yük planlamasının tutarlı olduğunu göstermektedir. Şekil 9.7'deki dağılımın incelenmesi sonucunda, simetrik bir yapı sergilediği ve karakteristik olarak çan şeklinde bir görünüm oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu tür bir dağılım, verilerin büyük bir kısmının merkezi bir noktada yoğunlaştığını ve uç değerlerin iki tarafta da eşit bir şekilde azaldığını göstermektedir. Simetrik yapı, dağılımın ortalama, medyan ve mod gibi merkezi eğilim ölçütlerinin birbirine çok yakın olmasını sağlamaktadır. Bu durum, dağılımın normal dağılıma uygun bir yapı sergilediğini ve bu bağlamda istatistiksel analizlerde kullanılabilir bir veri seti sunduğunu ortaya koymaktadır.

Çan şeklindeki dağılımlar, istatistiksel analizlerde normallik varsayımını destekleyen temel bir yapı olarak değerlendirilmektedir. Dağılımın simetrik olması, verilerin dengeli bir şekilde dağıldığını ve uç değerlerin genel eğilim üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını ifade eder. Bu tür bir yapı, verilerin düzenli ve tahmin edilebilir bir yapıda olduğunu, dolayısıyla normallik varsayımına dayalı analizlerin güvenle uygulanabileceğini işaret etmektedir.

Dağılımın çan şeklinde olması, verilerin belirli bir merkezi eğilim etrafında yoğunlaştığını ve dış noktaların bu yoğunluktan giderek uzaklaştığını göstermektedir. Bu durum, veri setinin hem görsel hem de istatistiksel açıdan tutarlı bir yapıya sahip olduğunu ve normallik kriterlerini büyük ölçüde karşıladığını ortaya koyar. Simetri, dağılımın dengeli bir şekilde genişlediğini ve analitik süreçlerde uç değerlerin etkisinin minimal düzeyde kalmasını sağladığını ifade etmektedir.

Sonuç olarak, simetrik ve çan şeklindeki dağılım, veri setinin normal dağılıma büyük ölçüde uygun bir yapıya sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu yapı, istatistiksel analizlerin doğruluğunu artırmakta ve normallik varsayımına dayalı yöntemlerin kullanılabilirliğini desteklemektedir. Dağılımın bu düzenli yapısı, veri setinin istatistiksel modelleme ve tahmin süreçlerinde güvenilir bir temel oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 9.8. Toplam yakıt dağılım grafiği

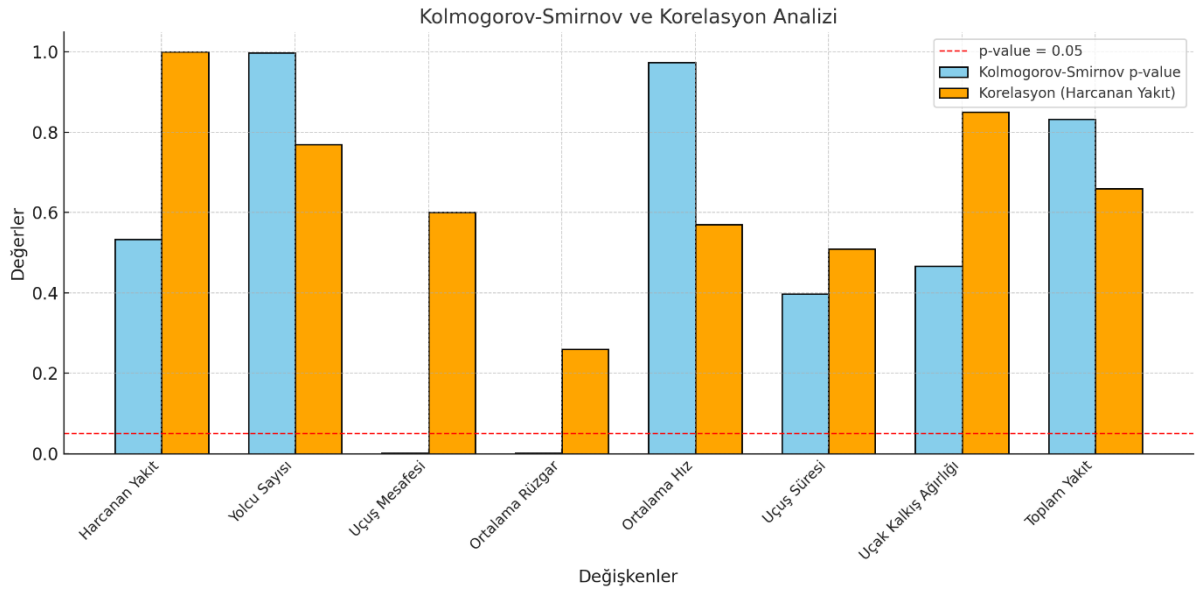
Şekil 9.8’de toplam yakıt dağılım grafiği olarak gösterilen histogramda frekans, belirli bir yakıt tüketimi aralığında gerçekleşen uçuş sayısını, değerler ise toplam yakıt tüketiminin dağılımını göstermektedir. Normal dağılıma yakın bir yapı, yakıt tüketiminin büyük ölçüde sabit bir aralıkta gerçekleştiğini ve operasyonel planlamanın öngörülebilir olduğunu ifade etmektedir. incelenmesi sonucunda, simetrik bir yapıya sahip olduğu ve çan şeklinde bir form sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, veri setinin merkezi bir eğilim etrafında yoğunlaştığını ve her iki tarafta da simetrik bir şekilde azalan değerlerle dengeli bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Simetri, ortalama, medyan ve mod gibi merkezi eğilim ölçütlerinin birbirine yakın olduğunu ve veri setinin genel karakteristiğinin düzenli bir yapı sergilediğini ifade etmektedir. Çan şekli, dağılımın yalnızca görsel değil, aynı zamanda istatistiksel açıdan da normal dağılıma uygun bir yapı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu tür bir dağılım, özellikle normallik varsayımına dayalı analizlerde kullanıma son derece elverişlidir. Normal dağılımın temel özelliklerinden biri olan simetri, verilerin homojen bir şekilde

dağıldığını ve uç değerlerin bu düzeni bozmadan iki taraflı olarak eşit şekilde azaldığını işaret eder. Böyle bir yapı, dağılımın uç değerlerden kaynaklanan herhangi bir dengesizliğe maruz kalmadığını ve dolayısıyla analiz sonuçlarının güvenilirliğini artırdığını göstermektedir.

Çan şeklindeki yapı, veri setinin büyük bir kısmının merkezi eğilim etrafında toplandığını ve dış değerlerin bu merkezi yoğunluğa kıyasla nadir olduğunu ifade eder. Bu durum, veri setinin hem görsel hem de istatistiksel açıdan normal dağılım varsayımlarını karşıladığını destekler niteliktedir. Ayrıca, bu yapı, veri setinin düzenli ve tahmin edilebilir bir yapıya sahip olduğunu ve bu nedenle ileri düzey analizler için güçlü bir temel sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, dağılımın simetrik ve çan şeklinde olması, veri setinin normal dağılıma uygun olduğunu açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu özellik, veri setinin istatistiksel analizlerde kullanılabilirliğini artırmakta ve normallik varsayımına dayalı yöntemlerin güvenle uygulanabileceğini ifade etmektedir. Dağılımın düzenli ve dengeli yapısı, analizlerin doğruluğunu destekleyen önemli bir unsurdur ve elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırmaktadır.



Şekil 9.9. Kolmogorov-Smirnov ve Korelasyon Analizi

Şekil 9.9’da Kolmogorov-Smirnov ve korelasyon analiz grafiğindeki değerler eksen, Kolmogorov-Smirnov (KS) p-değerleri ve harcanan yakıt ile değişkenler arasındaki korelasyon katsayılarını temsil etmektedir, değişkenler ise uçuş operasyonlarına ilişkin parametreleri (örneğin, yolcu sayısı, uçuş mesafesi, ortalama hız vb.) ifade etmektedir. KS testi, değişkenlerin normal dağılıma uygunluğunu belirlemek amacıyla uygulanmış olup, mavi çubuklarla gösterilen p-değerleri 0.05 eşik değerine (kırmızı kesik çizgi) göre değerlendirilerek normal dağılıma uygunlukları incelenmiştir; $p < 0.05$ olması durumunda ilgili değişkenin normal dağılmadığı kabul edilmektedir. Harcanan yakıt ile değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları ise turuncu

çubuklarla gösterilmiş olup, yüksek değerler ilgili değişkenin yakıt tüketimiyle güçlü bir ilişki içinde olduğunu göstermektedir. Bu analiz, her değişken için normal dağılıma uygunluk testi (KS testi) ve Pearson korelasyon katsayısı hesaplanarak gerçekleştirilmiş olup, uçuş operasyonlarının istatistiksel yapısını ve harcanan yakıt ile değişkenler arasındaki ilişkileri anlamak için kullanılmıştır.

Korelasyon sonuçları, özellikle yolcu sayısı, uçuş mesafesi ve kalkış ağırlığının harcanan yakıt ile yüksek ilişkiye sahip olduğunu göstermektedir; bu da operasyonel planlamada bu değişkenlerin kritik olduğunu ifade etmektedir. Kolmogorov-Smirnov testi sonuçları ise birçok değişkenin normal dağılıma uymadığını, dolayısıyla operasyonel değişkenliklerin beklenen istatistiksel modellere tam olarak oturmadığını göstermektedir. Bu durum, yakıt tüketimi tahminlerinde doğrudan doğrusal modeller yerine daha esnek ve veri odaklı yöntemlerin kullanılmasını gerektirir. Sonuç olarak, uçuş operasyonlarında yakıt verimliliğini artırmak için ağırlık optimizasyonu, uçuş süresi ve hız kontrolü gibi değişkenlerin dikkatle yönetilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Kolmogorov-Smirnov ve korelasyon analizi sonuçlarına bağlı olarak verilen Şekil 9.9’da şu sonuçlara varılabilir :

- p-değeri ≥ 0.05 olan değişkenler: Bu değişkenler için sıfır hipotezi reddedilemez; yani, verilerin normal dağılıma uygun olduğu kabul edilmektedir. Örneğin, "Harcanan Yakıt" değişkeni için p-değeri 0.533 olup, normal dağılıma uygundur.
- p-değeri < 0.05 olan değişkenler: Bu değişkenler için sıfır hipotezi reddedilir; yani, verilerin normal dağılıma uygun olmadığı kabul edilir. Örneğin, "Uçuş Mesafesi" ve "Ortalama Rüzgar" değişkenleri için p-değerleri < 0.001 olup, normal dağılıma uygun değildir.

Korelasyon analizi açısından ise şu şekilde yorumlar yapılabilir:

1. Harcanan Yakıt ile yüksek korelasyon gösteren değişkenler:

- "Yolcu Sayısı" (0.77)
- "Uçak Kalkış Ağırlığı" (0.85)

Mutlak değeri 0.5’ten yüksek olan bu korelasyonlar, "Harcanan Yakıt"ın bu değişkenlerle güçlü bir ilişkiye sahip olduğunu göstermektedir.

2. Harcanan Yakıt ile düşük korelasyon gösteren değişken:

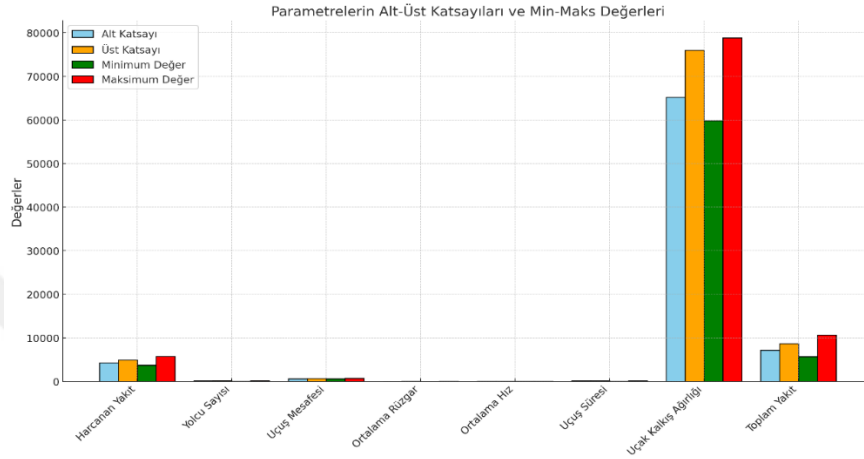
- "Ortalama Rüzgar" (0.26)

Bu düşük korelasyon, "Ortalama Rüzgar"ın "Harcanan Yakıt" üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

Normal dağılıma uygun olmayan değişkenler ("Uçuş Mesafesi" ve "Ortalama Rüzgar") için veri dönüşümleri (örneğin, logaritmik dönüşüm) uygulanarak normal dağılıma yakınlştırılmaları önerilmektedir.

"Harcanan Yakıt" ile yüksek korelasyon gösteren değişkenler, çoklu doğrusal regresyon modelinde dikkate alınmalıdır. Ancak, yüksek korelasyonlu bağımsız değişkenler arasında çoklu bağlantı (multicollinearity) sorunu olup olmadığı da incelenmelidir.

Düşük korelasyonlu değişkenlerin modele dahil edilmesi, modelin açıklayıcılığını artırmayabilir; bu nedenle, bu değişkenlerin modelde yer alıp almayacağı dikkatlice değerlendirilmelidir.



Şekil 9.10. Parametrelerin Alt-Üst Katsayıları ve Min-Maks Değerleri

Şekil 9.10'da uçuş operasyonlarında analiz edilen parametrelerin alt ve üst katsayıları (mavi ve turuncu renklerle), minimum ve maksimum değerleri (yeşil ve kırmızı renklerle) ile değişim aralıklarını göstermektedir. Özellikle uçak kalkış ağırlığı ve toplam yakıt değişkenlerinin geniş bir değer aralığında değiştiği, bu değişkenlerin operasyonel verimlilik üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Şekil 9.10, yakıt verimliliği açısından uçak kalkış ağırlığındaki büyük değişimler toplam yakıt tüketimini doğrudan etkileyerek, operasyonel planlamada ağırlık optimizasyonunun kritik bir faktör olduğunu göstermektedir.

1. Harcanan Yakıt

Alt Katsayı (4250) ve Üst Katsayı (4908): Harcanan yakıtın güvenilir sınırları bu aralıktadır. Normal operasyonel koşullarda harcanan yakıt bu değerler arasında olmalıdır.

Minimum Değer (3717) ve Maksimum Değer (5728): Harcanan yakıt, gözlemlenen değerlerde daha geniş bir aralığa sahiptir. Maksimum değer, üst katsayının üzerine çıkmaktadır.

Değişkenlik: Yakıt tüketiminde gözlemlenen değişkenlik, geniş operasyonel farklılıkların bir göstergesidir. Bu, uçak tipi, yolcu sayısı, uçuş mesafesi gibi faktörlerin etkisini yansıtabilir.

2. Yolcu Sayısı

Alt Katsayı (133.5) ve Üst Katsayı (220): Normal yolcu sayısı bu aralıktadır. Yolcu kapasitesi bu sınırları aşmamalıdır.

Minimum Değer (45) ve Maksimum Değer (220): Minimum değer, alt katsayının oldukça altında olup operasyonel uç noktalardan birini temsil etmektedir. Maksimum değer ise üst katsayı ile aynıdır.

Değişkenlik: Yolcu sayısındaki geniş değişkenlik, farklı uçuş tiplerinden (örneğin kısa mesafe veya charter uçuşları) kaynaklanabilir.

3. Uçuş Mesafesi

Alt Katsayı (580) ve Üst Katsayı (635.5): Normal uçuş mesafesi bu sınırlar içinde beklenmektedir.

Minimum Değer (571) ve Maksimum Değer (697): Gözlemlenen minimum değer alt katsayıya çok yakın, ancak maksimum değer üst katsayının dışındadır.

Değişkenlik: Uçuş mesafesinde gözlemlenen artışlar, belirli uçuş rotalarının etkisini yansıtabilir. Bu durum, uzun mesafe uçuşlarının modelleme sürecine etkisini vurgulamaktadır.

4. Ortalama Rüzgar

Alt Katsayı (7) ve Üst Katsayı (20.5): Normal operasyonel rüzgar etkisinin bu sınırlar içinde olduğu tahmin edilmektedir.

Minimum Değer (0) ve Maksimum Değer (47): Maksimum değer, üst katsayının oldukça üzerindedir ve uç noktaları temsil eder. Minimum değer ise alt katsayıdan düşüktür.

Değişkenlik: Rüzgar etkisinde görülen geniş değişkenlik, uçuşların farklı hava koşullarına maruz kaldığını göstermektedir. Özellikle yüksek maksimum değer, olumsuz meteorolojik koşullara işaret edebilir.

5. Ortalama Hız

Alt Katsayı (72) ve Üst Katsayı (73): Ortalama hız, oldukça dar bir aralıkta değişmektedir.

Minimum Değer (71) ve Maksimum Değer (74): Minimum ve maksimum değerler, belirlenen katsayılarla uyumludur.

Değişkenlik: Ortalama hızdaki dar değişkenlik, operasyonel standartların bu değişkene sıkı şekilde bağlı olduğunu göstermektedir.

6. Uçuş Süresi

Alt Katsayı (92) ve Üst Katsayı (98): Normal operasyonel uçuş süresi bu sınırlar içinde değişmektedir.

Minimum Değer (87) ve Maksimum Değer (105): Gözlemlenen uçuş süreleri bu sınırları bir miktar aşmaktadır.

Değişkenlik: Uçuş sürelerindeki değişkenlik, mesafe ve hava koşullarının etkisini yansıtabilir. Bu değişkenlik, modelde açıklayıcı bir değişken olarak değerlendirilebilir.

7. Uçak Kalkış Ağırlığı

Alt Katsayı (65159.5) ve Üst Katsayı (75999): Normal kalkış ağırlığı bu sınırlar içinde olmalıdır.

Minimum Değer (59760) ve Maksimum Değer (78820): Gözlemlenen değerlerin geniş bir aralıkta olduğu görülmektedir. Maksimum değer, üst katsayıyı aşmaktadır.

Değişkenlik: Kalkış ağırlığındaki geniş değişkenlik, farklı uçak tipleri ve operasyonel koşullardan kaynaklanmaktadır. Bu değişken, yakıt tüketimi üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir.

8. Toplam Yakıt

Alt Katsayı (7136) ve Üst Katsayı (8626): Toplam yakıt tüketiminin güvenilir sınırları bu aralıktadır.

Minimum Değer (5677) ve Maksimum Değer (10639): Gözlemlenen değerler, belirtilen katsayı sınırlarının dışına çıkmaktadır.

Değişkenlik: Toplam yakıt tüketimindeki bu değişkenlik, uçuş mesafesi, yolcu sayısı ve hava koşulları gibi faktörlerin etkisini yansıtmaktadır.

Yapılan analiz, çoklu doğrusal regresyon modeli oluşturma sürecinde bağımsız değişkenlerin güvenilir sınırlarını, değişkenliklerini ve dağılımlarını değerlendirmek açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu analiz, bağımsız değişkenlerin operasyonel aralıklarını (alt ve üst katsayılar) ve gözlemlenen uç noktalarını (minimum ve maksimum değerler) belirleyerek, modelde oluşabilecek olası sorunların önüne geçilmesini sağlamaktadır. Özellikle değişkenlik aralığının geniş olduğu durumlarda, modelin bağımlı değişken üzerindeki etkileri daha doğru bir şekilde tahmin edilebilirken, dar değişkenlik aralıklarına sahip değişkenler modele katkısı sınırlı kalabileceğinden dikkatle değerlendirilmelidir. Ayrıca, bağımsız değişkenler arasında yüksek korelasyon (çoklu doğrusallık) varsa, bu durum regresyon katsayılarının tahmin edilebilirliğini olumsuz etkileyebileceğinden, bu korelasyonun tespit edilmesi ve gerekirse değişkenlerin seçiminde optimizasyon yapılması gerekmektedir. Analiz kapsamında, bağımsız değişkenlerin dağılımlarının normal dağılıma uygunluğu Kolmogorov-Smirnov testi ile incelenmiş, hata terimlerinin bağımsızlığı ve doğrusal ilişkinin sağlanması gibi çoklu doğrusal regresyonun temel varsayımlarına uygunluğu kontrol edilmiştir. Örneğin, geniş değişkenlik aralığına sahip olan "Uçak Kalkış Ağırlığı" ve "Toplam Yakıt" gibi değişkenler modelde güçlü bir açıklayıcı potansiyele sahipken, "Ortalama Hız" gibi dar bir değişkenlik aralığına sahip değişkenlerin modele etkisi sınırlı olabilir. Uç değerlerin ve gözlemlenen sınırların modellenmesi, modelin daha doğru ve operasyonel koşullara uygun bir şekilde yapılandırılmasına katkı sağlar. Bu doğrultuda yapılan bu detaylı ön analiz, çoklu doğrusal regresyon modelinin geçerliliğini ve açıklayıcılığını artırmaya yönelik kritik bir adımdır.

Tablo 9.2. Regresyon İstatistikleri

Çoklu R	0,92
R Kare	0,86

Ayarlı R Kare	0,84
Standart hata	12,17
Gözlem	110,00

Tablo 9.2'de gösterilen regresyon analizi sonuçları, modelin bağımlı değişken üzerindeki açıklayıcılığını ve doğruluğunu değerlendirmek için kullanılmaktadır. Çoklu R (0.92), bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasında güçlü bir pozitif korelasyon olduğunu gösterirken, R^2 (0.86) modelin bağımlı değişkendeki toplam varyansın %86'sını açıkladığını ifade etmektedir; ayarlı R^2 (0.84) ise modeldeki değişken sayısı dikkate alındığında açıklayıcılığın biraz düştüğünü ancak hâlâ oldukça güçlü olduğunu gösterir. Bu modelin yüksek doğrulukla yakıt tüketimi gibi operasyonel değişkenleri tahmin edebildiği, ancak standart hata değerinin (12.17) dikkate alınarak modelin iyileştirilebileceği anlaşılmaktadır.

Tablo 9.3. Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi Modeli

	<i>Katsayılar</i>	<i>Standart Hata</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-değeri</i>	<i>Düşük %95</i>	<i>Yüksek %95</i>	<i>Düşük 95,0%</i>	<i>Yüksek 95,0%</i>
Kesişim	-243,11	12,17	4,52	0,00	- 349,77	136,45	- 349,77	136,45
UÇUŞ SEVİYESİ (X1)	-0,04	0,05	-0,76	0,45	-0,13	0,06	- 0,13	0,06
UÇUŞ MESAFESİ (X2)	-0,69	0,24	-2,88	0,00	-1,17	-0,22	-1,17	-0,22
ORTALAMA RÜZGAR (X3)	-0,18	0,14	- 1,27	0,21	- 0,45	0,10	- 0,45	0,10
ORTALAMA HIZ (X4)	-0,01	0,35	-0,02	0,98	-0,69	0,68	-0,69	0,68
UÇUŞ SÜRESİ (DAKİKA) (X5)	4,37	1,52	2,87	0,01	1,35	7,38	1,35	7,38
UÇAK KALKIŞ AĞIRLIĞI (X6)	0,01	0,00	13,23	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
TOPLAM YAKIT (X7)	-0,01	0,00	-3,02	0,00	-0,01	0,00	-0,01	-0,00

Tablo 9.3'de gösterilmiş olan regresyon analizi sonuçları değerlendirildiğinde, bağımlı değişken üzerinde etkili olduğu varsayılan faktörlerin istatistiksel anlamlılığı ve katsayılarının dikkatle incelendiği görülmektedir. Modelin sabit terimi -243,11 olarak hesaplanmış olup, p-değeri 0,00 seviyesinde anlamlıdır. Bu değer, bağımsız değişkenlerin tamamı sıfır olduğunda bağımlı değişkenin başlangıç noktasını temsil etmektedir. Modelin oluşturulmasında kullanılan

değişkenlerin katsayıları ve anlamlılık seviyeleri üzerinden yapılan analizler, operasyonel süreçlerin anlaşılmasına yönelik önemli çıkarımlar sunmaktadır.

Bağımsız değişkenlerin katsayıları incelendiğinde, uçuş mesafesi (-0,69), uçuş süresi (4,37), uçak kalkış ağırlığı (0,01) ve toplam yakıt (-0,01) değişkenlerinin bağımlı değişken üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. P-değerlerinin 0,05'in altında olması (Tablo 9.3'de), bu değişkenlerin model açısından güçlü belirleyiciler olduğunu göstermektedir. Uçuş mesafesi ve toplam yakıt değişkenlerinin katsayılarının negatif olması, bu değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde ters yönlü bir etkiye sahip olduğunu ifade etmektedir. Özellikle uçuş mesafesi arttıkça bağımlı değişkenin azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, toplam yakıt miktarının da negatif bir katsayıya sahip olması, bu değişkenin bağımlı değişkeni azaltıcı bir etkiye sahip olabileceğini düşündürmektedir.

Öte yandan, uçuş süresi ve uçak kalkış ağırlığı değişkenlerinin katsayılarının pozitif olması, bu değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisinin doğrudan artırıcı yönde olduğunu göstermektedir. Uçuş süresinin katsayısının 4,37 olması, süre arttıkça bağımlı değişkenin de yükseldiğini göstermektedir. Bu durum, uçuş süresinin operasyonel süreçlerde önemli bir faktör olduğunu ve planlamada dikkate alınması gerektiğini düşündürmektedir. Tablo 9.3'de uçak kalkış ağırlığının katsayısı ise 0,01 olarak hesaplanmış olup, p-değeri 0,00 seviyesinde anlamlı bulunmuştur. Ayrıca, uçak kalkış ağırlığı değişkeninin güven aralığının oldukça dar (0,01 - 0,01) olması, model içindeki etkisinin güçlü olduğunu ve değişkenin kesinlik düzeyinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, uçuş planlamasında ağırlık yönetiminin optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Uçuş seviyesi (-0,04), ortalama rüzgar (-0,18) ve ortalama hız (-0,01) değişkenlerine ait katsayılar ise düşük olup, bu değişkenlerin p-değerleri sırasıyla 0,45, 0,21 ve 0,98 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığını göstermektedir. Özellikle ortalama hız değişkeninin geniş bir güven aralığına sahip olması (-0,69 ila 0,68), model içindeki etkisinin belirsiz olduğunu düşündürmektedir. Ortalama rüzgar değişkeninin de istatistiksel anlamlılık göstermemesi, hava koşullarının operasyonel süreçler üzerindeki doğrudan etkisinin model kapsamında belirgin olmadığını göstermektedir.

Bu bulgular ışığında, modelde en güçlü belirleyiciler olarak uçuş süresi ve uçak kalkış ağırlığı ön plana çıkmaktadır. Bu değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkileri istatistiksel olarak anlamlı bulunmuş olup, operasyonel süreçlerde dikkate alınması gereken en kritik parametreler arasında yer almaktadır. Ayrıca, uçuş mesafesi ve toplam yakıt değişkenleri de model içerisinde anlamlı değişkenler arasında olup, uçuş planlamasında ve yakıt yönetimi süreçlerinde önemli girdiler olarak değerlendirilebilir. Buna karşın, uçuş seviyesi, ortalama rüzgar ve ortalama

hız değişkenlerinin bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmadığı için operasyonel süreçlerde bu parametrelerin öncelikli olarak ele alınmasının gerekliliği sorgulanabilir.

Elde edilen bulgular, havayolu operasyonlarında yakıt tüketimi, uçuş süresi optimizasyonu, kalkış ağırlığının yönetimi ve rota planlaması gibi unsurların operasyonel karar mekanizmalarında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle kalkış ağırlığının yönetilmesi, gereksiz yüklerin taşınmasının önüne geçilmesi ve uçuş sürelerinin optimize edilmesi, yakıt verimliliği açısından kritik unsurlar olarak değerlendirilmelidir. Ayrıca, yakıt miktarının negatif bir katsayıya sahip olması, gereğinden fazla yakıt yüklenmesinin operasyonel maliyetleri artırabileceğine işaret etmektedir. Bu nedenle, hava taşıtlarının yakıt yüklemeleri, uçuş süresi ve mesafe göz önüne alınarak dikkatli bir şekilde optimize edilmelidir.

Genel olarak, model sonuçları, uçuş süresi ve uçak kalkış ağırlığının operasyonel süreçlerde en güçlü belirleyiciler arasında yer aldığını, uçuş mesafesi ve toplam yakıt değişkenlerinin de dikkatle analiz edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Havayolu şirketleri, operasyonel verimliliği artırmak ve maliyetleri düşürmek adına bu değişkenler doğrultusunda uçuş planlama stratejilerini şekillendirmelidir. Özellikle yakıt tüketiminin optimizasyonu, kalkış ağırlığının etkin yönetimi ve uçuş süresinin minimize edilmesi gibi süreçler, operasyonel maliyetleri düşürerek havayolu taşımacılığında daha sürdürülebilir bir yapının oluşturulmasına katkı sağlayabilir.

Havacılık operasyonlarında yakıt tüketiminin doğru tahmin edilmesi, operasyonel verimliliği artırmak, maliyetleri optimize etmek ve çevresel etkiyi azaltmak açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, çoklu doğrusal regresyon modeli kullanılarak uçuş sırasında harcanan yakıt miktarının tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Modelde bağımsız değişkenler olarak uçuş seviyesi, uçuş mesafesi, ortalama rüzgar hızı, ortalama uçuş hızı, uçuş süresi, uçak kalkış ağırlığı ve toplam yakıt miktarı kullanılmıştır. Yakıt tüketimini tahmin etmek için oluşturulan çoklu doğrusal regresyon modeli aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır [126]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \varepsilon \quad [3]$$

Y : Harcanan yakıt (kg)

β_0 : Sabit terim

X_1 : Yolcu sayısı

X_2 : Uçuş seviyesi (feet)

X_3 : Uçuş mesafesi (deniz mili)

X_4 : Ortalama rüzgar hızı (knot)

X_5 : Ortalama uçuş hızı (knot)

X_6 : Uçuş süresi (dakika)

X_7 : Uçak kalkış ağırlığı (kg)

X_8 : Toplam yakıt (kg)

ε : Hata terimi

Regresyon katsayıları modelin eğitim sürecinde hesaplanmış olup, tahmini yakıt tüketimi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır:

$$Y = -243.11 + (0.1914 \cdot 139) + (0.0571 \cdot 340) + (-0.9521 \cdot 646) + (0.6980 \cdot 19) \\ + (-1.1291 \cdot 74) + (59.2836 \cdot 95) + (0.0467 \cdot 68095) + (0.0933 \cdot 7580)$$

Yapılan hesaplama sonucunda tahmini yakıt tüketimi 4402.38 kg olarak bulunmuştur. Gerçek yakıt tüketimi 4846 kg olarak verilmiştir. Tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki yüzde fark şu şekilde hesaplanır [127]:

$$\%Hata = \left(\frac{Gerçek\ Değer - Tahmini\ değer}{Gerçek\ Değer} \right) \cdot 100 \quad (4)$$
$$\%Hata = \left(\frac{4846 - 4402}{4846} \right) \cdot 100 = 9.15\%$$

Yüzdesel hata oranı %9.15 olarak hesaplanmıştır. Havacılık sektöründe yakıt tahmini için kabul edilebilir hata oranı genellikle %5 - %10 arasında değişmektedir. Dolayısıyla, bu model tarafından yapılan tahmin kabul edilebilir bir doğruluk seviyesine sahiptir. Ancak, tahmin doğruluğunu artırmak adına modelde bazı iyileştirmeler yapılabilir.

Özellikle;

- Daha büyük bir veri seti kullanarak modelin daha iyi geliştirilmesi sağlanabilir.
- Doğrusal olmayan regresyon yöntemleri ile daha güçlü bir model elde edilebilir.
- Yolcu sayısı yerine, uçuşun toplam kargo ve yük bilgileri de modele dahil edilerek tahmin doğruluğu artırılabilir.

Sonuç olarak, geliştirilen model havacılık operasyonlarında yakıt tüketiminin önceden tahmin edilmesine yardımcı olabilecek düzeyde bir doğruluğa sahiptir. Bu tür tahminlerin operasyonel verimlilik açısından önemli olduğu ve gelecekte daha hassas modelleme yöntemleri ile iyileştirilebileceği değerlendirilmiştir.

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu regresyon analizi sonuçları, havacılık endüstrisinde operasyonel süreçlerin optimizasyonu ve maliyetlerin azaltılması açısından çeşitli stratejik çıkarımlar sunmaktadır. Özellikle yakıt tüketimi, uçuş süresi, kalkış ağırlığı ve mesafe gibi faktörlerin operasyonel verimlilik üzerindeki etkileri daha iyi anlaşılabilir ve bu doğrultuda karar mekanizmaları geliştirilebilir.

Öncelikle, uçuş süresi ve uçak kalkış ağırlığının bağımlı değişken üzerinde anlamlı ve pozitif bir etkiye sahip olması, operasyonel açıdan uçak yükleme stratejilerinin ve uçuş planlamalarının dikkatli bir şekilde yönetilmesi gerektiğini göstermektedir. Uçak kalkış ağırlığının artışı bağımlı değişkeni doğrudan etkilediği için, yük planlaması ve yakıt miktarının optimizasyonu ile kalkış ağırlığının gereksiz yere artırılmasının önüne geçilebilir. Özellikle kargo ve yolcu uçuşlarında, yük dağılımının daha verimli hale getirilmesi ve gereksiz ağırlık taşımının önlenmesi, yakıt tüketimini optimize edebilir ve işletme maliyetlerini düşürebilir.

Uçuş mesafesinin negatif katsayısı, uzun mesafeli uçuşların bağımlı değişken açısından daha avantajlı olabileceğine işaret etmektedir. Bu durum, özellikle aktarmalı uçuşlar ile doğrudan uçuşların maliyet-etkinliği açısından karşılaştırılmasını gerektirebilir. Daha uzun mesafeli uçuşlarda, belirli operasyonel verimlilik faktörlerinin devreye girmesiyle birlikte toplam yakıt tüketimi ve operasyonel maliyetler daha kontrollü hale getirilebilir. Bu bağlamda, havayolu şirketleri rotalarını optimize ederek, gereksiz iniş-kalkışlardan kaçınabilir ve doğrudan uçuşları artırarak operasyonel verimliliği yükseltebilir.

Toplam yakıt miktarının negatif katsayıya sahip olması, havacılık endüstrisinde yakıt tüketiminin kritik bir maliyet faktörü olduğunu vurgulamaktadır. Özellikle, gereksiz fazla yakıt yüklenmesi durumunda, bu fazla ağırlığın uçak performansına olumsuz etkileri olabileceği görülmektedir. Operasyonel planlamada, uçuş mesafesi ve hava durumu gibi değişkenler dikkate alınarak en uygun yakıt yüklemesinin yapılması, yakıt tasarrufu sağlarken gereksiz ağırlık taşınmasının da önüne geçebilir.

Öte yandan, uçuş seviyesi, ortalama rüzgar ve ortalama hız değişkenlerinin istatistiksel olarak anlamlı bir etki göstermemesi, bu değişkenlerin operasyonel süreçlerde öncelikli karar değişkenleri olarak ele alınmasının gerekliliğini sorgulamaktadır. Ancak bu sonuçlar, belirli uçuş operasyonlarında hava trafik yönetimi ve uçuş rotaları açısından esneklik sağlanabileceğini düşündürmektedir. Özellikle ortalama rüzgar etkisinin belirgin bir sonuç vermemesi, hava koşullarının operasyonel kararlar üzerindeki etkisinin değişkenlik gösterebileceğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak, bu analiz sonuçları havayolu operasyonlarında yakıt yönetimi, uçuş süresi optimizasyonu, kalkış ağırlığının kontrolü ve rota planlaması gibi kritik süreçlerde veri odaklı

kararlar alınmasına yardımcı olabilir. Havayolu şirketleri, operasyonel verimliliği artırmak ve maliyetleri düşürmek adına bu değişkenler doğrultusunda uçuş planlama stratejilerini şekillendirebilir. Bu çalışma, havacılık sektöründe sürdürülebilirlik odaklı yakıt politikalarının geliştirilmesine yönelik önemli ipuçları sunmaktadır. Regresyon analizinden elde edilen bulgular, yakıt tüketimi üzerinde etkili olan operasyonel faktörlerin daha iyi anlaşılmasını sağlayarak, uçuş planlaması ve rota optimizasyonu gibi alanlarda karar alma süreçlerini desteklemektedir. Örneğin, uçuş mesafesi, yolcu sayısı ve toplam yakıt gibi değişkenlerin yakıt tüketimi üzerindeki etkilerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesi, havayolu şirketlerinin daha verimli yakıt kullanım politikaları geliştirmesine olanak tanıyabilir. Bunun yanı sıra, ortalama rüzgar ve kalkış ağırlığı gibi değişkenlerin gelecekteki analizlerde dikkate alınması, operasyonel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada ek faydalar sağlayabilir.

Elde edilen sonuçlar, sadece operasyonel süreçlerde değil, aynı zamanda uçak tasarımı ve mühendislik uygulamalarında da yakıt verimliliğini artırmaya yönelik yenilikçi çözümlerin geliştirilmesine rehberlik edebilir. Yakıt verimliliğini artıran teknolojik yenilikler, yalnızca operasyonel maliyetlerin düşürülmesini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda karbon emisyonlarının azaltılması yoluyla çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunabilir. Özellikle havacılık endüstrisinin karşı karşıya olduğu küresel çevre sorunları göz önüne alındığında, bu tür çalışmalar, endüstrinin karbon ayak izini azaltma hedeflerine ulaşmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Sonuç olarak, bu analiz, havacılık sektöründe yakıt verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından operasyonel kararların bilimsel temellere dayandırılmasının önemini vurgulamaktadır. Regresyon analizi, mevcut operasyonel parametrelerin yakıt tüketimi üzerindeki etkilerini anlamak için etkili bir yöntem sunmuş ve gelecekte yapılacak sürdürülebilir havacılık çalışmalarına ışık tutabilecek değerli bilgiler sağlamıştır. Daha geniş veri setleriyle yapılacak ileri düzey analizler ve alternatif istatistiksel modelleme yöntemleri, hem operasyonel hem de çevresel hedeflerin optimize edilmesinde kritik bir araç olarak kullanılabilir. Bu kapsamda, havacılık endüstrisinin karbon ayak izini azaltma çabalarına yönelik bu tür bilimsel çalışmalar, sürdürülebilir bir geleceğin inşasında temel yapı taşlarından biri olmaya devam edecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Iatrou, K. (2014). 100 Years of Commercial Aviation. Hermes Air Transport Club.
- [2] N. Kongbuamai, A. Hashemizadeh, V. Cheung, D. H. Bui, "Exposing the environmental impacts of air transportation on the ecological system: empirical evidence from APEC countries," *Heliyon*, vol. 9, no. 9, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e19835.
- [3] Iata, *IATA 2015 Report on Alternative Fuels Edition 10t h*. 2016.
- [4] A. Dhara, J. Muruga Lal,(2021). "Sustainable Technology on Aircraft Design: A Review," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2021. doi: 10.1088/1755-1315/889/1/012068.
- [5] M. Kirmizi, H. Aygun, O. Turan, "Energetic and exergetic metrics of a cargo aircraft turboprop propulsion system by using regression method for dynamic flight," *Energy*, vol. 296, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.131153.
- [6] T. Efendigil ve Ö. E. Eminler, "Havacılık Sektöründe Talep Tahmininin Önemi: Yolcu Talebi Üzerine Bir Tahmin Modeli," *Journal of Yaşar University*, cilt 12, özel sayı, ss. 14-30, Ekim 2017. Erişim: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/720714>
- [7] T. Planès, S. Delbecq, V. Pommier-Budinger, and E. Bénard, "Modeling and Design Optimization of an Electric Environmental Control System for Commercial Passenger Aircraft," *Aerospace*, vol. 10, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/aerospace10030260.
- [8] H. Ercan, C. Öztürk, M. Akın, "Performance analysis of electrical environmental control and ice protection systems in a commercial transport aircraft," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 96, No. 2, Pp. 193–204, Mar. 2024, Doi: 10.1108/Aeat-01-2023-0019.
- [9] United Nations. (2019). Transforming Our World: The 2030 Agenda For Sustainable Development. <https://Sdgs.Un.Org/2030agenda>
- [10] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. (2014). Yiyecek İçecek Hizmetleri Uçak Tipleri Ve Özellikleri. T.C. Milli Eğitim Bakanlığı.
- [11] Airbus. (2024). Orders And Deliveries Since The Creation Of Airbus.
- [12] Airbus. (2005). A321 Aircraft Characteristics Airport And Maintenance Planning Ac.
- [13] Önüt, A. E. (2016). Uçaklarda Bulunan Kabin İçi Mutfak Ekipmanlarının Sonlu Elemanlar Ve Test Yöntemi İle Sertifikasyonu [İstanbul Teknik Üniversitesi]. <http://hdl.handle.net/11527/16012>.
- [14] Turkish Airlines, "Airbus A321-200," Turkish Airlines Resmi Web Sitesi, 2024. [Çevrimiçi]. Kullanılabilir: <https://www.turkishairlines.com/tr-int/ucak-bileti/ucus-deneyimi/filo/airbus-a321-200/>. [Erişim tarihi: 15 Mart, 2025].
- [15] E. Şahin, C. Eldem, "Bir Uçağın Burun İniş Takımı Parçasının Yapısal Analizi ve Malzeme Seçimi," *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, Aug. 2024, doi: 10.34186/klujes.1500492.
- [16] M. Maria, "Innovations, technology and efficiency shaping the aerospace environment," *Incas Bulletin*, Vol. 5, No. 2, Pp. 91–99, Jun. 2013, Doi: 10.13111/2066-8201.2013.5.2.9.

- [17] Bulat, E. "Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Enerji Sistemleri Tasarımı 2 Uçak Kanadı Malzemeleri, Tasarımı, Analizi," 2012.
- [18] S. Jang, Y. Lee, K. Kim, J. L. Yoo, K. E. Yoo, "Verification of Winglet Effect and Economic Analysis Using Actual Flight of A321 Sharklet Model," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 49, no. 4, pp. 273–279, Apr. 2021, doi: 10.5139/JKSAS.2021.49.4.273.
- [19] "Atsushi, S., Mitsuo, I., Tetsuji, F. (2014). Development of PW1100G-JM Turbofan Engine. 47(1).""2. Current Status of Titanium Applications for Air-craft 2.1 Titanium for airframes Starting with fabric."
- [20] P. Traverse, I. Lacaze, J. S. Airbus, "Template for the Preparation of Papers for On-Line Publishing in ODE," in 25th International Congress of the Aeronautical Sciences, Toulouse, 2006.
- [21] CFM International. (2023). LEAP Engine Technology Overview. Retrieved from www.cfmaeroengines.com.
- [22] R. Zamponi, A. Rubio Carpio, F. Avallone, D. Ragni, "Noise source analysis of porous fairings in a scaled landing gear model," *Aerosp Sci Technol*, vol. 158, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.ast.2024.109885.
- [23] M. Neumaier, S. Kranemann, B. Kazmeier, S. Rudolph, "Automated Piping in an Airbus A320 Landing Gear Bay Using Graph-Based Design Languages," *Aerospace*, vol. 9, no. 3, Mar. 2022, doi: 10.3390/aerospace9030140.
- [24] K. A. Valeriy, B. N. Nikolay, M. V. Vislov, I. P. V. Vlasov, N. Kozlov, D. M. Korolkov, O. N. Maynskov, V. N. Maynskov, Conceptual Aircraft Design, I. Sadrehaghighi, Ed. CFD Open Series, 2.55 ed., 2001."
- [25] A. S. J. van Heerden, M. D. Guenov, A. Molina-Cristóbal, "Evolvability and design reuse in civil jet transport aircraft," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 108, pp. 121–155, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.PAEROSCI.2019.01.006.
- [26] F. Öztürk, S. Kılıç, İ. Kacar, "Havacılık Endüstrisinde Yeni Trend: Al-Li Alaşımları," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 2018, no. 2018, Apr. 2018, doi: 10.17341/gazimmfd.416490.
- [27] C. Polayya, C. S. P. Rao, G. B. Veeresh Kumar, "Improving the properties of aluminum-lithium composites in aerospace applications: review," Jun. 01, 2024, *Institute of Physics*. doi: 10.1088/2631-8695/ad3a37.
- [28] A. Kalaiyarsan, P. Ramesh, P. Paramasivam, "Study of Advanced Composite Materials in Aerospace Application," *International Journal of Scientific Research in Mechanical and Materials Engineering* © 2018 IJSRMME, vol. 2, 2018, [Online]. Available: www.ijsrmme.com
- [29] J. Lee, J. Mo, "Analysis of technological innovation and environmental performance improvement in aviation sector," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 8, no. 9, pp. 3777–3795, 2011, doi: 10.3390/ijerph8093777.
- [30] J. J. Lee, S. P. Lukachko, I. A. Waitz, and A. Schafer, "Historical and future trends in aircraft performance, cost, and emissions," *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 26, pp. 167–200, 2001, doi: 10.1146/annurev.energy.26.1.167.

- [31] S. Al-Nuaimi, A. A. A. Banawi, S. G. Al-Ghamdi, "Environmental and economic life cycle analysis of primary construction materials sourcing under geopolitical uncertainties: A case study of Qatar," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 21, Nov. 2019, doi: 10.3390/su11216000.
- [32] Y. Köse, C. Aktan, "Uçak Etkinliğinin Operasyonel ve Finansal Metrikler Açısından Analitik Olarak İncelenmesi," *InTraders International Trade Academic Journal*, Dec. 2022, doi: 10.55065/intraders.1198846.
- [33] "IATA. (2022). IATA Fuel Efficiency Program."
- [34] M. Keselova, L. Socha, P. Hanak, and P. Svab, "Carbon offset - The new trend in aviation," in *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, International Multidisciplinary Scientific Geoconference, 2020, pp. 329–334. doi: 10.5593/sgem2020/4.1/s19.041.
- [35] V. Singh and S. K. Sharma, "Fuel consumption optimization in air transport: a review, classification, critique, simple meta-analysis, and future research implications," *European Transport Research Review*, vol. 7, no. 2, Jun. 2015, doi: 10.1007/s12544-015-0160-x.
- [36] V. Kraev, D. Masich, and K. Alexeev, "Economic Efficiency Of Promising Aviation Fuel," *Moscow Economic Journal*, pp. 99–110, Oct. 2024, doi: 10.55186/2413046X_2024_9_9_374.
- [37] N. Yang, "Advancements in Jet Engine Technologies and Sustainable Aviation Fuels: Pathways to Enhanced Efficiency and Environmental Responsibility," 2024.
- [38] T.-M. Diaconu, "Integration and Design of Cryogenic Hydrogen Fuel Systems for Sustainable Commercial Aviation," *Incas Bulletin*, vol. 16, no. 4, pp. 11–27, Dec. 2024, doi: 10.13111/2066-8201.2024.16.4.2.
- [39] Karbonsan Basınçlı Kaplar San. Ve Tic. A.Ş., "Kriyojenik Tanklar", [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.karbonsan.com.tr/cryogenic-tanks-s20.html?lang=tr>.
- [40] I. Sinan, A. Y. Doç, O. Uzol, and M. Karaca, "Bio Yakıtla Çalışan Küçük Gaz Türbinli Motor Dönüşümü ve Performans Karşılaştırması Proje No: 106M180."
- [41] N. Yılmaz and A. Atmanlı, "Havacılıkta Alternatif Yakıt Kullanılmasının İncelenmesi," *Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi*, vol. 1, no. 1, pp. 3–10, Mar. 2016, doi: 10.23890/suhad.2016.0103.
- [42] A. Horuz, A. Korkmaz, G. Akınoğlu Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Z. Fakültesi, and T. Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, "Biyoyakıt Bitkileri ve Teknolojisi," 2015.
- [43] A. Arias, C. E. Nika, V. Vasilaki, G. Feijoo, M. T. Moreira, and E. Katsou, "Assessing the future prospects of emerging technologies for shipping and aviation biofuels: A critical review," Jun. 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2024.114427.
- [44] Pye, S. (2016). Policy Report Biofuels for Aviation: Review and analysis of options for market development (Issue University of London). www.insightenergy.org
- [45] D. Lynnette, S. Andreas, G. Carla, F. Christoph, A. Florian, & S. Marc, B. Steven. (2022). Cost and emissions pathways towards net-zero climate impacts in aviation. *Nature Climate Change*. 12. 956-962. 10.1038/s41558-022-01485-4.

- [46] B. Wang, Z. J. Ting, and M. Zhao, "Sustainable aviation fuels: Key opportunities and challenges in lowering carbon emissions for aviation industry," *Carbon Capture Science and Technology*, vol. 13, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.ccst.2024.100263.
- [47] Airbus. (2022). Airbus reveals hydrogen-powered zero-emission engine.
- [48] N. Qasem, A. Mourad, A. Abderrahmane, Z. Said, O. Taha, K. Guedri, L. Kolsi. (2024). A recent review of aviation fuels and sustainable aviation fuels. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 10.1007/s10973-024-13027-5. [49] Orhan, İ., Kapanoğlu, M., Hikmet Karakoç, T. (2012). Hedef Programlama İle Bütünleşik Uçak Rotalama Ve Bakım Çizelgeleme. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(1), 11–26.
- [50] Alizadeh, A. (2018). Optimal Aircraft Trajectory Planning Based On High-Resolution Actual Weather Data. *İstanbul Teknik Üniversitesi*.
- [51] Evler, J., Dresden, T. U., Rosenow, J., & Fricke, H. (2022). Airline Schedule Recovery at Hub Airports including Dynamic Cost Indexing and Re-Routing. *Icrat*, 2–5. <https://www.researchgate.net/publication/362068613>
- [52] E. Yılmaz, Yolcu Uçağı Motorları İçin Emisyon İndisi Geliştirilmesi ve Gerçek Uçuş Koşullarında Emisyonların Belirlenmesi, M.S. thesis, Anadolu Üniversitesi, 2016.
- [53] K. K. H. Ng, C. W. Yu, T. W. Lam, and K. K. L. Cheung, "Aviation emission, contrail length, and flight level determination for en-route flight path decision." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/352678616>
- [54] B. Parveez, M. I. Kittur, I. A. Badruddin, S. Kamangar, M. Hussien, and M. A. Umarfarooq, "Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review," Nov. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/polym14225007.
- [55] H. A. Rafi, "Impact Of Composite Materials On Aircraft Weight Reduction, Fuel Efficiency, And Performance In Commercial Aviation," *International Journal Of Mechanical Engineering*, Vol. 04, No. 01, Pp. 21–35, Dec. 2024, Doi: 10.55640/ijme-04-01-06.
- [56] *IEEE/CSAA AUS 2016 : 2016 IEEE/CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems : October 10-12, 2016, Beijing, China*. IEEE, 2016.
- [57] G. Su, X. Cheng, S. Feng, K. Liu, J. Song, J. Chen, C. Zhu, H. Lin, "Flight path optimization with optimal control method," arXiv preprint arXiv:2405.08306, Aug. 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2405.08306>
- [58] J. F. Brouckaert, F. Mirville, K. Phuah, and P. Taferner, "Clean Sky research and demonstration programmes for next-generation aircraft engines," *Aeronautical Journal*, vol. 122, no. 1254, pp. 1163–1175, Aug. 2018, doi: 10.1017/aer.2018.37.
- [59] D. J. Smith, "The sustainable and green engine (SAGE) – Aircraft engine of the future?," *International Journal of Entrepreneurship and Innovation*, vol. 17, no. 4, pp. 256–262, Nov. 2016, doi: 10.1177/1465750316672601.
- [60] SBAC, *Aviation and Environment Briefing Papers*, 2008. [Çevrimiçi]. Kullanılabilir: <http://www.flightglobal.com/assets/getAsset.aspx?ItemID=18032>. [Erişim: 23 Ocak 2008].
- [61] D. L. Huff, "Noise Reduction Technologies for Turbofan Engines," 2007. [Online]. Available: <http://www.sti.nasa.gov>

- [62] Rolls-Royce, *LEAP Assembly 1* [Çevrimiçi Görsel]. 2014. Kullanılabilir: <https://www.cfmaeroengines.com/downloads/leap-assembly-1/>. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [63] Rolls-Royce, *LEAP-1A: New Generation Engine for Single-Aisle Commercial Jets* [Çevrimiçi]. 2025. Kullanılabilir: <https://www.safran-group.com/products-services/leap-1a-new-generation-engine-single-aisle-commercial-jets>. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [64] “Rolls-Royce, *UltraFan* [Çevrimiçi]. Mayıs 2023. Kullanılabilir: <https://www.rolls-royce.com/innovation/ultrafan.aspx>. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [65] Rolls-Royce, *Investor Roadshow Presentation 2021* [Çevrimiçi]. Eylül 2021. Kullanılabilir: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/investors/investor-roadshow-presentation-2021.pdf>. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [66] Rolls-Royce, *Investor Presentation 2021* [Çevrimiçi]. Mart 2021. Kullanılabilir: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/investors/investor-presentation-2021.pdf>. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [67] “British Airways, *Annual Report and Accounts 2023* [Çevrimiçi]. Aralık 2023. Kullanılabilir: <https://www.iagroup.com/media/2h0hgqdg/british-airways-annual-report-and-accounts-2023.pdf>. [Erişim: 14 Şubat 2025].”
- [68] IRENA (2017), *Biofuels for aviation: Technology brief*, International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi.
- [69] Öztürk, O., Göktepe, H. (2024). Modern Havacılık Sektöründe Alternatif Enerji Kaynakları: Sürdürülebilirlik Hedeflerine Doğru Adımlar. *Journal of Aerospace Science and Management*, 2(1), 20–41. <https://havacilik.erciyes.edu.tr/>
- [70] United Airlines, *Corporate Responsibility Report* [Çevrimiçi]. 2022. Kullanılabilir: <https://crreport.united.com/>. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [71] Lufthansa Group, *Sustainability 2023 Fact Sheet* [Çevrimiçi]. 2023. Kullanılabilir: <https://www.lufthansagroup.com/media/downloads/en/responsibility/LH-Factsheet-Sustainability-2023.pdf>. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [72] Magnix, *The Electric Solution* [Çevrimiçi]. 2021. Kullanılabilir: <https://www.kvarken.org/wp-content/uploads/2021/02/FAIR-pdf-presentation-Magnix.pdf>. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [73] SAS Group, *SAS Secures Financing for the Future - Key Milestone in SAS' Chapter 11 Process* [Çevrimiçi]. 2023. Kullanılabilir: <https://www.sasgroup.net/newsroom/press-releases/2023/q4-2023-sas-secures-financing-for-the-future--key-milestone-in-sas-chapter-11-process/>. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [74] F. Karaosmanoglu, “Bio fuels technologies and ITU investigations”. ITU, Enerji Enstituesue Yayınevi, ss. p. 110-146, 2006.
- [75] R. Terwel, J. Kerkhoven ve F. W. Saris, “Carbon Neutral Aviation,” *Europhysics News*, cilt 50, sayı 5–6, ss. 29–32, Eylül 2019, doi: 10.1051/epn/2019503.
- [76] “World Economic Forum, *WEF 2021-2022 Yıllık Raporu* [Çevrimiçi]. 2022. Kullanılabilir: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Annual_Report_2021_22.pdf. [Erişim: 14 Şubat 2025]
- [77] L. Heracleous, J. Wirtz, “Strategy and organisation at Singapore Airlines: Achieving sustainable advantage through dual strategy,” *Energy, Transport, & the Environment: Addressing the*

- Sustainable Mobility Paradigm*, cilt 9781447127178, Springer-Verlag London Ltd, 2012, ss. 479–493. doi: 10.1007/978-1-4471-2717-8_26.
- [78] “International Airlines Group (IAG), *IAG Annual Report and Accounts 2023* [Çevrimiçi]. 2023. Kullanılabilir: <https://www.iairgroup.com/media/ssuhidf1/iag-annual-report-and-accounts-2023.pdf>. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [79] “Türk Hava Yolları, *Türk Hava Yolları 2023-2033 Stratejisi* [Çevrimiçi]. 2023. Kullanılabilir: <https://investor.turkishairlines.com/documents/sunumlar/turkhavayollari20232033stratejisiv2.pdf>. [Erişim: 14 Şubat 2025].”
- [80] V. Naveen, ““Sustainable Work Environment and Ethical System in British Airlines’ Introduction: Sustainable Work Systems & British Airways Ethical System,” 2022. [Online]. Available: www.globalscientificjournal.com
- [81] “World Economic Forum, *Green Building Principles* [Çevrimiçi]. 2021. Kullanılabilir: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Green_Building_Principles_2021.pdf. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [82] United Airlines, *Our Environmental Commitment* [Çevrimiçi]. 2025. Kullanılabilir: <https://www.united.com/en/us/fly/company/responsibility/our-environmental-commitment.html>. [Erişim: 14 Şubat 2025]
- [83] “International Renewable Energy Agency (IRENA), *Renewable Energy Highlights* [Çevrimiçi]. Temmuz 2024. Kullanılabilir: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/Renewable_energy_highlights_FINAL_July_2024.pdf. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [84] “European Central Bank (ECB), *Environmental Statement 2024* [Çevrimiçi]. 2024. Kullanılabilir: https://www.ecb.europa.eu/ecb/climate/green/pdf/ecb.environmentalstatement_202408~7f6ad8022b.en.pdf. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [85] European Sustainable Development Network (ESDN), *ESDN Report 2/2020* [Çevrimiçi]. 2020. Kullanılabilir: https://www.esdn.eu/fileadmin/ESDN_Reports/ESDN_Report_2_2020.pdf. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [86] “Singapore Airlines, *Sustainability Report 2023/24* [Çevrimiçi]. 2024. Kullanılabilir: <https://www.singaporeair.com/content/dam/sia/web-assets/pdfs/about-us/sustainability/sustainabilityreport2324.pdf>. [Erişim: 14 Şubat 2025].
- [87] “QatarEnergy, *QatarEnergy 2022 Sustainability Report* [Çevrimiçi]. 2022. Kullanılabilir: <https://www.qatarenergy.qa/en/MediaCenter/Publications/QatarEnergy%202022%20Sustainability%20Report.pdf>. [Erişim: 14 Şubat 2025]”
- [88] Kanbur, A, Ersoz, T. (2022). Bütçe Gelirlerini Etkileyen Faktörlerin Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi İle Tahmin Edilmesi Ve Risk Analizi.
- [89] “Gujarati, D. (2004). *Basic Econometrics (PDFDrive)* (Fourth Edition). The McGraw-Hill Companies.
- [90] R. Karabulut ve diğerleri, “s.1049-1070,” [Çevrimiçi]. 2018. Kullanılabilir: <https://orcid.org/0000-0003-4927-9789>. [Erişim: 14 Şubat 2025].

- [91] M. Atay, S. U. Seckiner ve Y. Eroğlu, “Critical limit assessment and optimization of airline fleet service strategy,” *Journal of the Air Transport Research Society*, cilt 4, s. 100052, Haz. 2025, doi: 10.1016/j.jatrs.2024.100052.
- [92] Türk Hava Yolları A.O., 2021 Sürdürülebilirlik Raporu, İstanbul, Türkiye, 2022. [Çevrim içi]. Erişim adresi: <https://investor.turkishairlines.com/documents/surdurulebilirlik/surdurulebilirlik-raporu-2021-tr.pdf>
- [93] S. Washington, M. M. Haque, J. Oh, and D. Lee, “Applying quantile regression for modeling equivalent property damage only crashes to identify accident blackspots,” *Accid Anal Prev*, vol. 66, pp. 136–146, 2014, doi: 10.1016/j.aap.2014.01.007.
- [94] Şenel, T., Cengiz, A., Savaş, N., & Terzi, Y. (2009). Çoklu Doğrusal Regresyonda Model Seçiminde Genelleştirilmiş Toplamsal Modellerin Kullanımı. *EÜFBED - Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(2), 217–220.
- [95] N. Shrestha, “Detecting Multicollinearity in Regression Analysis,” *Am J Appl Math Stat*, vol. 8, no. 2, pp. 39–42, Jun. 2020, doi: 10.12691/ajams-8-2-1.
- [96] T. Tony Cai and P. Hall, “Prediction in functional linear regression,” *Ann Stat*, vol. 34, no. 5, pp. 2159–2179, Oct. 2006, doi: 10.1214/009053606000000830.
- [97] J. H. Kim, “Multicollinearity and misleading statistical results,” *Korean J Anesthesiol*, vol. 72, no. 6, pp. 558–569, Dec. 2019, doi: 10.4097/kja.19087.
- [98] Freedman, D. A. (2005). What is the Error Term in a Regression Equation? *Department of Statistics UC Berkeley*.
- [99] D. N. Schreiber-Gregory Juxdapoze LLC, B. Allen Hamilton, D. Schreiber-Gregory, H. M. Jackson Foundation Karlen Bader, and H. M. Jackson Foundation, “Logistic and Linear Regression Assumptions: Violation Recognition and Control,” 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/341354759>
- [100] Gabralı, D., & Aslan, Z. (2020). Güneş Enerjisi Potansiyelinin Çoklu Lineer Regresyon ve Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture*, 4(1), 23–36.
- [101] C. Flatt and R. L. Jacobs, “Principle Assumptions of Regression Analysis: Testing, Techniques, and Statistical Reporting of Imperfect Data Sets,” *Adv Dev Hum Resour*, vol. 21, no. 4, pp. 484–502, Nov. 2019, doi: 10.1177/1523422319869915.
- [102] J. I. Daoud, “Multicollinearity and Regression Analysis,” *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Ocak 2018. doi: 10.1088/1742-6596/949/1/012009.
- [103] “N. Çelik, *Anova Modellerinde Çarpık Dağılımlar Kullanılarak Dayanıklı İstatistiksel Sonuç Çıkarımı ve Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstatistik Anabilim Dalı, 2012.
- [104] Wooldridge, J.M. (2012) *Introductory Econometrics—A Modern Approach*. 5th Edition, Cengage Learning, Boston.
- [105] “Üçkardeş, F., Aslan, E., & Küçükönder, H. (2013). A fast approach to select the appropriate test statistics. *Akademik Ziraat Dergisi*, 2(1), 55-61.”

- [106] N. Özkan, "Çalışma sermayesi yönetimi ile finansal performans arasındaki ilişki: BIST sürdürülebilirlik endeksinde yer alan firmalar üzerine bir analiz," *Pamukkale University Journal of Social Sciences Institute*, Nisan 2021. doi: 10.30794/pausbed.784575.
- [107] Karadavut, V., Yazıcı, M. E., & Karadavut, U. (2014). Tarımsal Araştırmalarda Kullanılan Çoklu Doğrusal Regresyonda Değişken Seçimi. *Science and Technique in the 21st Century*, 2(2), 65-74."
- [108] Y. Liu, G. Heuvelink, W. Jin, X. Liu, W. Li ve A. B. McBratney, "Statistical analysis of nitrogen use efficiency in Northeast China using multiple linear regression and Random Forest," *J. Integr. Agric.*, cilt 21, sayı 12, ss. 3637–3657, Aralık 2022, doi: 10.1016/j.jia.2022.08.054.
- [109] S. Koç ve G. Deniz, "Türkiye’de ekonomik büyüme ile bazı makro değişkenler arasındaki ilişki: Çoklu doğrusal regresyon modeli analizi (The Relationship Between Economic Growth And Some Macro Variables in Turkey: Multiple Linear Regression Model Analysis)," *Journal of Business Research - Turk*, cilt 11, sayı 1, ss. 101–113, Şubat 2019, doi: 10.20491/isarder.2019.585.
- [110] T. H. Abebe, "Regression Analysis: A Theoretical Approach," *Journal of Statistical and Econometric Methods*, pp. 1–40, Jan. 2024, doi: 10.47260/jsem/1311.
- [111] "Regression_Analysis_in_Medical_Research.15".
- [112] P. Anandhi ve E. Nathiya, "Application of linear regression with their advantages, disadvantages, assumption and limitations," *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*, cilt 8, sayı 6, ss. 133–137, Kasım 2023, doi: 10.22271/math.2023.v8.i6b.1463.
- [113] W. Chung, "Using the fuzzy linear regression method to benchmark the energy efficiency of commercial buildings," *Appl Energy*, vol. 95, pp. 45–49, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.01.061.
- [114] C. Reid, "Technical Appendix: The Limitations of Regression Models," 2020.
- [115] E. F. Schisterman, A. Vexler, B. W. Whitcomb, and A. Liu, "The limitations due to exposure detection limits for regression models," *Am J Epidemiol*, vol. 163, no. 4, pp. 374–383, Feb. 2006, doi: 10.1093/aje/kwj039.
- [116] S. Şahinler, "The Basic Principles of Fitting Linear Regression Model By Least Squares Method," *MKÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, vol. 5, no. 1-2, pp. 57-73, 2000. [Çevrimiçi]. Erişim:https://www.researchgate.net/profile/Suat-Sahinler/publication/305711004_The_Basic_Principles_of_Fitting_Linear_Regression_Model_By_Least_Squares_Method/links/58ac442e92851cf0e3ccd32e/The-Basic-Principles-of-Fitting-Linear-Regression-Model-By-Least-Squares-Method.pdf
- [117] S. Kilic, "Linear regression analysis," *Journal of Mood Disorders*, vol. 3, no. 2, p. 90, 2013, doi: 10.5455/jmood.20130624120840.
- [118] H. Orhan ve D. Kaşıkçı, "Path, Korelasyon ve Kısmi Regresyon Katsayılarının Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi," *Hayvansal Üretim*, cilt 43, sayı 2, ss. 68-78, 2002. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/85177>
- [119] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Çoruh Havzası Kuraklık Yönetim Planı Stratejik Çevresel Değerlendirme (SÇD) Raporu, Ankara, Türkiye: Tarım ve Orman Bakanlığı, Haziran 2024. [Çevrimiçi]. Erişim: https://webdosya.csb.gov.tr/db/scd/icerikler/coruh_nihai_scd-20240708125452.pdf

- [120] A. Türker, "Ekonometrik Araştırma ve Önemi," İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, cilt 40, sayı 1, ss. 54-62, 1990. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/176257>
- [121] D. Güven, T. Şimşek, and A. Güven, "Sağlık Yönetimi Kapsamında Sağlık Harcamalarının Ekonomik Büyüme Üzerine Etkisi: MENA Ülkeleri Üzerine Bir Panel Regresyon Analizi", *Sosyoekonomi*, vol. 26, no. 37, pp. 33–55, 2018, doi: 10.17233/sosyoekonomi.2018.03.02.
- [122] M. Li, "Moving Beyond the Linear Regression Model: Advantages of the Quantile Regression Model," *Journal of Management*, vol. XX, no. X, pp. 1-28, Oct. 2014. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://jom.sagepub.com/content/early/2014/10/06/0149206314551963.full.pdf>
- [123] A. E. Maxwell, "Limitations on the Use of the Multiple Linear Regression Model," *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, vol. 28, no. 1, pp. 51-62, 1975. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/85177>
- [124] Y. Bulut, Türkiye'de CO2 Emisyonlarının Belirleyicilerinin Ölçülmesi: Bir Araç Değişken Olarak Regresyon Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 2024. [Çevrimiçi]. Erişim: https://webdosya.csb.gov.tr/db/scd/icerikler/coruh_nihai_scd-20240708125452.pdf
- [125] N. Yıldız, "Regresyon Analizinde Kullanılan Yanlı Tahmin Edicilerin Etkinliklerinin Karşılaştırılması," *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 12, no. 2, pp. 886-892, 2019. DOI: 10.18185/erzifbed.500442. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/797546>
- [126] C. Karaca, H. Karacan, "Çoklu Regresyon Metoduyla Elektrik Tüketim Talebini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi", *sujest*, c. 4, sy. 3, ss. 182–195, 2016, doi: 10.15317/Scitech.2016320514.
- [127] Gebze Teknik Üniversitesi, "Ölçme ve Hata Hesabı", *Fizik Laboratuvarı Deney Föyleri*, Deney No: M0, Erişim: https://www.gtu.edu.tr/Files/UserFiles/90/Deney_Foyleri/M0.pdf

ÖZGEÇMİŞ