



**ALÇALMA FAZINDAKİ EN ETKİN YAKIT
AKIŞINA SAHİP UÇUŞLARIN PANEL VERİ
VE STOKASTİK SINIR ANALİZİ
YÖNTEMLERİ İLE GERÇEK UÇUŞ
VERİLERİNE DAYALI BELİRLENMESİ**

Doktora Tezi

Serkan ASLANER

ESKİŞEHİR, 2024

**ALÇALMA FAZINDAKİ EN ETKİN YAKIT AKIŞINA SAHİP UÇUŞLARIN
PANEL VERİ VE STOKASTİK SINIR ANALİZİ YÖNTEMLERİ İLE GERÇEK
UÇUŞ VERİLERİNE DAYALI BELİRLENMESİ**

Serkan ASLANER

Doktora Tezi

Hava Trafik Kontrolü Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Özlem ŞAHİN

(İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail YENİLMEZ)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Haziran 2024

Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 22DRP191 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Serkan ASLANER'in ALÇALMA FAZINDAKİ EN ETKİN YAKIT AKIŞINA SAHİP UÇUŞLARIN PANEL VERİ VE STOKASTİK SINIR ANALİZİ YÖNTEMLERİ İLE GERÇEK UÇUŞ VERİLERİNE DAYALI BELİRLENMESİ başlıklı çalışması 04/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Hava Trafik Kontrolü Anabilim dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye	: Doç. Dr. Özlem ŞAHİN	
Üye	: Prof. Dr. Yeliz MERT KANTAR	
Üye	: Prof. Dr. Enis T. TURGUT	
Üye	: Prof. Dr. C. Melih KUŞHAN	
Üye	: Prof. Dr. Çerkez AĞAYEVA	

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Doktora ğrencisi Serkan ASLANER, ALÇALMA FAZINDAKİ EN ETKİN YAKIT AKIşINA SAHİP UçUşLARIN PANEL VERİ VE STOKASTİK SINIR ANALİZİ YÖNTEMLERİ İLE GERÇEK UçUş VERİLERİNE DAYALI BELİRLENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun grlmştir.

Tez Danişmanı

Doç. Dr. Özlem şAHİN

ÖZET

ALÇALMA FAZINDAKİ EN ETKİN YAKIT AKIŞINA SAHİP UÇUŞLARIN PANEL VERİ VE STOKASTİK SINIR ANALİZİ YÖNTEMLERİ İLE GERÇEK UÇUŞ VERİLERİNE DAYALI BELİRLENMESİ

Serkan ASLANER

Hava Trafik Kontrolü Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran 2024

Danışman: Doç. Dr. Özlem ŞAHİN

(İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail YENİLMEZ)

Hava trafiğinin giderek artış göstermesi, terminal kontrol hava sahasının en iyi şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada ülkemizin hava trafik sayısı bakımından en yoğun ikinci havalimanı olan Sabiha Gökçen Havalimanı'nda uygulanan toplama noktası sistemine (PMS) dayalı standart geliş rotasını kullanan uçakların yakıt akışının teknik etkinlik analizinin yapılması amaçlanmıştır. Uçaklarda yakıt akışını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Uçuş süresi, irtifa, uçuş yol açısı (FPA), hakiki hava hızı (TAS), mesafe, motor fan hızı (N1), sıcaklık ve dikey hız (ROD) tespit edilen değişkenlerdir. Bu değişkenler dikkate alınarak yakıt akışı ile ilişkisi yüksek olan değişkenler Panel Veri Analizi ve Stokastik Sınır Analizi yöntemleriyle analiz edilmiş, sırasıyla model analizi ve teknik etkinlik analizi yapılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda, etkin ve etkin olmayan uçuşlar belirlenmiştir. Belirlenen hız aralıklarına göre etkin ve etkin olmayan uçuşların FPA ve yakıt akışları incelenmiştir. Aynı hız aralığı (231-270kt) göz önüne alındığında etkin uçuşların 2,5-3,0 FPA, etkin olmayan uçuşların ise 3,5-4,0 FPA'lar ile alçaldığı gözlenmiştir. Yüksek FPA'lar ile alçalan trafiklerin daha fazla yakıt tüketimine neden olduğu görülmüştür. Alçalmaların 2,5-3,0 FPA ile yapılması durumunda yakıt tüketimi açısından daha etkin uçuşların gerçekleştirildiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Hava trafik kontrol, Toplama noktası sistemi, Stokastik sınır analizi, Yakıt tüketimi, Teknik etkinlik, LASSO

ABSTRACT

DETERMINATION OF FLIGHTS WITH THE MOST EFFICIENT FUEL FLOW DURING DESCENT PHASE BASED ON REAL FLIGHT DATA USING PANEL DATA AND STOCHASTIC FRONTIER ANALYSIS METHODS

Serkan ASLANER

Department of Air Traffic Control

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, June 2024

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Özlem ŞAHİN

(Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. İsmail YENİLMEZ)

The increasing air traffic requires the best use of terminal control airspace. In this study, it is aimed to analyze the technical efficiency of the fuel flow of aircraft using the standard arrival route based on the collection point merge system (PMS) implemented at Sabiha Gökçen Airport, which is the second busiest airport in terms of air traffic in Türkiye. There are many factors affecting the fuel flow of airplanes. Flight time, altitude, flight path angle (FPA), true airspeed (TAS), distance, engine fan speed (N1), temperature and vertical speed (ROD) are the variables identified. Considering these variables, the variables with a high relationship with fuel flow were analyzed by Panel Data Analysis and Stochastic Frontier Analysis Methods, and model analysis and technical efficiency analysis were performed respectively.

As a result of the analyses, efficient and inefficient flights have been identified. The FPA and fuel flows of efficient and inefficient flights were examined according to the specified speed ranges. Considering the same speed range (231-270 knots), it was observed that efficient flights descended with FPAs of 2,5-3,0, while inefficient flights descended with FPAs of 3,5-4,0. It was found that traffic descending with higher FPAs led to higher fuel consumption. It was concluded that descending with FPAs of 2,5-3,0 resulted in more efficient flights in terms of fuel consumption.

Keywords: Air traffic control, Point merge system, Stochastic frontier analysis, Fuel consumption, Technical efficiency, LASSO.

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimimin yüksek lisans ve doktora aşamasında danışmanlığımı yapan, her zaman bilgi ve yardımlarını esirgemeyerek bu çalışmalardaki motivasyonumu sağlayan Sayın Doç Dr. Özlem ŞAHİN hocam'a ve doktora aşamasında ikinci danışmanlığımı yaparak yeni bir alanda bilgi sahibi olmamı sağlayarak doktora çalışmamda her konuda yardımını esirgemeyen Sayın Dr. Öğretim Üyesi İsmail YENİLMEZ hocam'a katkıları ve destekleri dolayısı ile en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Tez önerisi ve tez izleme komiteleri süresince geliştirici fikirleri ve yorumları ile tezin şekillenmesini sağlayarak yapıcı eleştirileri ile çalışmaya desteklerini sunan tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Yeliz MERT KANTAR ve Prof. Dr. Enis Turhan TURGUT hocalarıma da çok teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca her zaman bana güvenen ve yanımda olduğunu hissettirerek tüm bilgilerini benle paylaşan ablam Seval ASLANER'e,

Tüm yüksek lisans, doktora eğitim sürecimde bana inanarak destek olan Muhammed ÖZTÜRK abime ve benimle benzer süreçleri yaşayarak her zaman yanımda olan manevi kardeşlerim Emir ENÖNLÜ ve Osman Cihan SERT'e,

Eğitim hayatımın sonunda hayatıma dahil olarak bu sürecin en stresli döneminde bana desteğini her zaman hissettiren eşim Eda ASLANER'e sonsuz teşekkürler.

Bu tezi hayatımızda istediğimiz her şeyi başarabileceğimize inanarak bizi yetiştiren annem Sadet ASLANER ve babam merhum Seydi ASLANER'e ithaf ediyorum.

Serkan ASLANER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Serkan ASLANER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Optimize Edilmiş Alçalma Profilleri (OPD).....	3
1.2. Problemin Tanımlanması ve Çalışmanın Amacı.....	5
1.3. Çalışmanın Özgünlüğü	6
1.4. Çalışma Bölgesi	7
2.LİTERATÜR TARAMASI.....	11
3.MATERYAL VE YÖNTEM.....	16
3.1. Materyal.....	16
3.1.1. Veri seti.....	16
3.1.2. Veri düzenlemesi.....	17
3.2. Uygulamanın Yöntemi	21
3.2.1. LASSO (En küçük mutlak küçültme ve seçim operatörü yöntemi)	22
3.2.2. Panel veri analizi	23
3.2.1.1. Sabit etkiler modeli (SEM)	24

3.2.1.2. <i>Rassal etkiler modeli (REM)</i>	25
3.2.3. Stokastik sınır analizi	25
3.2.2.1. <i>Stokastik sınır fonksiyonu</i>	28
3.2.4. Model seçim kriterleri	35
3.2.4.1. <i>Akaike bilgi kriteri (AIC)</i>	36
4. BULGULAR	38
4.1. Panel Veri Bulguları	39
4.1.1. Rassal etkiler model bulguları	43
4.1.2. Sabit etkiler model bulguları	47
4.2. SSA Etkinlik Bulguları	50
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKÇA	65
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1. 2024 Mart ayı sonu tüm uçak trafik sayısı[25]	7
Tablo 4.1. LASSO yöntemiyle belirlenen değişkenler	38
Tablo 4.2. Değişken yayılım tablosu.....	39
Tablo 4.3. Rassal etkili model girdi değerleri	43
Tablo 4.4. Rassal etkili model etki sonuçları	44
Tablo 4.5. Rassal etkili model theta değerleri.....	44
Tablo 4.6. Rassal etkili model artıkları sonuçları	45
Tablo 4.7. R^2 , düzeltilmiş R^2 ve Ki-kare test sonuçları	45
Tablo 4.8. Rassal etkili model katsayıları	46
Tablo 4.9. Sabit etkili model girdi değerleri	47
Tablo 4.10. Sabit etkili model artıkları sonuçları.....	48
Tablo 4.11. R^2 , düzeltilmiş R^2 ve F-testi sonuçları	48
Tablo 4.12. Sabit etki model model katsayıları.....	49
Tablo 4.13. AIC değerleri	50
Tablo 4.14. Teknik etkinlik skorları.....	52
Tablo 4.15. Yakıt akışı-TAS-FPA ilişkisi.....	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Son on yıllık Türkiye geneli havalimanları trafik sayısı (2013-2022)	8
Şekil 1.2. SAW RNAV GNSS RWY 06 doğu gelişleri için STAR Chart'ı (DHMİ, 2023)	9
Şekil 1.3. SAW RNAV GNSS RWY 06 batı gelişleri için STAR Chart'ı (DHMİ, 2023)	9
Şekil 3.1. LASSO yöntemiyle seçilen değişkenlerin korelasyon matrisi	20
Şekil 3.2. Modellemeye dahil edilen değişkenlerin korelasyon matrisi	21
Şekil 3.3. $\beta=0$ olan basit doğrusal regresyon eğrisi [86]	26
Şekil 3.4. SSA için üretim sınırı [86]	27
Şekil 4.1. Yakıt akışı histogramı	40
Şekil 4.2. Yakıt akışı-uçuş süresi nokta grafiği	40
Şekil 4.3. Yakıt akışı-TAS nokta grafiği	41
Şekil 4.4. Yakıt akışı- N1 nokta grafiği	42
Şekil 4.5. Yakıt akışı-mesafe nokta grafiği	43
Şekil 4.6. İrtifa-TAS-FPA ilişkisi	53
Şekil 4.7. Teknik etkinlik skoruna göre seçilmiş uçuşlar için İrtifa-TAS-FPA ilişkisi	54
Şekil 4.8. Yakıt akışı-TAS-FPA ilişkisi	55
Şekil 4.9. Yakıt akışı-irtifa-FPA ilişkisi	56
Şekil 4.10. 3000-18.000 feet aralığında yakıt akışı-FPA-irtifa ilişkisi	57
Şekil 4.11. 18.000-24.000 feet aralığında yakıt akışı-FPA-irtifa ilişkisi	58
Şekil 4.12 Etkin (uçuş 24,9,27,42,17) uçuşların irtifaya bağlı yakıt akışı-FPA ilişkisi	59
Şekil 4.13. Etkin olmayan (20,5,12,13,29) uçuşların irtifaya bağlı yakıt akışı-FPA ilişkisi	59
Şekil 4.14. İrtifa-N1-FPA ilişkisi	60
Şekil 4.15. Etkin uçuşların FPA'ya bağlı yakıt akışı-TAS ilişkisi	61
Şekil 4.16. Etkin olmayan uçuşların FPA'ya bağlı yakıt akışı-TAS ilişkisi	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AB	:	European Union (Avrupa Birliği)
ADS-B	:	Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (Otomatik Bağımlı Gözetim Yayını)
AIC	:	Akaike Information Criteria (Akaike Bilgi Kriteri)
AIP	:	Aeronautical Information Publication (Havacılık Bilgi Yayını)
ATM	:	Air Traffic Management (Hava Trafik Yönetimi)
ATFM	:	Air Traffic Flow Management (Hava Trafik Akış Yönetimi)
BADA	:	Base of Aircraft Data (Uçak Veri Tabanı)
CDO	:	Continuous Descent Operations (Devamlı Alçalma Operasyonları)
CO ₂	:	Carbon dioxide (Karbondioksit)
C-D	:	Cobb-Douglas
CORSIA	:	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (Uluslararası Havacılığa yönelik Karbon Denkleştirme ve Azaltma Şeması)
CRS	:	Constant Returns to Scale (Ölçeğe Sabit Geri Dönüşler)

DDA	:	Delayed Deceleration Approach (Geciktirilmiş Yaklaşma Hızları)
DHMI	:	Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü
EDA	:	Exploratory Data Analysis (Keşifsel Veri Analizi)
EKK	:	Ordinary Least Squares (Sıradan En Küçük Kareler)
EUROCONTROL	:	European Organisation for the Safety of Air Navigation (Avrupa Hava Seyrüsefer Emniyeti Teşkilatı)
FA	:	Final Approach (Son Yaklaşma)
FAF	:	Final Approach Fix (Son Yaklaşma Fiksi)
FDR	:	Flight Data Recorder (Uçuş Veri Kaydedicisi)
FF	:	Fuel Flow (Yakıt Akışı)
FMS	:	Flight Management System (Uçuş Yönetim Sistemi)
FPA	:	Flight Path Angle (Yol Uçuş Açısı)
GNSS	:	Global Navigation Satellite Systems (Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemi)

IQR	:	Çeyrekler Açıklık (Inter Quartile Range)
LASSO	:	Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (En Küçük Mutlak Küçültme ve Seçim Operatörü Yöntemi)
MLE	:	Maximum Likelihood Estimation (En Çok Olabilirlik Tahmini)
OPD	:	Optimized Procedure Design (Optimize Edilmiş Alçalma Profilleri)
REM	:	Random Effect Model (Rassal Etkiler Modeli)
RNAV	:	Area Navigation (Saha Seyrüsefer)
RWY	:	Runway (Pist)
SAW	:	Sabiha Gökçen Havalimanı
SEM	:	Fixed Effect Model (Sabit Etkiler Modeli)
SSA	:	Stochastic Frontier Analysis (Stokastik Sınır Analizi)
STAR	:	Standard Instrument Arrival Route (Standart Aletli Geliş Rotası)
TA	:	Tailored Arrival (Kısaltılmış Gelişler)

TAS	:	True Air Speed (Hakiki Hava Hızı)
TEM	:	Total Energy Model (Toplam Enerji Modeli)
TMA	:	Terminal Control Area (Terminal Kontrol Sahası)
PMS	:	Point Merge System (Toplama Noktası Sistemi)

1. GİRİŞ

Dünya genelinde yolcu ve trafik hacmindeki sürekli artış petrol krizleri, savaşlar, terör saldırıları ve salgın hastalıklar gibi küresel krizler nedeniyle duraklamış ya da azalmıştır [1]. 2020 yılında COVID-19 salgını nedeniyle dünya genelinde uçuş sayısında önemli bir düşüş yaşanmıştır. COVID-19 salgını bağlamında Eurocontrol, Avrupa'daki hava trafik durumunun gelişimini kapsamlı değerlendirmelerle düzenli olarak yayınlamaktadır. Yayımlanan rapora göre pandeminin yoğun olarak yaşandığı dönemde dahi İstanbul terminal kontrol sahası (TMA) içerisinde yer alan İGA İstanbul Havalimanı günlük 466 trafik ile Avrupa hava sahasının en yoğun havalimanı olurken, Sabiha Gökçen Havalimanı 296 trafik ile Avrupa hava sahasının en yoğun 6. havalimanı olmuştur [2].

Eurocontrol tarafından yayınlanan istatistik raporuna göre 2030 yılı için tahmin edilen uçuş trafiği sayısı, 2007 yılındaki trafik sayısının 1,7 ila 2,9 katı olacağı yönündedir [3]. Airbus'ın istatistiksel çalışmasına göre ise hava taşımacılığına olan talep 2023 ve 2025 yılları arasında dünyanın birçok bölgesinde 2019 seviyelerine ulaşacaktır [4]. Son durumda Eurocontrol tarafından 2023 yılı Eylül ayındaki uçuşlar incelendiğinde, Türkiye; 2019 Eylül ayındaki uçuş sayısını %6 oranında artırarak, uçuş yoğunluğu açısından dünyanın en yoğun 10 ülkesi arasında 6. sırada yer almıştır [5].

Hava trafik yoğunluğunun artması ile yakıt tüketimi, dolayısıyla çevresel etkilerde (emisyon, gürültü) artış göstermektedir. Yakıt tüketimini ve beraberinde getirdiği çevresel etkileri minimize etmek için terminal kontrol sahasında kullanılan mevcut geliş/kalkış prosedürlerinin analizi ve bu prosedürlerde uygulanabilir değişiklikler yapılmasına dair çalışmaların önemi de giderek artmaktadır.

Yakıt tüketimini en aza indirebilecek uçuş operasyonları, havacılığın çevre üzerindeki etkisini de azaltmaya yönelik küresel girişimlerin önemli unsurlarındandır [6]. Uçuş prosedürlerini iyileştirmenin anahtarlarından biri, yoğun ve karmaşık trafik koşulları altında etkin uçuş prosedürlerinin tasarlanması ya da mevcut prosedürlerin en iyi şekilde uygulanmasıdır. Hava trafiğinin emniyetli, hızlı akışının sağlanması için verilen hava trafik kontrol talimatları, bazı durumlarda etkin uçuş prosedürlerinin uygulanmasını engelleyebilmektedir.

Ülkemizde hava trafik talebinde artış olması beklenen havalimanlarından biri olan Sabiha Gökçen Havalimanı (SAW) için, mevcut durumda uygulanan uçuş prosedürlerinin daha etkin hale getirilebilmesi için yapılacak çalışmaların önemi de bu sebeplerle artmaktadır. Hava trafik yönetiminin (ATM) geliştirilmesi, uçuş rotalarının daha

öngörülebilir hale getirilmesinde ve terminal kontrol sahası içerisindeki geliş prosedürlerinin verimsizliğinin azaltılması da önemli bir rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, çalışma bölgesi olarak seçilen Sabiha Gökçen Havalimanı'nda uygulanan geliş prosedürünün (Toplama noktası sistemi-PMS), uçuş süresi, irtifa, yol uçuş açısı (FPA), yer hızı, hakiki hava hızı (TAS), düzeltilmiş hava hızı, mesafe, toplam yakıt miktarı, 1 numaralı motor dönüş hızı (N1), rüzgâr hızı, sıcaklık, dikey hız (ROD) değişkenlerine bağlı olarak yakıt tüketiminin Stokastik Sınır Analizi (SSA) yöntemiyle teknik etkinliğinin analiz edilmesi amaçlanmaktadır. Analizlerde uçuş veri kaydedicisinden (FDR) alınan gerçek uçuş verileri kullanılmıştır.

SSA yönteminin havayolu işletmelerinin performansının ölçülmesi, havalimanı verimliliği değerlendirilmesi, performans ve enerji verimliliği gibi çalışmalarda kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışma, SSA yönteminin kaynak taramasında yer almayan hava trafik kontrol geliş prosedürünün teknik etkinlik analizinin yapılması açısından farklılık göstermektedir. Bu bağlamda, mevcut uçakların tasarımlarında değişiklik yapmadan, kullanılan geliş prosedürlerindeki hız ve seviye gibi kısıtlamaların iyileştirilmesi, yakıt tüketim etkinliğini artırabilir. Ayrıca, prosedürün geliştirilmesine yönelik öneriler, daha ekonomik ve daha hızlı uygulanabilir bir yöntem sunarak hava taşımacılığının verimliliğini artıracaktır.

Çalışma, sadece TMA içerisindeki hava trafiğini göz önüne alması nedeni ile TMA'da uygulanan optimize edilmiş alçalma profilleri (OPD) izleyen bölümde detaylı olarak açıklanmıştır.

Bölüm 2'de kaynak taraması yapılmış olup, değişken seçiminde kullanılan En küçük mutlak küçültme ve seçim operatörü yöntemi (LASSO), değişkenlerin yakıt akışı ile ilişkisini modellemek için kullanılan panel veri analizi ve uçuşların teknik etkinlik analizi için kullanılan SSA yöntemlerinin tezin konusu ile ilişki literatür taraması yapılmıştır.

Materyal ve yöntem kısmını oluşturan Bölüm 3'te, FDR'dan elde edilen gerçek uçuş verilerine dayalı veri seti detaylı olarak tanıtılmıştır. Ayrıca, veri düzenleme, panel veri analizi ve SSA yöntemi ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Son Bölümde ise, bulgular ve sonuçlara yer verilmiştir.

1.1. Optimize Edilmiş Alçalma Profilleri (OPD)

Yakıt tüketimi ve buna bağlı çevresel etkileri en aza indirmek için çok sayıda çözüm bulunmaktadır. Bu çözümlerden biri de terminal hava sahasındaki uçuş prosedürlerinin geliştirilmesidir. Geliş prosedürlerinin mevcut uçak tiplerine dayalı olarak hıza bağlı geliştirilmesi, uçağın aerodinamik yapısı ve motorları açısından yeniden tasarlanmasından daha kısa sürede uygulanabilecek bir çözümdür. Sürekli alçalmayı mümkün kılmaya yönelik yapılan geliş prosedür tasarımları, son 10 yılda birçok havalimanı için optimize edilmiş alçalma profillerinin (OPD) kullanılmaya başlanmasına yol açmıştır. Bu nedenlerle, hava sahasında devamlı alçalma operasyonları (CDO), geciktirilmiş yaklaşma hızları (DDA) ve kısaltılmış gelişler (TA) gibi OPD'ler kullanılmaktadır. OPD'ler yakıt tüketimini azaltmaya yönelik dikey profillere imkân tanırken, standart aletli geliş rotaları (STAR), hız ve irtifa kısıtlamalarını içeren rotalardır. Bu nedenle, OPD'ler bireysel uçak performanslarına, trafik durumlarına veya hava koşullarına uyarlanamaz. Bu noktada, uçakların yakıt tüketimini azaltarak varış havalimanlarına en verimli şekilde ulaşmalarını sağlamak için farklı OPD prosedürleri kullanılmaktadır. Örneğin, TA, dijital bir veri bağlantısı aracılığıyla gelişmiş hava ve yer otomasyonuna entegre ederek kısıtlı hava sahası koşullarında sürekli alçalmayı mümkün kılar [7]. CDO ise, uçuş operasyonlarının yaklaşma aşamasında dikey profillerinin optimum seyir irtifasından düşük güçlü bir motor konfigürasyonu ile pist eşik seviyesine kadar alçalmasını sağlayan bir prosedürdür. Bu sayede prosedür; yakıt tüketimi, emisyonlar ve gürültü açısından önemli faydalar sağlamaktadır. Bu noktada literatürde birçok çalışma incelenmiştir [7–14].

Inaad (2018), Schiphol Uluslararası Havaalanı'nda farklı hava trafik karması için CDO uygulamasına yönelik yaptığı otomatik bağımlı gözetim yayını (ADS-B) ve gerçek uçuş verileri kullanılmıştır. Yakıt tüketimini hesaplamak için uçak veri tabanı (BADA)'na ait toplam enerji modeli (TEM)'ni; optimum alçalma profillerini hesaplamak için optimum CDO simülasyonlarından yararlanmıştır. CDO uygulanması durumunda yakıt tüketiminde yıllık 39.000 ton ve CO₂ emisyonlarında 123.000 ton tasarruf potansiyeli hesaplamıştır [15].

CDO prosedürlerinde uçağın olabildiğince yüksek irtifada kalması istenirken, DDA prosedürlerinde, uçağın olabildiğince yüksek hızı muhafaza ederek son yaklaşma noktasına gelmesi beklenmektedir. DDA, sürüklenme ve motor itme gereksinimlerini

azaltır ve uçuşun iniş ve yaklaşma aşamalarında yakıt tüketimi ve emisyonlarda önemli azalma sağlar. Kısacası, CDO yaklaşma safhasının dikey profiline odaklanırken, DDA yaklaşma safhasının hız profiline odaklanır. Bu prosedürler, uçağın hız profilini optimize ederek, geleneksel yaklaşımlara kıyasla daha uzun süre düşük sürtünmeli aerodinamik konfigürasyonlarda kalmasını sağlar, bu da sürüklenme ve itme ihtiyacını azaltarak uçağı son yaklaşma noktasına yüksek hızda getirmeyi amaçlamaktadır [16,17]

Geliş prosedürlerinde DDA kullanılmasıyla, yakıt tüketiminin azaltılmasına yönelik yapılan çalışmaların sayısı giderek artmaktadır.

Dumond vd. (2011), DDA uygulamaları ile, flapların daha geç konfigüre edildiğı ve hızın daha uzun süre yüksek tutulduğu uçuşlarda, 10.000 feet altında %30-40 daha düşük yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonları gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu yaklaşımların Amerika Birleşik Devletleri genelindeki toplam operasyonların sadece %1'inde kullanılması durumunda, tüm operatörler için yıllık 2.9 milyon ABD galonu yakıt ve 28.000 metrik ton CO₂ emisyonu tasarrufu sağlayabileceğini tahmin etmişlerdir [17].

Şahin O. (2022), farklı yol uçuş açıları (FPA) kullanılması durumunda flap kullanım süresinin yakıt tüketimi ve özgül menzile üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla 475 adet uçuş verisi kullanmıştır. Farklı FPA'lar arasındaki en yüksek ve en düşük yakıt tüketimi karşılaştırıldığında, TAS değerinin mümkün olduğunca yüksek tutulması ve kanatçıkların olabildiğince geç açılmasının yakıt tasarrufu sağladığı belirtilmiştir. DDA ve kısa süreli flap kullanımı, yakıt tasarrufunda %65'e (101,1kg) ve %59'a (70kg) varan oranlarda azalma sağlamıştır [18].

Huynh vd. (2022), DDA prosedürlerinin, uçakların daha yüksek hızlarda ve dolayısıyla uçağın daha az sürüklemeye maruz kalmasını sağlayarak, motor gürültüsünü azalttığı ve kanatçık gürültüsünün başlangıcını geciktirdiğı gözlemlenmiştir. Yaklaşma aşamasında hızların daha geç azaltılması sayesinde ortalama 3-6 dB daha düşük gürültü seviyeleri sağlandığı bulunmuştur. Bunu, farklı uçak tipleri üzerinde yapılan analizlerle desteklenmişlerdir [19].

Pellerito V. ve Huynh J (2022), Boston Logan Uluslararası Havalimanı'nda DDA prosedürünün uygulanmasına yönelik yaptığı çalışmada, DDA'nın daha düşük itme gücü ve daha düşük yakıt tüketimine imkân tanıdığını ancak uçak filoları arasında uygulama zorlukları bulunduğunu gözlemlemiştir. Buna rağmen DDA uygulanması durumunda

herhangi bir risk oluşmamıştır. Ayrıca, DDA uygulamasının %21,4 yakıt tasarrufu sağladığı tespit edilmiştir [20].

1.2. Problemin Tanımlanması ve Çalışmanın Amacı

Hava trafiğinin yönetilmesi sırasında yaşanan gecikmeler ve hava trafik kontrolörlerinin uçaklara verdikleri talimatların yarattığı olumsuzluklar hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli sonuçlar doğurmaktadır. Bu gecikmeler, yerde ve havada gerçekleşebilirken, özellikle terminal kontrol sahasıyla kısıtlanmış geliş prosedürleri için analizler sağlayarak bu durumun oluşumunu anlamak ve önlemek, giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Ancak, havadaki gecikmeleri azaltmaya yönelik etkili stratejiler geliştirmek ve uygulamak konusunda yapılan çalışmalar geliş prosedürlerinin analizi kapsamında literatürde yetersiz kalmaktadır. Bu eksiklik, hava trafik akış yönetimindeki zorlukları ve bu alandaki iyileştirme ihtiyacını ön plana çıkarmaktadır.

Yapılan literatür çalışmaları değerlendirildiğinde hava trafik kontrol yönetiminde uçuşların hız yönetimi için mevcut geliş prosedürlerini farklı yöntemlerle analiz ederek, sonuçların geliş prosedürü için değerlendirilmesinin önemli olduğu görülmektedir. Hava trafik kontrolde hız yönetimi stratejisi (hız azaltma veya artırma) kullanarak uçakların yerde bekletilmesi yerine havada gecikmenin gerçekleştirilmesiyle birlikte kapasite-talep dengesizlikleri ile başa çıkmak için yeni stratejilerin belirlenerek mevcut uçuş prosedürlerindeki hızların da değerlendirilmesi geliş prosedürleri açısından fayda sağlayabilmektedir.

Çalışmada gerçek zamanlı uçuş verilerinin elde edilmesinde uçaklarda bulunan FDR cihazından gelen veriler kullanılmıştır. Uçakların geliş rotaları için gecikmelerin havada gerçekleştirilmesine de yardımcı olarak kullanılan Toplama Noktası Sistemi (PMS), Sabiha Gökçen Havalimanı (SAW) geliş prosedürlerinde uygulanmakta olan bir yöntemdir. Bu nedenle hem yoğunluk açısından hem de geliş prosedürü açısından bu çalışmada varış noktası SAW olarak seçilmiştir. Bu çalışmada, geliş rotaları için mevcut gerçek zamanlı uçuş verileri kullanılarak PMS'ye dayalı geliş rotasının analizi amaçlanmış olup, geliş rotası boyunca 24.000 feet irtifadan son yaklaşma fiksine (FAF) kadar (3000feet) elde edilen yakıt tüketiminin; uçuş süresi, irtifa, FPA, yer hızı, TAS, düzeltilmiş hava hızı, mesafe, toplam yakıt miktarı, N1, rüzgâr hızı, sıcaklık ve ROD değişkenlerine bağlı olarak analiz edilmiştir. Yakıt tüketiminin belirleyicilerinin seçilmesinde LASSO yöntemi kullanılmış, panel veri analizi ile model oluşturulmuş ve

değişkenlerin anlam düzeyleri belirlenmiştir. Etkin uçuşlar SSA yöntemi ile tespit edilerek, modeller AIC ile karşılaştırılmış ve etkin uçuşlar istatistiksel kriterlere göre sıralanmıştır. Çalışmada istatistiksel anlamda mümkün olan en doğru sonuçlara ulaşabilmek için yakıt tüketiminin önemli belirleyicilerinin ortaya konmasında LASSO ve uzman görüşü yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca panel veri analizi ile ilgili değişkenlerin yakıt akışı üzerindeki etkileri istatistiksel olarak belirlenmiştir.

SSA sonucuna göre mevcut geliş prosedürünü uygulayan uçaklara dair teknik etkinlik skoru ortaya konmuş ve buna göre geliş prosedürünün daha da iyileştirilmesi için değerlendirmeler sunulmuştur. Yapılan analizler sonucu elde edilen verilerin yakıt tüketimiyle ilişkisi belirlenmiş, SSA yöntemiyle teknik etkinlikleri sıralanarak, belirlenen hava sahasında yakıt tüketiminin ana değişkenleri ortaya konmuştur. Sonuçlar, görsel ve grafiklerle zenginleştirilerek literatürdeki bulgular ile tartışılmıştır. Bu süreçler, mümkün olan en doğru istatistiksel sonuçlara ulaşmayı hedeflemiştir.

1.3. Çalışmanın Özgünlüğü

Bu çalışmada, çalışma bölgesi olarak seçilmiş SAW'da uygulanan PMS göz önüne alınarak FDR'dan elde edilmiş gerçek uçuş verilerinin kullanımı ile yakıt tüketiminin; uçuş süresi, irtifa, FPA, yer hızı, TAS, düzeltilmiş hava hızı, mesafe, toplam yakıt miktarı, N1, rüzgâr hızı, sıcaklık, ROD ilişkisi panel veri analiziyle belirlenerek, uçuşların SSA yöntemi ile teknik etkinliklerinin analiz edilmesi amaçlanmıştır.

Literatür incelendiğinde, SSA yönteminin havayolu işletmelerinin performansının ölçülmesi, havalimanı verimliliği değerlendirilmesi, performans ve enerji verimliliği, filoların kümülatif yakıt tüketiminin etkinliği gibi çalışmalarda kullanıldığı görülmektedir.

Bu çalışmada, 42 farklı uçuşun FDR sisteminden elde edilen veri setindeki değişkenlerin yakıt tüketimi ile olan anlamlı ilişkilerini belirlemek için LASSO ve panel veri analizi yöntemleri kullanılmıştır. İstatistiksel yöntemlerle seçilen bu değişkenler, düzenlenen veri setinde yakıt tüketimiyle olan ilişkileri açısından değerlendirilmiştir. Bu tez, uçuş operasyonlarında yakıt tüketimini azaltmaya yönelik teknik etkinliğin artırılmasına odaklanılması gereken kritik değişkenleri ortaya çıkararak alana özgün bir katkı sağlamaktadır.

1.4. Çalışma Bölgesi

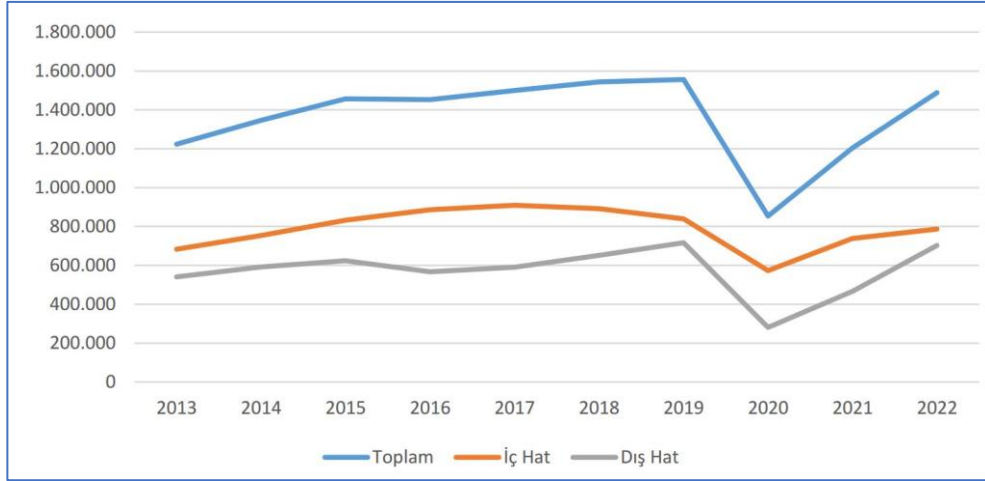
Düşük maliyetli havayolu şirketlerinin uçuş yaptığı uluslararası havalimanları değerlendirildiğinde 2017-2018 yıllar için Sabiha Gökçen Havalimanı yıllık 90.000 uçuş sayısı ile Dünya sıralamasında 4. sırada yer almaktadır [21]. Türk hava sahası içerisindeki 2024 yılı mart ayı sonu itibariyle Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü (DHMI) tarafından açıklanan tüm uçak trafik sayısı incelendiğinde SAW, Türkiye içerisinde yoğunluk açısından ikinci sırada yer almaktadır (Tablo 1.1) [22].

Tablo 1.1. 2024 Mart ayı sonu tüm uçak trafik sayısı[25]

Sıra	Havalimanı	Toplam Uçuş Sayısı
1	İstanbul	120,148
2	İstanbul Sabiha Gökçen	56,730
3	Antalya	24,919
4	Ankara Esenboğa	22,303
5	İzmir Adnan Menderes	15,176
6	Adana	11,076
7	İsparta Süleyman Demirel	5,658
8	Tekirdağ Çorlu Atatürk	5,651
9	Gaziantep	5,026
10	Balıkesir Koca Seyit	4,747

SAW, 06-24 uzantısı olmak üzere 45x3000m boyutlarında tek piste sahiptir [23]. 2022 yılında bir önceki yıla göre trafik sayısı %23,58 artış göstererek toplam uçuş trafiği pandemi öncesi 2019 yılındaki seviyenin sadece %4,36 altında kalmıştır.

Son 9 yıllık Türkiye geneli havalimanı yolcu ve uçak sayıları değerlendirildiğinde uçuşa olan talep giderek artmakta olup oluşan talebi karşılamak ve etkili hava trafik akış yönetimi (ATFM) sağlayabilmek için mevcut uçuş yolları ve prosedürlerde iyileştirmeler yapılması gerekmektedir (Şekil 1.1) [24].

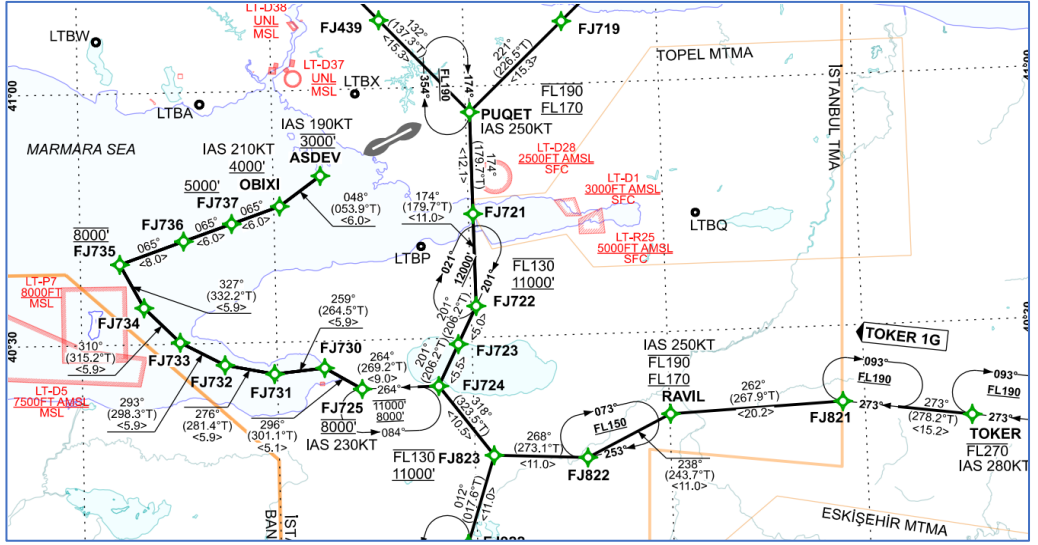


Şekil 1.1. Son on yıllık Türkiye geneli havalimanları trafik sayısı (2013-2022)

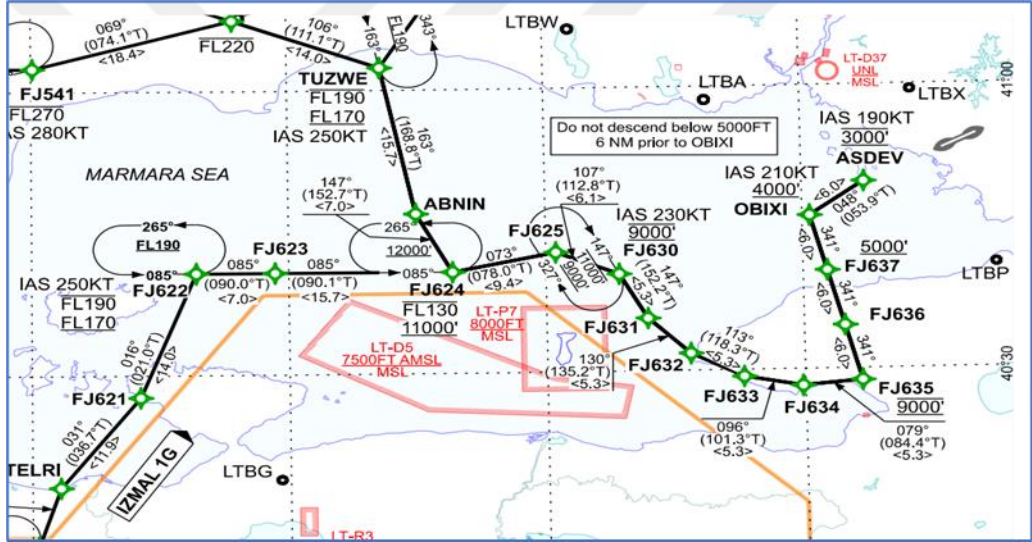
Mevcut uygulamada SAW için gecikmeler havada bekletme veya yerde bekletme (slot tahsisi) yöntemleriyle sağlanmaktadır. Bu anlamda gerçek uçuş verilerinin kullanılarak uçaklar için hava sahası yapısına uygun mevcut geliş prosedüründe kullanılan farklı hız profillerinin kullanılması hava sahasının etkin kullanımı açısından önemlidir.

SAW geliş trafiklerinin hemen hepsi 06 pistine iniş gerçekleştirmişlerdir. SAW 06 pistine iniş yapmak için gelen trafikler, İstanbul Terminal Kontrol Sahası (TMA)'na giriş yaptıktan sonra havacılık bilgi yayını'nda (AIP) 06 pisti için ilan edilmiş saha seyrüsefer (RNAV) küresel uydu seyrüsefer sistemi (GNSS) standart aletli geliş (STAR) rotasını takip eder .

Doğudan TMA'ya gelen uçuşlar şekil 1.2'de görüldüğü gibi öncelikle en yüksek 27.000 feet irtifada olacak şekilde sahaya giriş yapmaktadır. Bu noktadan sonra FJ821 adlı noktayı geçen uçaklar RAVIL noktasında 17.000 feet ile 19.000 feet arasında uçuş gerçekleştirirler. Buradan FJ822 ve FJ823 noktalarını geçen uçaklar 8000 feet irtifada FJ725 noktasında olmaktadır. Daha sonra sırasıyla FJ730-731-732-733-734-735-736-737-737 noktalarını geçerek 3000 feet irtifada son yaklaşma noktası olan ASDEV'e ulaşırlar. Kısacası TOKER 1G olarak adlandırılan STAR'ı takip etmektedirler.



Şekil 1.2. SAW RNAV GNSS RWY 06 doğu gelişleri için STAR Chart'ı (DHMI, 2023)



Şekil 1.3. SAW RNAV GNSS RWY 06 batı gelişleri için STAR Chart'ı (DHMI, 2023)

Batıdan TMA'ya gelen uçuşlar ise şekil 1.3'te görüldüğü gibi şekil 1.2'dekine benzer şekilde bu sefer IZMAL 1G olarak adlandırılan STAR'daki kısıtlamaları uygulayarak alçalmasını gerçekleştirmektedir.

Bu çalışmada SAW'a ait geliş prosedürünün seçilme amacı, Türk hava sahası içerisindeki hava trafik yoğunluğu ve gecikmeleri göz önüne alındığında ATFM gecikmelerine rağmen uçuş trafik yoğunluğu açısından 2. sırada yer almasıdır [25]. SAW'da artan trafik talebiyle birlikte hem uçak park pozisyonları hem de tek pist kapasitesi uçuş operasyonları için yetersiz kalmaktadır. Ayrıca olumsuz hava

koşullarının da etkisiyle havada beklemelerin artması dolayısıyla gecikmelerin yaşanması kaçınılmaz olmaktadır.

Birçok havalimanı maksimum kapasitelerinde çalıştığından, planlanan zamanlarda meydana gelen küçük sapmalar bile kapasite dengelerini bozarak, zincirleme gecikmelere yol açabilir. Bu nedenle, tıkanıklık modellemeleri yapıldığında, günde yaklaşık yarım milyon yolcunun bir ila iki saat gecikme yaşaması öngörülmektedir. Bu gecikmeler oldukça dikkat çekicidir [21].

Günümüzde, gelecekteki hız azaltma tekniklerine alternatifler, uçaklar için uçuş başına ekstra bir maliyete yol açan yerdeki gecikmeleri, bekletmeleri veya yeniden yönlendirmeleri içermektedir. Bu nedenle yapılan çalışmalarda hız değişimi çözümlerinin ekonomik açıdan da rekabetçi olabileceği düşünülmekte olup, yapılan araştırmaların ve sunulan sonuçlar ile gelecekteki ATM sisteminde bu tür tekniklere kapı açmaktadır. Ancak bu yeni konseptler uygulanırken yakıt tüketiminin her zaman düşünülmesi gerektiği bilinmektedir. Bu bağlamda literatürde yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlarına dair ayrıntılar bir sonraki bölümde açıklanacaktır.

2.LİTERATÜR TARAMASI

Stokastik sınır, sınır fonksiyonlarını tahmin etmek ve etkinliği ölçmek için alternatif yöntemlerden biridir. Stokastik sınırlar daha çok Cobb-Douglas formunu uygulayan parametrik yöntemi içerir [26]. SSA üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde farklı birçok alanda uygulamalarına rastlamak mümkündür [27–29]. Ayrıca havayolu şirketlerinin performansının ölçülmesine yönelik birçok çalışma yapıldığı görülmüştür:

Zou vd. (2016), Amerika Birleşik Devletleri'ndeki on beş büyük jet operatörünün yakıt verimliliğini analiz etmek için oran tabanlı, deterministik ve stokastik sınır yöntemlerini kullanmıştır. Bulguları, ana hat havayolları için maliyet tasarrufu potansiyelinin yaklaşık bir milyar dolara ulaşabileceğini göstermiştir [30].

Assaf vd. (2020), SSA kullanarak istenmeyen çıktılar (emisyonlar gibi) dikkate alarak havayolu şirketlerinin teknik etkinliklerini ölçmüşlerdir. Çalışmada havayolu şirketleri arasında verimsizlik açısından kayda değer farklılıklar olduğunu bulmuşlardır. Havayollarının düşük kaliteli çıktılar üretmekten dolayı önemli maliyetlere maruz kaldığını belirlemişlerdir. Ancak, havayolları bakım ve servis eğitimine daha fazla yatırım yaparsa bu maliyet sorunlarını azaltabilir şeklinde öneri getirmişlerdir [31].

Ngo vd. (2022) Asya-Pasifik havayollarının performans ve verimliliğini inceleyen verimlilik skorları ile güven aralıklarını tahmin etmiştir [32].

Kaya vd. (2022) tarafından yapılan bir çalışma, uluslararası hava taşımacılığı açısından kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmak için uygulanan önleyici faaliyetlere katkıda bulunmayı amaçlamıştır. Avrupa Birliği (AB) üyesi 28 ülke, veriye dayalı stokastik sınır analizi ve Malmquist verimlilik endeksleri kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, havacılıktan kaynaklanan emisyonları etkileyen belirleyicilerin 2008-2017 dönemi için istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, stokastik sınır analizi ve Malmquist verimlilik endeksi ile elde edilen verimlilik skorlarının ülkeler arasında farklılık gösterdiğini gözlemlemişlerdir [33].

Bourjade vd. (2023), SSA kullanarak maliyet verimliliği kazanımlarını araştırmak için dünya çapında 134 havayoluna ait verileri kullanarak bir çalışma yapmıştır. Amaç, havayollarının leasing tercihlerinin maliyet verimsizliğini azaltmaya yönelik teşvikler tarafından yönlendirilip yönlendirilmediğini değerlendirmektir. Havayollarının optimal

kiralama seviyesini hesaplamışlar ve havayollarının ekonomik verimliliğine ilişkin doğru ölçümler sağlamışlardır [34].

Yapılan bu çalışmalar dışında, son yıllarda, havayolu üretkenliğini ve verimliliğini çevresel faktörlerle birlikte değerlendirmek için yapılan çalışmalar yanında [35–42], gecikmelerin analizi için de [43–45], stokastik sınır analizi yöntemi kullanılarak önemli araştırma çalışmaları yapılmıştır.

Ayrıca, bazı çalışmalarda havalimanlarının verimlilik değerlendirmesi ele alınmıştır:

Martin vd. (2009), bir SSA modelini tahmin etmek için Markov zinciri ve Monte Carlo simülasyonunu kullanarak ispanyol havalimanlarının verimliliğini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Havalimanı operasyonlarında önemli düzeyde verimsizlik tespit edilmiştir [46]. **Martini vd. (2013)**, tarafından yapılan bir başka çalışmada, gürültü ve yerel hava kirliliği dikkate alınarak verimlilik skorlarını bulmak için 33 farklı İtalya havalimanının verimliliği analiz edilmiştir [47].

İtalya havalimanları için **Scotti vd. (2012) tarafından** yapılan bir başka çalışmada, bu havalimanları arasındaki rekabetin teknik verimliliklerini olumsuz yönde etkilediği bulunmuştur. Ayrıca, kamu havalimanlarının özel ve karma havalimanlarına göre daha etkin olduğu görülmüştür [48].

Kaleab (2022) Etiyopya'daki 13 yerel ve uluslararası havalimanının verimliliğini araştırmıştır. Aynı yıl, SSA kullanılarak 2002-2017 döneminde bu havalimanlarının maliyet verimliliği Kaleab tarafından analiz edilmiştir [49].

Adachi (2023), 2016 ve 2020 dönemlerinde çok çıktılı bir stokastik sınır modeli kullanarak havalimanı imtiyazlarının 19 büyük Japon havalimanının teknik verimliliği üzerindeki etkisini incelemiştir. Tüm operasyonları idare etme kapasitesine sahip havalimanlarının, sahip olmayanlara göre daha verimli olduğu görülmüştür. Bir havalimanı ne kadar çok uluslararası yolcuya sahipse, o kadar verimli olduğu sonucuna ulaşmışlardır [50].

Diğer çalışmalarda ise havalimanlarının performans ve enerji verimliliğinin ölçümü hem Veri zarflama analizi (VZA), hem de SSA kullanılarak ele alınmıştır [51–56]

Bununla birlikte, SSA kullanılarak geliş prosedürlerinin hızı dayalı yakıt verimliliğinin ölçülmesiyle ilgili çalışmaların sayısının da literatürde sınırlı olduğu açıktır.

Ayrıca literatürde modellerin tahmin gücünü arttırmak ve doğru değişken seçimi yapmak için önerilen yöntemlerden olan En küçük mutlak küçültme ve seçim operatörü yöntemi (LASSO) alanında yapılan çalışmaların sayısı da oldukça fazladır. Bu tez çalışmasında veri setinde önemsiz olabilecek değişkenlerin doğru bir şekilde belirlenerek modele dahil edilmesi amacıyla LASSO yöntemi kullanılmıştır. Yöntem sayesinde modele sadece en iyi uyumu gösterecek önemli değişkenler seçilmesi sağlanmıştır. Bu sayede modelin karmaşık bir yapıda olmasının önüne geçilerek yorumlanabilirliği artırılmıştır.

Literatürde LASSO ile yapılmış çalışmalar incelendiğinde;

Astar (2012), tez çalışmasında LASSO yöntemini kullanarak belirlediği değişkenlerin modelleme üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Çalışmada LASSO yöntemi, sanayi, hizmet, teknoloji ve mali sektörler için belirli değişkenlerin önemini sıralamakta etkili bir araç olarak değerlendirilmiştir. Yöntem, modelin tahmin doğruluğunu artırırken, aynı zamanda gereksiz değişkenleri de elimine etmiştir [57].

Liv d. (2012), LASSO yöntemi kullanılarak uçakların iniş verilerindeki anahtar değişkenleri belirlemek ve potansiyel pistten çıkmaları tespit etmek için eşzamanlı bir yöntem geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, geliştirilen yöntem havacılıkta uçakların iniş performansı verilerini analiz ederek istenmeyen iniş performanslarının öncüllerini belirlemekte ve pistten çıkma risklerini azaltmaktadır [58].

Rajeswari vd. (2016), LASSO ve diğer regresyon tekniklerini kullanarak makine öğrenimi modellerinde özellik seçimini iyileştirmeyi amaçlamıştır. LASSO regresyonunu, model karmaşıklığını azaltmak ve tahmin doğruluğunu artırmak için tercih etmişlerdir. Bu sayede önemsiz özellikleri etkili bir şekilde sıfıra indirebilmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, LASSO'nun diğer regresyon yöntemlerine göre daha az karmaşık ve yüksek doğrulukta modeller üretebildiğini göstermiştir [59].

Singh vd. (2020), yaptıkları çalışmada bir uçak motorunun kalan kullanım ömrünü tahmin etmek ve motorun sağlık durumunu sınıflandırmak için LASSO regresyonunu kullanmışlardır. Bu yöntemi, motorun sağlık durumunu ve kalan ömür değerlerini daha

doğru tahmin etmek için kullanılmıştır. Sonuç olarak, LASSO ve diğer makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak yapılan tahminler, motorun bakım zamanlamasını ve güvenilirliğini iyileştirmek için sektöre etkili bilgiler sağlamıştır [60].

Hidiyanto vd. (2022), düşük hızlı rüzgâr tünellerinde uçak test verileri üzerinden kuvvet ve moment tahmini yapabilmek için keşifsel veri analizi (EDA) ve özellik seçimi yapmışlardır. Bunun için, özellik seçimi sürecinde önemli özellikleri belirlemek için LASSO regresyonu kullanılmış ve güçlü özellikleri zayıf olanlardan başarılı bir şekilde ayırmışlardır. Sonuç olarak, makine öğrenimi tabanlı uçak tasarımı katsayı modellemesi için verimli ve etkili bir yöntem sağlanmıştır [61].

Literatürde panel veri analizi yöntemi kullanılarak özellikle havacılık alanında yapılan çalışmalarda incelenmiştir. Bu çalışmaların içerikleri değerlendirildiğinde daha çok havacılığın ekonomik ve çevresel sonuçları üzerine yapılan çalışmalara rastlanmıştır.

Grampella vd. (2012), İtalyan havaalanlarındaki gürültü ve emisyon seviyeleri, panel veri analizinde sabit etkili ekonometrik model kullanılarak incelenmiş ve havacılık faaliyetlerinin çevresel maliyetleri hesaplanmışlardır. Sonuç olarak, havaalanı yıllık hareketlerindeki %1'lik artışın toplam dışsallık maliyetlerinde %1,018'lik, uçak büyüklüğündeki %1'lik artışın %1,251'lik ve uçak yaşındaki %1'lik artışın %0,443'lük bir dışsal maliyet artışına neden olduğunu tespit etmişlerdir [62].

Fukui ve Miyoshi (2017), ABD havayolu endüstrisinde, 1995-2013 yılları arasındaki verileri panel veri analizi yöntemini kullanarak analiz ederek, havacılık yakıt vergisinin yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini incelenmişlerdir. Çalışma sonucunda havacılık yakıt vergisindeki 4.3 sentlik bir artışın kısa vadede CO₂ emisyonlarını %0,14-0,18 oranında azaltacağını hesaplamışlardır [63].

Yanto ve Liem (2017), çalışmada panel veri analizi kullanılarak uçak yakıt tüketimini hızlı ve etkin bir şekilde tahmin eden bir model geliştirmişlerdir. Orta hassasiyetli ve veri destekli yakıt tüketimi tahmin modeli kullanılarak, uçakların görev yükü ve menzile bağlı yakıt tüketimini iki boyutlu doğrusal regresyon modelleriyle tahmin etmişlerdir. Model sonucunda, toplam yakıt tüketimi tahminlerindeki hata oranlarının %1'in altında olduğu bularak bu modelin karar verme ve analizi süreçlerinde etkin bir şekilde kullanılabileceği göstermişlerdir [64].

Kiracı (2021), panel veri analizi kullanılarak havayolu şirketlerinin iflas riskini etkileyen finansal faktörleri incelenmiştir. Z-skor, S-skor ve J-skor tahmin modellerini kullanarak 35 havayolu şirketinin 2004-2018 dönemi finansal verilerini analiz etmiştir. Sonuçları değerlendirdiğinde, kaldıraç oranı, varlık yapısı, firma büyüklüğü, karlılık oranı ve likidite oranının iflas olasılığı üzerinde anlamlı etkilerinin olduğu sonucuna ulaşmıştır [65].



3.MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmanın bu bölümünde öncelikle Sabiha Gökçen Havalimanı'na gelen uçuşlara ait verilerin düzenlenme adımları anlatılacaktır. Devamında ise LASSO, panel veri analizi, SSA yöntemlerine ilişkin kavramlar açıklanmıştır.

3.1. Materyal

Veri analizlerinin doğru bir şekilde yapılarak istenilen modelin kurulabilmesi için verilerdeki aykırı değerlerin temizlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu başlıkta veri seti ve verinin analize uygun hale getirilmesi için gerçekleştirilen aşamalar ayrıntılı bir şekilde açıklanacaktır.

Uçuş verilerinin tümü MS Excel formatında düzenlenerek, veri tabanı oluşturulmuştur. Çalışmada veri setinin düzenlenmesi ve analiz süreçlerinin tamamında R programlama dili kullanılmıştır. Katkıda bulunan paketlerle genişletilmiş temel R sistemi, birçok çalışma paketi ile desteklendiğinden, şu anda mevcut olan en kapsamlı istatistiksel hesaplama kaynağı olarak kabul edilebilmektedir [66]. Bu nedenle tez çalışmasında R programı kullanılması tercih edilmiştir.

3.1.1. Veri seti

Bu tez çalışması için kullanılan veri tabanı Boeing 737-800 tipi uçaklara ait uçuş yönetim sisteminde (FMS) uçuş boyunca kaydedilmiş olan verilerdir. Bu veriler havayolu firması aracılığıyla Sabiha Gökçen Havalimanı için elde edilmiştir. Bu sayede kullanılan veri kümesindeki değişkenler gerçek zamanlı uçuş verilerinden oluşturulmuştur. Veriler uçuş boyunca her saniye uçağın sisteminden ve sensörlerinden alınarak kaydedilmektedir. Kaydedilen veriler operatörler tarafından özel bir veri tabanına işlenmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan uçuş verilerinin tamamı Türkiye'nin Sabiha Gökçen Havalimanı'na en çok uçuş düzenleyen havayolu şirketi olan Pegasus Hava Taşımacılığı A.Ş. tarafından sağlanmıştır.

Çalışmada kullanılacak değişkenler belirlenirken veri analizi için gerekli aşamaların yanında, literatürde havacılık alanında yapılmış çalışmalar da ayrıntılı incelenmiş olup, bir geliş prosedürü açısından yapılan analiz bulunmaması nedeniyle sektörel bir değerlendirme de yapılarak doğru değişkenlerin seçilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmadaki veriler 42 farklı uçuşa ait olup, her bir uçuş için 43 satır bulunmaktadır. Toplam 1806 satır ve 90 sütundan oluşmaktadır. 162540 hücre değeri analize ham veri

seti dahil edilmiştir. Veri sayısının çok olması, verilerdeki yazım hataları, bilgilerin farklı şekilde girilmesi, tekrar eden veri sayısının çok olması gibi durumlardan dolayı veri seti analize hazır değildir. Bu nedenle verilerin ham veriden analize hazır veriye dönüştürülmesi gerekmektedir. Bir sonraki başlıkta veri düzenleme adımları paylaşılmıştır.

3.1.2. Veri düzenlemesi

Veri temizliği, veri analizi için kritik öneme sahiptir. Bir veri setinin temiz olabilmesi için uygun yapısal formda olması gerekmektedir [67].

Veri setlerinde, diğer değerlerle karşılaştırıldığında uyumsuz olan değerlere aykırı değer (outliers) denir. Bu tür değerler yanlış veri girişi, ölçüm cihazının arızası ya da deney materyalindeki anormallikler gibi çeşitli sebeplerle ortaya çıkabilir. Aykırı olarak belirlenen bu değerlerin gerçekten aykırı olup olmadığını doğrulamak önemlidir. Bu tür uç değerlerin fazlalığı, veri setinin normal dağılımdan sapmasına ve yapılan istatistiksel analizlerin doğruluğunu etkilemesine neden olabilir [68].

Geniş bir örneklem hacmine sahip veri setlerinde, istatistiksel analizler sırasında aykırı değerler çoğu zaman araştırmacılar tarafından düşünülmeden dışlanabilmektedir. Ancak örneklem hacmi küçük veya yeterinde olmadığında, tek bir gözlemin analiz sonuçları üzerindeki etkisi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle özellikle örneklem daraltılmak istendiğinde aykırı değerlerin doğru bir şekilde tespit edilip çıkarılması kritik önem taşımaktadır [69].

Veri düzenleme işleminde 42 adet uçuşa ait 90 farklı veri sütunu dahil edilmiştir. Veriler 3000 feet'ten 24000'feet irtifaya kadar 500'er feet aralıklarla 43 satırdan oluşmaktadır.

İkinci aşama olarak veri seti hem hatalı hem de eksik değerler konusunda gözden geçirilmiştir. Bu işlem için 'NA' olarak belirtilen değerler ve sayısal olmayan sütunlar analizlere dahil edilmemiştir. Bu aşama için yazılan fonksiyona ait kod EK 1'de sunulmuştur. Örneğin, uçuşun başlangıç havalimanı gibi değişkenler bu analiz sürecine doğrudan katkı sağlamamaktadır. Ancak, havacılık sektörü için sonraki çalışmalarda potansiyel değere sahip olabilecek bu tür bilgiler, analiz sürecinde filtrelenerek dikkate alınabilir. Örneğin, uçuşun hangi havalimanından gerçekleştiği bilgisi bu şekilde

değerlendirilebilir. İlgili kod, bir hücredeki değerin sayısal olup olmadığını ve herhangi bir 'NA' olarak tanımlanamamış değeri içerip içermediğini kontrol etmektedir. Fonksiyon, hücrenin sayısal bir değer içerip içermediğini görmek için kullanılmaktadır. Bu kodun (EK-1), R programlama dilinde çalıştırılmasıyla, veriler 1806 satır ve 69 sütuna indirgenmiştir.

Bu tez çalışmasında üçüncü aşamada veri setindeki aykırı değerleri tanımlamak için önemli ve nesnel yollardan biri olan Z değeri ve Çeyrekler Açıklık (Inter Quartile Range-IQR) yöntemleri kullanılmıştır. Z değeri, standart sapma ve ortalama kullanılarak veri setindeki aykırı değerleri belirlemek için kullanılmaktadır. IQR, bir veri setinin yayılımının ölçülmesi için kullanılan bir istatistik terimidir. IQR, veri setinin merkezi dağılımının bir ölçüsü olarak kullanılır ve özellikle aykırı değerleri tespit etmek ve veri dağılımını analiz etmek için kullanılmaktadır. IQR'nin kullanımı ile veri setindeki ekstrem değerlerin etkisini azaltarak dayanıklı (robust) istatistiksel analizler yapmaya olanak tanınmaktadır [70].

Bu analizde IQR'ye göre belirlenen aykırı değer etiketli gözlemler verilerden çıkarılmıştır. Bu aşamalardan sonra ise veriler 1577 satır ve 69 sütuna indirgenmiştir.

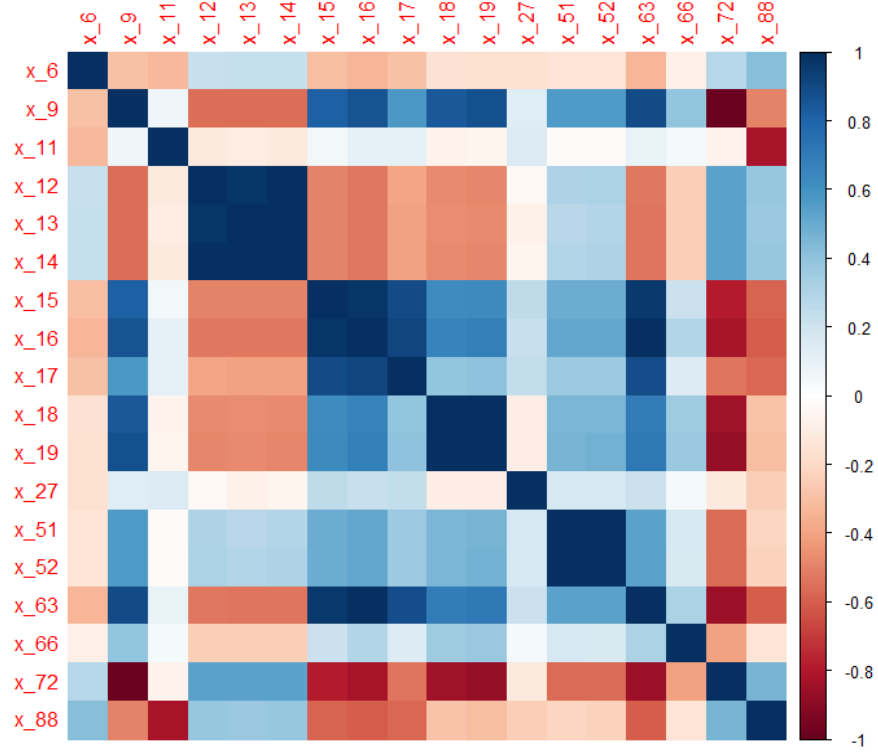
Çalışmanın dördüncü aşaması olarak verinin panel veri analizine uygun formata getirilmesi için 42 farklı uçuşa ait veriler tek tek etiketlenmiştir. Bu aşamada her bir uçuş 'i' olarak tanımlanmıştır. Zaman ise 't' olarak tanımlanmıştır. Bu noktada her bir uçuşun alçalma aşaması analiz edildiğinden zaman irtifa ile ilişkili olarak ele alınmıştır. Bu aşama için yazılan seçim ve atama kodu ise EK-2'de sunulmuştur. Böylece 69 sütun 71 sütuna çıkarılmıştır. 69 sütun içinden ise özellik seçimi yapılarak modelleme oluşturulmuştur. Bunun için LASSO regresyonu kullanılmıştır. LASSO yöntemiyle bağımsız değişkenlerle bağımlı değişkenler arasındaki ilişki modellenirken bazı katsayılar sıfıra daraltılır. Bu durum modellemenin yanında değişken seçimi olarak da görülebilir.

Bu aşamadan sonra LASSO yöntemiyle seçilen bu değişkenler için korelasyon analizi yapılmıştır. Korelasyon analizi, değişkenler arasındaki ilişkinin varlığını, yönünü ve şiddetini tespit etmek için kullanılmaktadır. Ancak bu analiz, değişkenler arasında nedensel bir bağlantı olduğunu göstermemektedir. Eğer bir değişkenin değerleri, başka bir değişkenin değerleri ile doğrusal bir şekilde ilişkiliyse ve bu ilişki düz bir çizgiyle

ifade edilebiliyorsa, bu değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olduğu söylenebilir. İki değişken birbirinden tamamen bağımsızsa ve birbirini etkilemiyorsa, aralarında doğrusal bir ilişki olmadığı kabul edilir. İki değişken arasındaki ilişki doğrusal olduğu gibi, eğrisel de olabilir. Birden fazla değişken arasındaki korelasyon ise çoklu korelasyon olarak adlandırılır.

Yapılan korelasyon analiziyle edilen sonuçlar şekil 3.1'de bir korelasyon matrisi (ısı haritası) olarak sunulmuştur. Korelasyon matrisi, birbiriyle ilişkili olan değişkenleri görselleştirmek için kullanılmaktadır. Harita zerindeki renkler, değişkenler arasındaki ilişkinin şiddetini ve yönünü temsil etmektedir.

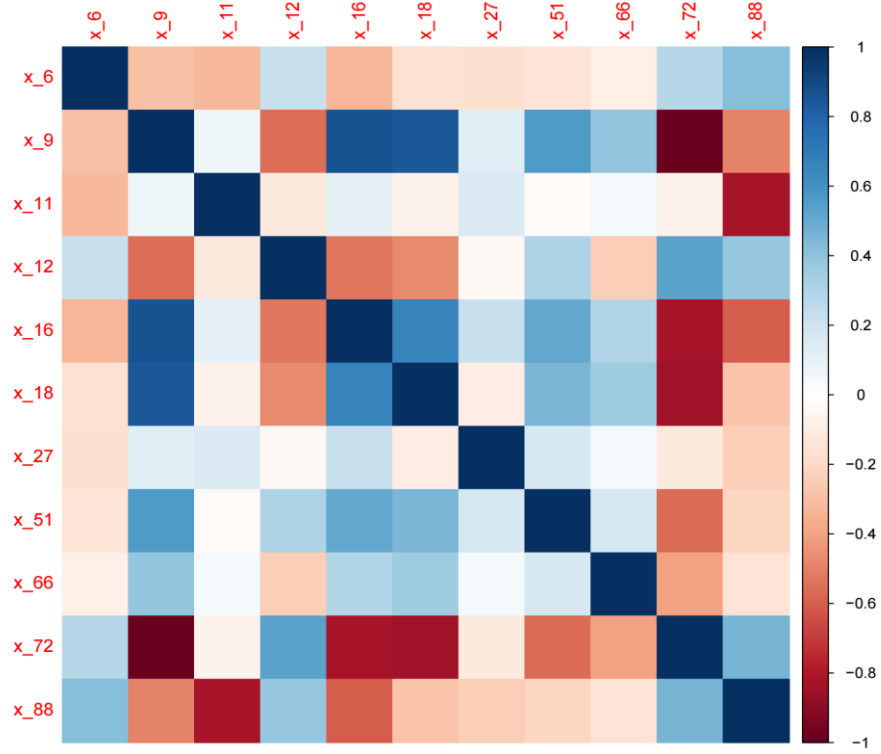
- **Koyu kırmızı renkler (-1'e yakın değerler):** Bu renkler, değişkenler arasında güçlü negatif bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Bir değişkenin değeri arttığında diğer değişkenin değeri azalmaktadır.
- **Koyu mavi renkler (+1'e yakın değerler):** Bu renkler, değişkenler arasında güçlü pozitif bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Bir değişkenin değeri arttığında diğer değişkenin değeri de benzer şekilde artmaktadır.
- **Açık renkler (0'a yakın değerler):** Bu renkler, değişkenler arasında zayıf veya hiç korelasyon olmadığını göstermektedir.



Şekil 3.1. LASSO yöntemiyle seçilen değişkenlerin korelasyon matrisi

Şekil 3.1’de LASSO ile seçilen değişkenler arasındaki korelasyon matrisi verilmiştir. Literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında ilk motora ait tüketim verileri kullanıldığı için x_51 değişkeni analizde kullanılmıştır. Buna bağlı olarak ilk motora ait olan yakıt tüketimi x_12 kullanılmıştır. İkinci motora ait yakıt akışı (x_13) ve her iki motora ait yakıt tüketimi ortalaması (x_14) analize dahil edilmemiştir. Yer hızı (x_15) ve düzeltilmiş hava hızı (x_17) ise x_16’nın analize dahil edilmesi nedeniyle analizden çıkarılmıştır. Ek olarak hava trafik kontrolde yüksek irtifalarda uçakların hız ayarlamalarında kullanılan MACH sayısı (x_63)’da hızla doğrudan ilişkisi olması nedeniyle bu değişkenin analizden çıkarılması kararlaştırılmıştır. Benzer şekilde pist başına olan mesafe (x_18) ve pist konma noktasına olan mesafe (x_19) birbiriyle örtüşen değerler olması nedeniyle (x_19) analizden çıkarılmıştır. Bu aşamaların tamamı uzman görüşüyle desteklenmiştir.

Seçilen değişkenler arasında uzman görüşü ile modele dahil edilmesi düşünülen sütunlar bir alt küme olarak değerlendirilmiştir. İlgili değişkenlerin korelasyon matrisi ise Şekil 3.2’de sunulmuştur.



Şekil 3.2. Modellemeye dahil edilen değişkenlerin korelasyon matrisi

Daha sonra çalışmada panel veri analizi yapılarak değişkenlerin yakıt tüketimine olan etkisi modellenmiştir. SSA içinse kurulmuş olan model üzerinde her bir uçuş ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu sayede her bir uçuş için farklı AIC değeri elde edilmiştir. Başka bir değişle bu çalışmada 42 farklı SSA yapılmıştır. Çalışmada elde edilen düşük AIC değeri, setteki diğer modellere göre daha iyi uyum sağlayan modeli göstermektedir. Elde edilen model bulguları SSA etkinlik bulguları başlığı altında ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

Model seçiminde kullanılan diğer yöntemler çalışmanın ilerleyen bölümlerinde ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

3.2. Uygulamanın Yöntemi

Yapılan çalışmada değişkenlerin seçimi için LASSO yöntemi, modelleme için panel veri analizi ve etkinlik analizi için SSA yöntemi kullanılmıştır.

Kullanılan yöntemlerle yapılan aşamalar hava trafik alanında henüz örneğine rastlanmamış bir analiz olup geliş rotasındaki uçuşların daha etkin bir yakıt akışı sağlayabilmesi için hava trafik kontrolde bir karar destek sistemi olarak nitelendirilebilir.

3.2.1. LASSO (En küçük mutlak küçültme ve seçim operatörü yöntemi)

Değişken seçimi, regresyon analizinde kritik bir rol oynamaktadır. Çok sayıda açıklayıcı değişkenin modele dahil edilmesi, tahmin performansını düşürebilir. Öte yandan, önemli bir açıklayıcı değişkenin modelden çıkarılması, parametre tahminlerinde yanlışlığa ve tahmin sonuçlarının doğruluğunun azalmasına yol açabilmektedir [71].

Regresyon analizi, bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılır. Bağımsız değişkenlerin, bağımlı değişkendeki değişiklikleri ne kadar iyi açıkladıkları ve bunların başarı sırasına göre sınıflandırılmaları büyük önem taşır. Çünkü regresyon analizinin temel hedefi, bağımlı değişkeni en doğru şekilde tahmin eden ve uygun sayıda bağımsız değişken içeren bir model geliştirmektir [72].

Veri setlerinde bağımsız değişken sayısının çok olması ve bu değişkenler arasında ilişkiler bulunması durumunda, klasik regresyon analizi ile oluşturulan modellerin tahmin performansı genellikle düşük olur. Cezalı regresyon yöntemleri, bu sorunlara çözüm sunmak amacıyla klasik regresyon tekniklerine bir alternatif olarak geliştirilmiştir [73,74].

Cezalı regresyon yöntemleri, doğrusal regresyonda En küçük kareler (EKK) tahmincilerinin yüksek varyansı nedeniyle ortaya çıkan sapmalı tahmin edici yöntemlerdir. Bu yöntemler, EKK'dan daha düşük varyansla katsayı tahmini yapmayı amaçlar ve bir ceza parametresi kullanarak artık kareler toplamını minimize etmeyi sağlar. LASSO yöntemi, ceza parametresi sayesinde bazı değişken katsayılarını azaltırken, diğerlerini sıfıra indirgeyerek hem katsayı tahmini hem de değişken seçimi yapmayı mümkün kılan bir yöntemdir [75]. En küçük kareler tahmin edicisinin verideki ufak değişikliklerden çok etkilenmesi ve varyansın şişmesinden kaynaklı modele yanlış değişken seçimi gibi nedenlerden dolayı, alternatif yöntem olarak LASSO önerilmiştir [73]. LASSO regresyon katsayılarının mutlak değerinin toplamını, sabit bir değerle sınırlandırarak hem değişken seçimi, hem de modellemeyi sağlar [74]. LASSO yöntemi, bazı katsayıları sıfıra doğru daraltan ve bazılarını da tamamen sıfır yapan bir yöntemdir. Ancak değişkenler arasında yüksek ilişki söz konusu olduğunda ilişkili olan değişkenlerden bir tanesini modele alır ve diğer ilişkili değişkenleri modelden çıkarır. Bu özellik de değişken seçimi olarak bilinmektedir [72].

LASSO tahmincisi aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$\hat{\beta}^{LASSO} = \underset{\beta}{\operatorname{argmin}} \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p x_{ij} \beta_j)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j| \right)$$

Bu formülde:

y_i : i . uçuşun yakıt akışı değeri.

β_0 : Modelin sabit terimi.

x_{ij} : i . uçuş için j . bağımsız değişkenin (hız, mesafe vb.) değeri.

β_j : j . bağımsız değişkenin katsayısı.

λ : Ceza parametresi, modelin ne kadar cezalandırılacağını kontrol eder, bu parametre büyük olduğunda daha fazla değişken modelden çıkarılır, küçük olduğunda ise daha fazla değişken modelde kalır.

p : Modelde kullanılan bağımsız değişkenlerin sayısı (69 adet)

N : Gözlemlerin toplam sayısı

3.2.2. Panel veri analizi

Panel veri, aynı birimlerin (yatay kesit veri) zaman içindeki (zaman serisi verisi) ile oluşturulan bir veri seti türüdür. Bu tür bir veri seti hem yatay kesit hem de zaman serisi boyutlarını içerir[76]. Zaman serisi boyutu, belirli bir dönem boyunca aynı yatay kesit birimlerinin takip edilmesiyle oluşur [77]. Panel veri setlerinde, tüm birimlerin özelliklerine ait zaman serilerinde herhangi bir eksik gözlem olmadığında, bu tip veri setleri 'dengeli panel' olarak tanımlanır. Ancak, bazı panel birimlerinin gözlemlerinde eksiklikler bulunan panel veri setlerine 'dengesiz panel' adı verilir [78].

Panel veri setleri, yatay kesit birimlerinin sayısına ve bu birimlerin takip edildiği zaman boyutuna göre 'uzun ve dar', 'kısa ve geniş' ve 'uzun ve geniş' olmak üzere üç farklı biçimde sınıflandırılabilir [78].

Bu çalışmada verilerin hem yatay boyutu (seviye, FPA, TAS vb.) hem de zaman boyutu (toplam uçuş süresi) bulunduğu için veri yapısı panel veri formatına

dönüştürülmüştür. Çalışmada panel verinin "dengeli" veya "dengesiz" olup olmadığını belirlemek için, her bir uçak tanımı için 'i', zaman tanımı içinse 't' terimi atanarak veri seti kontrol edilerek aykırı değerler temizlenmiştir. Aykırı değerlerin çıkarılmış olması nedeniyle yapılan analizlerde panel veri yapısı dengesiz bir yapıya sahiptir.

Değişkenler arasındaki ilişki R programlama diline panel veri yöntemiyle girilerek incelenmiştir. Çalışmada panel veri analizinde ise sabit etkiler ve rastgele etkiler modelleri kullanılmıştır.

Panel veri ile yapılan regresyonlarda temel olarak Sabit Etkiler Modeli (SEM) ve Rassal Etkiler Modeli (REM) olmak üzere iki yaklaşım bulunmaktadır.

3.2.1.1. Sabit etkiler modeli (SEM)

$$y_{it} = \alpha_i + \beta x_{it} + u_{it}, \quad i=1,\dots,n, \quad t=1,\dots,T$$

y_{it} : i 'inci uçuşun t 'inci zamandaki yakıt akışı

α_i : Her birim için özgül olan ve zaman içinde değişmeyen sabit etkidir. Bu terim, modelin "sabit etkiler" adını almasının nedenidir.

β : Her bir bağımsız değişkenin katsayısının vektörü

x_{it} : i 'inci uçuşun t 'inci zamanındaki bağımsız değişkenler matrisi

u_{it} : Hata terimi, modeldeki rassal sapmayı ifade etmektedir.

Panel veri analizinde, birimler arası ya da zaman içindeki değişimlerin modellenmesi için değişkenliklerin regresyon modelindeki bazı veya tüm katsayıları etkilediğini öngörülmektedir. Katsayıların birimler veya zamanla birlikte değiştiği varsayılan bu modellere "Sabit Etkili Modeller" adı verilmektedir. Bu modelin temel formülasyonu, birimler arasındaki farklılıkların modelin sabit terimindeki değişikliklerle ele alınabileceğini kabul etmesidir [79].

Sabit etkiler modeli; sabit terimin birimler boyunca değişen doğrusal bir regresyon modeli olarak tanımlanmaktadır [80]. Sabit etkiler regresyon modeli, her bir birim için farklı bir sabit terim içerir. Bu terimler, analizdeki her bir birimin özelliklerine bağlı olarak değişir. Sabit terimler, birimler arasında farklılık gösterebilir ancak zaman içinde sabit kalan gösterge değişkenleriyle ifade edilir. Bu gösterge değişkenleri, modelde dikkate alınmayan ancak birimler arasındaki farklılıkları yansıtan tüm etkileri içerir [81].

Sabit etkili regresyon modeli, zamanla sabit kalırken olaylar arasında değişkenlik gösteren göz ardı edilen değişkenleri dikkate almak için kullanılmaktadır [82].

3.2.1.2. Rassal etkiler modeli (REM)

$$y_{it} = \beta x_{it} + \mu_{it} + \epsilon_{it}, i=1,\dots,n, t=1,\dots,T$$

- y_{it} : i 'inci uçuşun t 'inci zamandaki yakıt tüketimi
 x_{it} : i 'inci uçuşun t 'inci zamanındaki bağımsız değişkenler matrisi
 β : Her bir bağımsız değişkenin katsayısıdır
 μ_{it} : Uçuşlara özgü rassal etkidir. i 'inci uçuşun sabit olmayan özelliklerini temsil etmektedir. Bu terim uçuşlar arası değişkenliği ifade eder ve genellikle normal dağılıma sahip olduğu varsayılır.
 ϵ_{it} : Hata terimidir. t zamanında i 'inci uçuş için rassal hataları ifade eder.

Sabit etkiler modelinde çok fazla parametre olması sebebiyle serbestlik derecesi düşmektedir. Rassal etkili modelde bireysel etkinin “ μ_{it} ” rassal olduğu varsayılırsa bu sorundan kaçınılabilmektedir. Bu durumda u_{it} ve μ_{it} sıfır ortalama ve sabit varyansa sahip olur ve μ_{it} , u_{it} den bağımsızdır. Eğer büyük bir veri kümesinden rasgele birimler çekilecekse, rassal etkiler modelinin kullanılması uygun kabul edilmektedir [83].

Rassal etkiler modeli, her bir uçuşa (i) özel kesit sayısının atandığı sabit etkiler modeline benzerdir. Ancak, bu modelde kesit katsayıları sabit terimler olarak değil, rastgele çekilen değerler olarak ele alınır. Bu yaklaşımda, katsayılar rastgele değişkenler olarak kabul edilir ve hata teriminin bir parçası olarak görülür. Sonuç olarak, model bir bütüne ait ortak kesit katsayısı, bağımsız değişkenler kümesi ve birleşik bir hata terimi içerir. Bu birleşik hata terimi iki bileşenden oluşur: Birincisi, belirli bir birey ve zaman dilimindeki kesit sayısının genel kesit katsayısından ne kadar farklı olduğunu gösteren bileşen; ikincisi ise bireyin o zaman dilimindeki tesadüfi sapmaları için bilinen rastgele hata bileşenidir [84].

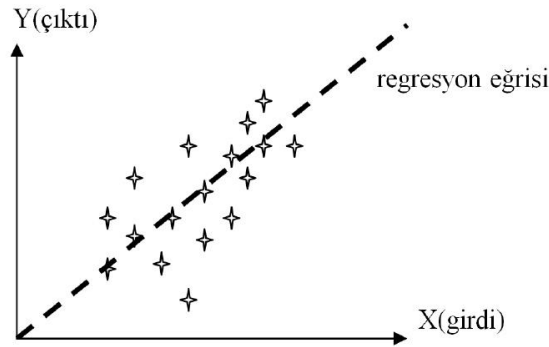
3.2.3. Stokastik sınır analizi

Parametrik etkinlik ölçme yöntemlerinden biri olan stokastik sınır analizi, ilk kez 1977 yılında birbirinden bağımsız iki makale aracılığıyla ortaya atılmıştır. Çeşitli uygulama alanları ile o tarihten itibaren literatürde kendisine daha fazla yer bulmaya başlamıştır. Stokastik sınır analizinin gittikçe daha popüler olmasının sebebi parametrik

olmayan yöntemlerden farklı olarak işletmenin kontrolü dışındaki rassal değişkenleri de modele dahil etmesi olarak açıklanabilir [85].

Gerçekte var olan ya da olması muhtemel bir hata payının probleme dahil edilerek, elde edilen değerin daha gerçekçi olacağı düşünülerek SSA yöntemi geliştirilmiştir. SSA’da bu hata payının dağılımı için bazı varsayımlar vardır. Bunlardan en önemlisi analize başlamadan önce bu hatanın karakterinin biliniyor olmasıdır. Diğer bir ifadeyle hata teriminin bir dağılımı vardır ve o dağılımın da önceden bilindiği varsayılmaktadır. Bu nedenle VZA ile SSA arasındaki en önemli farklılık VZA parametrik olmayan bir yöntemken, SSA ise parametrik bir yöntemdir. SSA ayrıca uygulamaya geçilmeden önce veri üretim sürecinin ve üretim olabilirlik kümesinin yapısı hakkında bazı varsayımlara ihtiyaç duymaktadır. Kısaca, üretilen girdi ve çıktı arasındaki stokastik ilişkinin bilindiği varsayılır. Bu sayede uygulamada karşımıza bir maliyet çıkacağından VZA’ya sadece bu anlamda bir dezavantaj oluşturduğu söylenebilir [86].

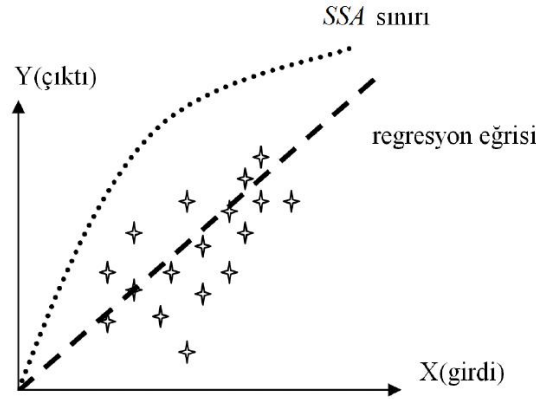
Regresyon analizi, bir sınır fonksiyonu oluşturulmak istendiğinde akla ilk gelen istatistiksel yöntemler arasında gelmektedir. Ancak regresyon analizi için veriler şekil 3.3’teki gibi bir dağılım oluşturmaktadır. Fakat bu sınır üretim sınırı olarak kullanılamaz çünkü bazı gözlemler bu yöntemle oluşturulacak sınırın üzerinde yer alacaktır [86].



Şekil 3.3. $\beta=0$ olan basit doğrusal regresyon eğrisi [86]

SSA olarak adlandırılan yöntem ise üretim etkinliğinin tahminine regresyon analizi gibi ekonometrik yöntemlerin uyarlanmış veya geliştirilmiş halidir. Yöntemin içerisinde yer alan stokastik kelimesi hata teriminin rastgele oluşundan gelirken, sınır kelimesi ilgilenilen verinin zarflanması yoluyla bir üretim sınırı oluşturulmaya çalışılmasından gelmektedir. Bu yöntem aracılığıyla üreticilerin amaçlarıyla alakalı olarak onların

etkinlik dereceleri ile sınırlarının tahmini ilişkilendirilmektedir. SSA sonucu yaklaşık olarak Şekil 3.4'teki gibi bir üretim sınırının çıkması beklenilir.



Şekil 3.4. SSA için üretim sınırı [86]

Parametrik yaklaşımda da parametrik olmayan yaklaşımda olduğu üzere farklı birim veya firmalarda gözlenen gerçek gözlemler kullanılmasıyla üretim fonksiyonu tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Bu tahmin edilen fonksiyon da her bir firmanın/birimin kendine özgü performansının ölçümünde kullanılmaktadır.

Teknik etkinliğin fonksiyonel biçimde tanımlanabilmesi sebebiyle performans değerlendirmelerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Ekonometri literatüründe genellikle bu etkinlik SSA kullanılarak tahmin edilmektedir [29]. Bu yöntemin uygulanmasında öncelikle farklı üretim-tüketim fonksiyonları ile sınırın karakterize edilmesi önemlidir. Cobb-Douglas ve Translog fonksiyonları bu bağlamda sıklıkla kullanılan stokastik sınır analiz formlarındandır.

Etkinlik, gözlenen değerlerin ideal veya optimal değerlere oranı olarak düşünülebilir. Etkinlik genellikle iki farklı şekilde ekonometri literatüründe yer almaktadır. Bunlar allokatif etkinlik ve teknik etkinlik olarak ele alınmaktadır. Allokatif etkinlik, genel ekonomi tanımının yakınlığı nedeniyle ekonomik olarak kullanılır. Teknik etkinlik ise; parametrik fonksiyonlarla tanımlanabilen ve fonksiyonel hesaplamalarla uyumlu oluşu nedeniyle tüm etkinliklere göre daha sıklıkla uygulamalarda kullanılır. Ayrıca performans ölçümlerinde de uygulanabilir. Diğer yandan, üretim faaliyetleri parametrik ve non-parametrik fonksiyonlarla ifade edilebilir. Bu nedenle, üretim fonksiyonu üretim sınırı olarak kabul edilir ve istatiksel sınır üretim fonksiyonun tanımlamak, inefektiflik-etkinlik oranının ekonometrik tahmin edilmesini sağlar [29].

3.2.2.1. Stokastik sınır fonksiyonu

Sınır üretim fonksiyonlarının tahmini, birçok farklı çalışmada ele alınmıştır [87,88].

Bu çalışmalar belirli girdilerin fonksiyonu olarak mümkün olan maksimum çıktığı veren bir fonksiyonu varsaymaktadır. Bu fonksiyon ise şöyle tanımlanmaktadır:

$$y_i = f(x_i; \beta) \quad (3.1)$$

Denklemdaki y_i , bağımlı değişkeni temsil etmektedir. Bunun yanında bağımsız değişkenleri (x_i) bir fonksiyon olarak modellemek için kullanılmaktadır. Bu tez çalışması için y_i yakıt tüketimini temsil etmektedir. Bu fonksiyon sayesinde, bağımsız değişkenlerin (x_i) (irtifa, FPA, hız, mesafe, N1, rüzgâr hızı, sıcaklık, dikey hız) etkisini, parametreler (β) aracılığıyla çıktı (y_i) üzerinde nasıl bir etki yarattığını ifade etmektedir. Burada, β parametreleri, yakıt akışının verimliliğini etkileyen faktörlerin (örneğin, irtifa, uçuş süresi, mesafe, FPA gibi) etkisini ölçmek için kullanılır.

β 'nın tahmini, bir endüstri içinde N firma kesitine dayalı olarak matematiksel programlama yöntemleriyle tahmin edilmektedir [88–90]. Bu durumda, minimize işlemi lineer veya karesel programlama yöntemiyle çözülebilir. Ancak, bu matematiksel programlamada bazı çözümler yetersizdir. Örneğin, aykırı değerlere duyarlılık olması, görülebilecek problemlerden biridir [91].

Denklem 3.1'e tek yönlü bir bozucu (ε_i) eklenerek yeni bir model ortaya konulmuştur [29]. Yeni model;

$$y_i = f(x_i; \beta) + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad \varepsilon_i \leq 0 \quad (3.2)$$

Bu doğrultuda gözlemlenen çıktı (yakıt tüketimi) bağımsız değişkenlerin bir fonksiyonu olarak modellenirken, tek yönlü bir bozucu terim (ε_i) modele eklenmesi sayesinde çıktıların sadece belirli bir düzeyde veya altında gerçekleşebileceğini varsayılır. Bu bozucu terim, gözlemlenen çıktının, potansiyel olarak ulaşılabilir maksimum çıktının altında kaldığını ifade eder ve bu terim daima sıfır veya negatif değer alır.

Bozulma terimi için bir dağılım varsayımı, Maksimum olabilirlik tahmini (MLE) kullanılması olasılığını sağlar. MLE, Aigner ve Chu tarafından belirli hata belirtileri

altında kullanılmıştır. Ayrıca Aigner, Amemiya ve Poirier, 1976'da makul bir hata yapısı oluşturmuşlardır [29]. Bu hata yapısı aşağıda verilmiştir:

$$\varepsilon_i = v_i - u_i \quad (3.3)$$

Modeldeki bozulma terimi (ε_i), iki bileşenli bir yapı olarak modellenmiş: Bu formülasyon, stokastik sınır analizinde teknik verimsizliği (u_i) ve rastgele hatayı (v_i) ayrı ayrı ele almayı mümkün kılmaktadır. Her bileşenin kendi dağılımını varsaymak ve bu bileşenler üzerinden MLE yöntemini kullanarak parametre tahmini yapmak, modelin doğruluğunu ve analitik kabiliyetini artırmaktadır.

u_i (Teknik Verimsizlik): Yalnızca pozitif değerler alır ve genelde yarı-normal veya eksponansiyel dağılım gibi tek taraflı dağılımlar kullanılmaktadır. Bu terim, işletmelerin veya uçuşların ideal koşullar altında elde edebilecekleri maksimum çıktıya ulaşmada gösterdikleri verimsizliği ifade etmektedir.

v_i (Rastgele Hata): Bu terim, ölçüm hataları, veri giriş hataları veya modelin kapsayamadığı diğer dışsal faktörlerden kaynaklanan rastgele varyasyonları ifade etmektedir. Genellikle normal dağılıma sahiptir ve hem pozitif hem de negatif değerler alabilir.

Ek olarak Aigner ve arkadaşları ile Van den Broeck tarafından da farklı bir hata yapısı önerilmiştir. Bu hata yapısına ait modeller aşağıdaki gibidir ve 3.3'teki modele dayanmaktadır:

$$\ln(y_i) = x_i\beta + v_i - u_i \quad i=1,2,3,\dots,N \quad (3.4)$$

Burada:

i : veri setindeki uçuş sayısı

y_i : i numaralı uçuşun yakıt akışı

x_i : i numaralı uçuşa ait bağımsız değişkenler matrisi (irtifa, FPA, hız, mesafe, N1, rüzgâr hızı, sıcaklık, dikey hız)

β : Bağımsız değişkenlerin etkilerini gösteren katsayılar vektörü

v_i : Rastgele hata terimi, her türlü kontrol edilemeyen durumların yol açtığı hata payını içerir

u_i : Teknik etkinsizlik terimi, durumu stokastik yapan ve ilgili birimin etkin olmama durumunu yansıtan rassal değişkendir.

Bu formül gösterimi, tüm bağımsız değişkenlerin bir vektör olarak birleştirildiği ve bu vektörün yakıt tüketimi üzerindeki etkilerinin topluca β vektörü ile ifade edildiği bir yapıyı temsil etmektedir.

Modeldeki v ile u birbirinden bağımsız olan rassal değişkenlerdir. Ayrıca denklemde yer alan u_i negatif olmayan rassal değişkendir ve etkinsizlik etkisi olarak adlandırılmaktadır. İlgilenilen birimin etkin olmama durumunu yansıtan bir değişkendir. Eğer $u = 0$ ise birim %100 etkin olarak kabul edilir. Eğer $u > 0$ ise o uçuşun belirli ölçüde etkinsiz olduğu sonucu çıkarılabilir. Meeusen ve Van den Broeck (1977) u 'yu üstel dağılımlı, Battese ve Corra (1977) ise yarı normal dağılımlı olarak ele almışlardır. Aigner ve arkadaşları (1977) ise her iki durumu da değerlendirmişlerdir. Karesel programlama ile de β parametresinin tahmin edilebileceğini ise Aigner ve Chu (1968) öne sürmüşlerdir. β 'yı düzelterek en küçük kareler (EKK) yöntemi ile tahmin etmeyi Richmond (1974) önermişken, u 'nun gamma dağılımına sahip olduğu durumda modeldeki parametreleri en çok olabilirlik (MLE) yöntemi ile tahmin edilmesini Afrait (1972) sağlamıştır. Fourier dönüşümlerini ise Tsionas (2012) MLE tahminini yardımıyla bulmuştur. Aigner ve Chu (1968), N tane firmayı içeren bir örnek veriyi kullanarak, Cobb-Douglas biçimine benzer bir parametrik sınır üretim fonksiyonunun tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur.

Bu model, bugün hâlâ geçerli olan ve istatistiksel sınır üretim fonksiyonu olarak adlandırılan bir fonksiyondur. İstatistiksel sınır üretim fonksiyonu, teknik verimliliği tahmin etmeye ve üretimi modellemeye yardımcı olur [92]. Denklem 3.4'te sunulan modelde iki bileşenli bir hata terimi vardır. Bu bileşenlerden biri rastgele etkileri temsil ederken, diğeri teknik verimliliği gösterir. Ayrıca "Burada y_i , i'nci uçuşun yakıt tüketimi miktarını temsil ederken, x_i bu uçuşun bağımsız değişkenler (irtifa, FPA, TAS, mesafe, N1, rüzgar hızı, sıcaklık, dikey hız) vektörünü ve β ise bu değişkenlerin yakıt tüketimi üzerindeki etkisini ölçen bilinmeyen parametrelerin vektörünü temsil eder.

Hata terimleri, $v_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_v^2)$ ve $u_i \sim |N(0, \sigma_u^2)|$ olarak dağıtılmıştır.

Bu modelde (3.4) y_i , x_i 'nin logaritması alınırsa Cobb-Douglas üretim fonksiyonu elde edilir. Ekonometrik modellerde lineer dönüşüm eğilimi avantajı nedeniyle Cobb-Douglas ve translog üretim fonksiyonları üretim fonksiyonu olarak kullanılır. Cobb-Douglas ve translog üretim fonksiyonları sırasıyla aşağıda verilmiştir:

$$\ln(y_i) = \beta_0 + \sum_{j=1}^N \beta_j x_{ijt} \quad (3.5)$$

$$\ln(y_i) = \beta_0 + \sum_{j=1}^N \beta_j x_{ijt} + \sum_{j=1}^N \beta_{jk} x_{ijt} x_{ikt} \quad (3.6)$$

Cobb-Douglas Üretim Fonksiyonu:

$$\ln(y_i) = \beta_0 + \sum_{j=1}^N \beta_j x_{ijt}$$

Burada $\ln(y_i)$, logaritmik yakıt tüketimini ifade etmektedir. β_0 sabit terimi, β_j ise bağımsız değişkenlerin (irtifa, hız, mesafe, FPA, vs.) yakıt tüketimi üzerindeki etkisini ölçen katsayılardır. x_{ijt} , t'inci zaman diliminde i'nci uçuşun j'nci bağımsız değişkenini göstermektedir.

Translog Üretim Fonksiyonu:

$$\ln(y_i) = \beta_0 + \sum_{j=1}^N \beta_j x_{ijt} + \sum_{j=1}^N \beta_{jk} x_{ijt} x_{ikt}$$

Bu denklemde, ilk terimler Cobb-Douglas modelini takip ederken, eklenen ikinci toplam formülü ile terim x_{ijt} ve x_{ikt} arasındaki etkileşim ifade edilmektedir. Bu, girdilerin birbirleri üzerindeki etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde modellemek için kullanılmaktadır.

Dikkat edilirse, denklemler (3.5) ve (3.6)'da t'inci zaman birimi indeks olarak verilmektedir. Zamanla değişen uçuşa ait etkilerin indeksi t ile modele eklenmektedir. Bu bağlamda, denklem (3.4) 'te verilen model diğer araştırmacılar tarafından değiştirilip genişletilmiştir. Bu model, zamanla değişen yakıt tüketiminin basit bir üstel tanımını içeren istatistiksel sınır üretim fonksiyonunu ve bir örnekteki N tane uçak için T zaman dilimi boyunca gözlemlerle ilgili panel verileri dikkate alır [29].

Bu şekilde denklem:

$$Y_{it} = x_{it}\beta + v_{it} - u_{it} \quad i = 1,2,3, \dots, N \quad t = 1,2,3, \dots, T \quad (3.7)$$

Burada Y_{it} , t 'inci zaman diliminde i 'nci uçuşun yakıt tüketimini ifade etmektedir. x_{it} , t 'inci zaman diliminde i 'nci uçuşun bağımsız değişkenlerinin $k \times 1$ vektörünü temsil etmektedir. β parametreleri, bu değişkenlerin etkisini ölçmektedir. $v_{it} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_v^2)$ rastgele hata terimi, ölçüm hatalarını ve kontrol edilemeyen diğer faktörlerden kaynaklanan hataları ifade ederken, $u_{it} = (u_i \exp(-\eta(t - T)))$, i 'nci uçuşun zamanla azalan teknik verimsizliğini gösterir. u_i teknik verimsizliği hesaba katar ve negatif olmayan bir rastgele değişken olarak tanımlanır. Teknik verimsizlik terimi u_{it} veya u_i modelde negatif olmayan bir rastgele değişken olarak tanımlanmalıdır. Çünkü bu terim, uçuşun ideal yakıt tüketim performansından ne kadar sapma gösterdiğini ölçmektedir. Bu sapma, ideal duruma kıyasla fazladan yakıt tüketimi anlamına gelmektedir. Bu yüzden, teknik verimsizlik değeri her zaman pozitif veya sıfır olmalıdır. Eğer negatif bir değer alırsa, bu teorik olarak mümkün olan en iyi durumdan daha iyi bir performans sergilendiği anlamına gelir ki, bu da stokastik sınır analizi bağlamında mantıklı değildir.

Bu bilgiler ışığında sabit parametreyi içeren stokastik sınır modeli aşağıdaki gibi olmaktadır [86]:

$$\ln(y_i) = \beta_0 + x_i\beta - u_i + v_i, \quad i=1,2,\dots,N \quad (3.8)$$

Denklem 3.8'deki bu eşitlik stokastik sınır üretim fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır. Bu fonksiyon sayesinde çıktı değerleri stokastik değişken olan $e^{x_i\beta + v_i}$ tarafından üstten sınırlandırılmış olur.

$\ln(y_i)$: i numaralı uçuşun logaritmik çıktısını temsil etmektedir. Burada (y_i) yakıt tüketimini ifade etmektedir.

β_0 : Sabit terim

x_i : i numaralı uçuş için bağımsız değişkenlerin (örneğin, irtifa, hız, mesafe, FPA, vs.) vektörüdür

β : Bağımsız değişkenlerin çıktı üzerindeki etkisini ölçen parametrelerin vektörüdür

u_i : Teknik verimsizlik terimi, gözlemlenen çıktının potansiyel çıktıya göre ne kadar düşük olduğunu gösterir. u_i her zaman pozitif ya da sıfır olur ve çıktının potansiyel maksimumundan sapmasını ifade etmektedir.

v_i : Rastgele hata terimi, model dışı faktörlerden kaynaklanan sapmaları temsil eder ve normal dağılım izlemektedir.

Yapılan tanımlamalardan yararlanılarak yakıt tüketiminin teknik etkinliği aşağıda verilen oranlama ile elde edilebilir:

$$TE_i = \frac{y_i}{e^{x_i\beta}} = \frac{e^{x_i\beta - u_i}}{e^{x_i\beta}} = e^{-u_i} \quad (3.9)$$

Denklem 3.9’te verilen oran $[0,1]$ aralığında değerler almaktadır. Denklemden de anlaşılacağı üzere teknik etkinlik hesaplamasından önce denklem 3.9’te verilen β parametre vektörünün tahmin değerlerinin elde edilmesi gerekmekte olup bunun için doğrusal programlama yöntemi kullanılabilir. Ancak bunu için $\min \sum_{i=1}^N u_i$ ve $u \geq 0$, $i=1,2,\dots,N$ gibi bazı kısaltmalar söz konusudur [86].

Bu çalışmada geliştirilen modelin teknik etkinliği (TE), bağımsız değişkenlerin (örneğin irtifa, hız, mesafe, yol uçuş açısı, rüzgâr hızı, sıcaklık vb.) dikkate alınarak her bir uçuşun yakıt akışına etkisinin incelenmesine dayanır. Bu, örneklem kümesindeki uçuşların birbiriyle kombinasyonunun yapılmasıyla en verimli uçuşun belirlenmesini sağlamaktadır.

Yapılan çalışmada geliş prosedüründeki uçuşların yakıt akışı ve diğer değişkenlerin etkinliği SSA yöntemiyle incelenmektedir. SSA yönteminde literatür incelendiğinde birçok farklı fonksiyon kullanılmaktadır:

- Cobb-Douglas üretim fonksiyonu
- Translog üretim fonksiyonu
- Doğrusal üretim fonksiyonu (Ağırlıklı regresyon)
- Logaritmik doğrusal üretim fonksiyonu
- CES tipi (Sabit Esnekliğine sahip) üretim fonksiyonu
- Zellner-Revenar genel üretim fonksiyonu

Fakat bunlardan en çok Cobb-Douglas ve Translog fonksiyonu ise yaygın olarak tercih edilmektedir [93]. Bu tez çalışmasında, kolay uygulama ve yorumlama özellikleri nedeniyle Cobb-Douglas üretim fonksiyonu kullanılmıştır ve Cobb-Douglas üretim sınırı tahmin edilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

a) Cobb-Douglas(C-D) üretim fonksiyonu:

Ekonometri, İşletme ve İktisat gibi alanlarında yoğun olarak kullanılan C-D üretim fonksiyonu, Neoklasik iktisadi akımın temsilcilerinden olan Cobb ve Douglas tarafından oluşturulmuştur.

Temel olarak doğrusal fonksiyonun logaritması alınarak Cobb-Douglas fonksiyonu elde edilmektedir. Stokastik sınır analizi için kullanılan Cobb-Douglas üretim fonksiyonuna ait denklem aşağıdaki gibidir [94]:

$$\ln(y_{it}) = \beta_0 + \sum_{j=1}^N \beta_j x_{it} \quad (3.10)$$

Burada:

y_{it} : i'inci uçuş ve t'inci zaman dilimindeki yakıt akışı miktarı

x_{it} : i'inci uçuş ve t'inci zaman dilimindeki irtifa, hız, mesafe gibi uçuş değişkenlerini kapsamaktadır.

β_i : Her bir değişkenin yakıt akışı üzerindeki etkisini ölçen parametre

N : Toplam gözlem sayısı

olarak açıklanmaktadır.

Cobb-Douglas üretim sınırını formülü ise aşağıdaki gibi açıklanabilir [95]:

$$q_i = \exp(\beta_0 + \beta_1 \ln x_i) * \exp(v_i) * \exp(-u_i) \quad (3.11)$$

$\exp(\beta_0 + \beta_1 \ln x_i)$: Belirli bir irtifaya, hıza, mesafeye bağlı ideal yakıt tüketimini temsil eder. Bu, modelin verilerde gözlemlediği temel ilişkiyi yansıtmaktadır.

$\exp(v_i)$: Rassal hata

$\exp(-u_i)$: Etkinsizlik

b) Translog üretim fonksiyonu:

Cobb-Douglas(C-D) üretim fonksiyonun genelleştirilmiş bir modeli olarak 1973 yılında oluşturulmuştur. Denklemin açıklayıcı değişkenlerinin kareleri ve çarpımlarının modelden çıkarılması sonucu Cobb-Douglas üretim fonksiyonu elde edildiği için C-D'ye göre daha genel bir fonksiyondur [93]. Bu fonksiyonda girdiler modele alınırken hem birbirleriyle tek tek çarpılmakta hem de her birinin karesi hesaplanmaktadır. Kısaca Translog üretim fonksiyonunda değişkenlerdeki doğrusal olmayan kısımların da dikkate alınması (eğrisel kısımlardaki veriler de dikkate alınarak) nedeniyle bu üretim fonksiyonu daha genelleştirilmiş bir fonksiyon olarak karşımıza çıkmaktadır. Translog fonksiyonun bu esnekliği nedeniyle de çalışmalarda yer almaktadır.

SSA için genelleştirilmiş translog üretim fonksiyonu [94] :

$$\ln(y_{it}) = \beta_0 + \sum_{j=1}^N \beta_j x_{jit} + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \beta_{jk} x_{jit} x_{kit} \quad (3.12)$$

Burada:

y_{it} : i numaralı uçağın t zaman dilimindeki yakıt akışını

x_{jit} ve x_{kit} : i numaralı uçağın t zaman dilimindeki bağımsız değişkenlerin değerlerini ifade etmektedir. j ve k, irtifa, hız, mesafe, uçuş yol açısı (FPA), rüzgâr hızı, sıcaklık, dikey hız gibi değişkenleri

β_j : her bir bağımsız değişkenin tek başına etkisini

β_{jk} : değişkenler arası etkileşimleri

N : uçuş sayısını

temsil etmektedir.

3.2.4. Model seçim kriterleri

Bu çalışmada, 42 farklı uçuş için yakıt akışı açısından en uygun uçuşu belirlemek amacıyla çeşitli istatistiksel model seçim kriterleri kullanılmıştır. Öncelikle, modellerin uyumunu ve karmaşıklığını dengelemek için Akaike Bilgi Kriteri (AIC) değerlendirilmiştir. AIC, modelin log-likelihood (logaritmik benzerlik) değeri ve modeldeki parametre sayısını dikkate alarak en düşük AIC değerine sahip modeli

seçmemize olanak tanımaktadır. Modelin veriye ne kadar iyi uyduğunu değerlendirmek için Log-Likelihood (Log L) değerleri kullanılmıştır. Ayrıca, modelin genel performansını ve genelleme yeteneğini ölçmek için çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır. Artık kareler toplamı (SSE), modelin tahmin ettiği yakıt akışı değerleri ile gerçek değerler arasındaki farkları değerlendirirken, R^2 ve düzeltilmiş R^2 değerleri, modelin bağımlı değişkenin toplam değişkenliğini ne kadar açıkladığını ve modelin karmaşıklığına göre bu açıklama gücünü ayarlayarak değerlendirilmesini sağlamıştır.

3.2.4.1. Akaike bilgi kriteri (AIC)

Model seçim kriterleri arasında yer alan Akaike Bilgi Kriteri (Akaike Information Criterion-AIC) bir dizi aday model arasından model seçimi için kullanılan yaygın bir kriterdir. Bilgi kriterleri alanındaki ilk kriter olan AIC, modele eklenen değişkenlerin yarattığı yükseltme etkisine sınırlama getirmesi için düzenlenmiş bir kriterdir. Modele eklenen değişkenlerin oluşturduğu farklı modelleri i indisi ile ifade ettiğimizde,

$$AIC_i = \log(\hat{\sigma}_i^2) + \frac{2k_i}{n} \quad (3.13)$$

n : Gözlem sayısı

k_i : Parametre sayısı

olarak hesaplanmaktadır. Burada yer alan ' $\hat{\sigma}_i^2$ ' En Çok Benzerlik Yöntemi ile,

$$\hat{\sigma}_i^2 = \frac{SSE_i}{n} \quad (3.14)$$

n : Gözlem sayısı

k_i : Parametre sayısı

SSE_i : i 'inci modelin hata kareler toplamı

olarak tahmin edilmekte ve anakütle hata terimi varyansının sapmasız tahmincisini ifade etmektedir [96]. Formülde yer alan $\frac{2k_i}{n}$ ifade ise ceza (penalty) faktörüdür [97].

Formül bu şekilde düzenlendiğinde,

$$AIC = -2 \log(L) + 2k \quad (3.15)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada yer alan L (likelihood) benzerliği, k sabit parametre dahil modeldeki parametre sayısını göstermektedir.

Akaike bilgi kriteri, değişken sayısı farklı olan birçok modelde rahatlıkla kullanılabilen bir model seçme kriteridir. Yuvalanmış ve yuvalanmamış modellerde, gecikmeli modellerde uygun gecikme uzunluğunun belirlenmesinde kullanılan AIC, tüm model seçim kriterleri arasında öne çıkmaktadır. Model karşılaştırmalarında tahmin edilen her model için hesaplanan AIC değerlerinde, minimum AIC değerine sahip olan model tercih edilmektedir [57]. AIC'nin bazı özellikleri, model karşılaştırmaları yapılırken, en düşük AIC değerine sahip olan model genellikle en uygun model olarak seçilmesi ve kullanılan örneklem büyüklüğü için değil, aynı zamanda bu örneklem dışında gelecekteki veri tahminleri için de geçerli olması şeklinde sıralanabilir [97].

Çalışmada elde edilen düşük AIC değerleri, diğer modellere göre daha iyi uyum sağlayan modelleri göstermektedir. Model seçimi sorusu hem AIC değerlerini hem de araştırma sorusunun bağlamını dikkate alarak belirlenmiştir.

Yapılan veri düzenleme ve uygulama yöntemi adımları değerlendirildiğinde giderek artan uçak trafiğinin uçuş operasyonlarına olumsuz etkilerinin araştırılması konusunda kullanılacak yöntemlerin durum tespiti ve farkındalığı yapabilmek için önemli olduğu görölmektedir. Uçakların rotalarında en uygun değerlerle uçuşlarını gerçekleştirebilmesine olanak sağlamak için uçakların sistemlerinden elde edilen verilerin en uygun şekilde analiz edilmesi ve öneriler geliştirilebilmesi sayesinde uçuş operasyonlarında karşılaşılabilecek olumsuz etkilerinde (gecikme vb.) en aza indirilebilmesine olanak sağlayabilecektir. Bulgular bölümünde, veri setinde yapılan düzenlemeler sonucunda belirlenen değişkenlerin yapılan analizlerde yakıt akışı üzerindeki etkileri açıklanmıştır.

4. BULGULAR

Bu çalışmada, SAW'a iniş için yaklaşmakta olan 42 farklı uçuşun 24.000 feet irtifadan 3000 feet'e kadar alçalmasına imkân tanıyan geliş prosedüründeki alçalma profilleri incelenmiştir. Bu irtifa aralığı, SAW'a iniş trafiklerinin terminal kontrol sahasına giriş noktasının ve son yaklaşma noktasının irtifa değerleri ile büyük oranda örtüşmektedir.

Yakıt tüketimi sütunları, indeks sütunları ve veri temizliği sonucu çıkarılan sütunlar hariç tüm sütunlar (69 adet) olası açıklayıcı olarak LASSO ile analiz edilmiştir. Bu aşama için yazılan LASSO kodu EK-3'te sunulmuştur. LASSO regresyonu ile yapılan analiz sonucunda belirlenen açıklayıcı değişkenler Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1. LASSO yöntemiyle belirlenen değişkenler

Değişken Adı	Tanımlayıcı Kodu
Uçuş Süresi	x6
İrtifa	x9
FPA	x11
1 Numaralı motor yakıt akışı	x12
2 Numaralı motor yakıt akışı	x13
Ortalama yakıt akışı	x14
Yer hızı	x15
TAS	x16
Düzeltilmiş hava hızı	x17
Pist başına olan mesafe	x18
Pist konma noktasına olan mesafe	x19
Toplam yakıt miktarı	x27
1 Numaralı motor fan hızı N1	x51
2 Numaralı motor fan hızı N1	x52
MACH sayısı	x63
Rüzgâr hızı	x66
Sıcaklık	x72
Dikey hız (ROD)	x88

Çalışmada alçalma profilindeki uçakların yakıt akışının incelenmesi nedeniyle bağımlı değişken yakıt tüketimi olarak ele alınmıştır. Veri setinde birinci motorun, ikinci motorun ve her iki motorun ortalama yakıt tüketimleri mevcuttur. Literatür incelendiğinde benzer değerler

içeren bu tüketim verilerinden birinin tercih edilmektedir. Bu nedenle ‘x12’ olarak isimlendirilen birinci motor yakıt tüketimi bağımlı değişken olarak ele alınmıştır. 1 numaralı motora ait yakıt akış değeri analizde kullanıldığından, ikinci motora ait yakıt akışı (x13) ve her iki motora ait yakıt tüketimi ortalaması (x14) analize dahil edilmemiştir. Yer hızı (x15) ve düzeltilmiş hava hızı (x17) ise x16’nın (hakiki hava hızı) analize dahil edilmesi nedeniyle analizden çıkarılmıştır. Ayrıca, yüksek irtifalarda uçakların hız ayarlamalarında kullanılan MACH sayısının da (x63) hız ile doğrudan ilişkisi olması nedeniyle analizden çıkarılmasına karar verilmiştir. Benzer şekilde, pist başına olan mesafe (x18) ve pist konma noktasına olan mesafe (x19) birbirleriyle örtüşen değerler olduğundan, (x19) analizden çıkarılmıştır.

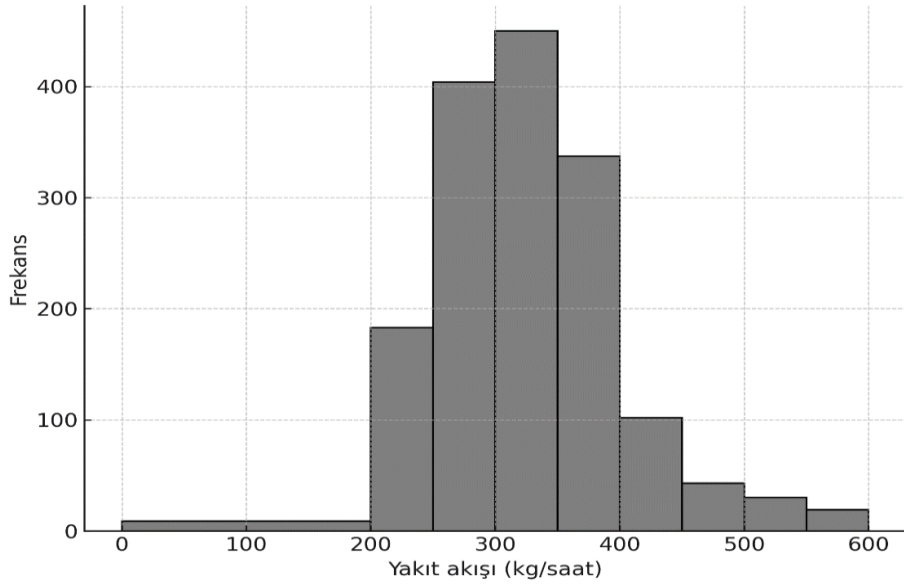
4.1. Panel Veri Bulguları

Verilerin düzenlenmesi sonucu elde edilen 11 sütun için minimum, maksimum, ortalama, medyan ve çeyreklik (1. çeyrek, 3. çeyrek) değerleri verilmiştir (Tablo 4.2).

Tablo 4.2. Değişken yayılım tablosu

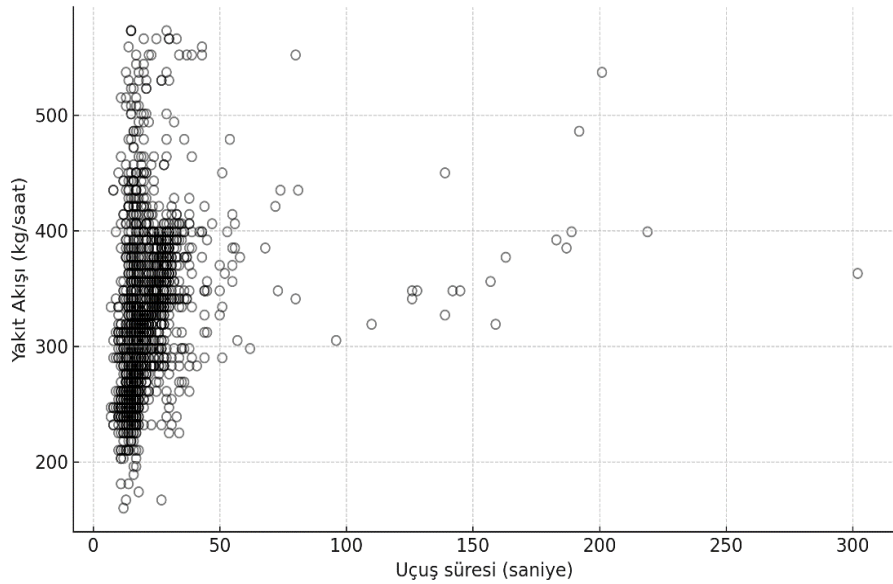
Değişken	Min.	1.Çeyrek	Ortanca	Ortalama	3.Çeyrek	Maks.
Uçuş süresi	7,00	15,00	18,00	22,45	25,00	302,00
İrtifa	3000	8500	13500	13408	18500	24000
FPA	0,350	2,810	3,160	3,107	3,520	7,380
1 numaralı motor yakıt akışı	160,0	276,0	327,0	329,3	370,0	573,0
TAS	182,0	269,0	325,0	318,1	365,0	464,0
Pist başına olan mesafe	8,05	38,89	61,23	61,31	80,86	159,17
Toplam yakıt miktarı	2685	3211	3465	3500	3774	4772
1 numaralı motor dönüş hızı (N1)	28,40	30,60	32,40	33,56	34,10	64,40
Rüzgâr hızı	0,00	8,00	13,00	14,89	19,50	55,00
Sıcaklık	-24,66	-10,42	0,030	-0,7859	8,83	23,63
Dikey hız (ROD)	-4112	-1984	-1680	-1669	-1248	-224

Tablo 4.2’ye göre model değişkenleri incelendiğinde verilerin simetrik olup olmadığı değerlendirilmiştir. Çeyrekler açıklığı (IQR) ya da maksimum ve minimum değerleri kullanılarak yayılım hakkında da bilgi edinilmiştir. Ek olarak standart sapmadan da yararlanılmıştır. Ayrıca Jarque-Bera testi ile normallik sınaması yapılmıştır.



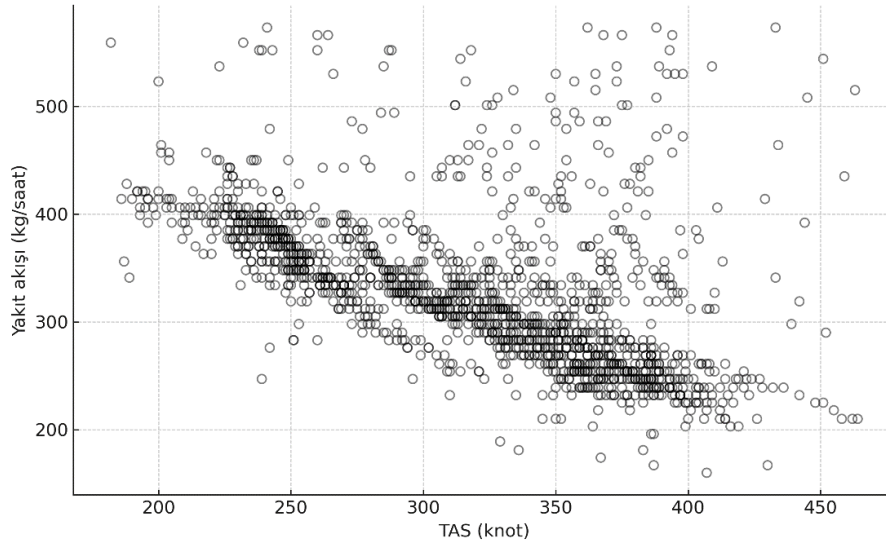
Şekil 4.1. Yakıt akışı histogramı

Şekil 4.1, yakıt tüketim aralığının yığıldığı değerleri göstermektedir. En yoğun değerlerin 300 ila 400 aralığında toplanmış olduğu görülmektedir. Şekil 4.2’de kullanılan değişkenlerden uçuş süresinin, yakıt akışı ile ilişkisi görülmektedir.



Şekil 4.2. Yakıt akışı-uçuş süresi nokta grafiği

Şekil 4.2'ye göre uçuş süresi ile yakıt akışı arasındaki ilişki değerlendirildiğinde, ilişkinin pozitif yönlü güçlü olduğu görülür. Uçuş süresindeki artış yakıt akışında da doğrusal bir artışa neden olmaktadır. Veri setindeki uçuşlara ait uçuş süreleri alçalış esnasında 500'er feetlik aralıklar için hesaplandığından (örneğin 24.000 feet 23.500 feet irtifaya kadar geçen süre) grafikte yakıt akışı için aynı süreler içerisinde doğrusal bir grafik elde edilmiş olması beklenen bir durumdur.

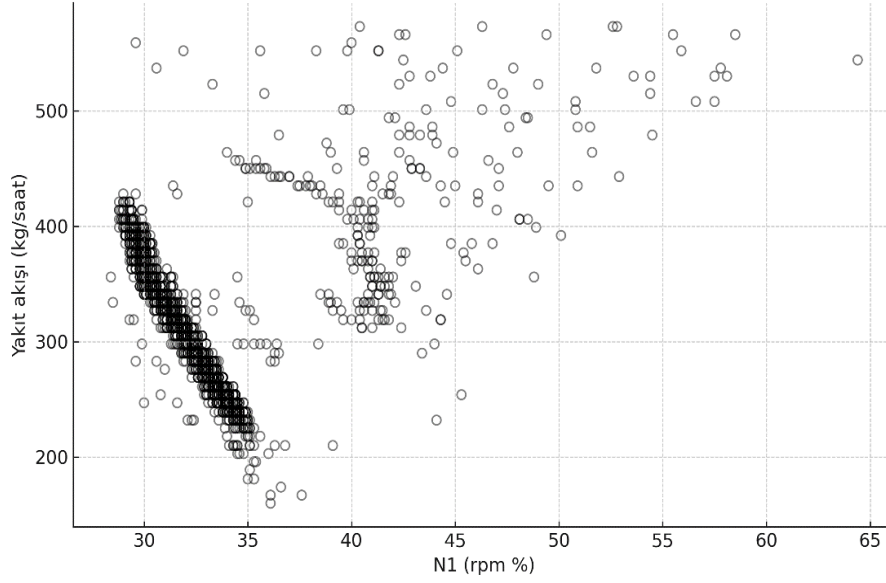


Şekil 4.3. Yakıt akışı-TAS nokta grafiği

Şekil 4.3'e göre, TAS ile yakıt akışı arasındaki ilişkiyi değerlendirirken, hızın 182 knot ile 269 knot arasında olduğu düşük hız aralığında yakıt akışının genellikle daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, düşük hızlarda uçağın daha fazla yakıt tüketmesiyle açıklanabilir. Çünkü bu hızlarda uçak motorları optimum verimlilikte çalışmayabilir. Verilere göre, medyan hız değeri 325 knot ve ortalama hız 318,1 knot olarak hesaplanmıştır. Bu hızlar, yakıt akışının düşmeye başladığı hız aralığını göstermektedir. Bu hızlar civarında uçak daha stabil ve aerodinamik bir uçuş profiline giriyor olması nedeniyle yakıt verimliliği artmaktadır.

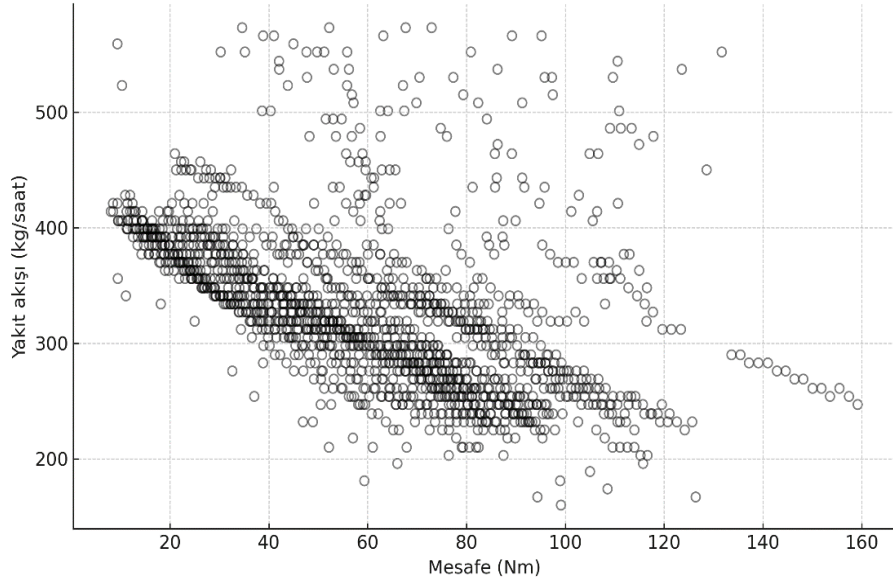
Hızın 365 knot ile 464 knot arasında olduğu durumda, yakıt akışının daha da düştüğü gözlemlenmiştir. Bu, beklenen bir durumdur çünkü yüksek hızlarda uçakların yüksek irtifalarda daha aerodinamik verimlilik kazanması (hava yoğunluğunun düşmesi ile) gibi sebeplerle daha az yakıt tüketmesi mümkündür. Ancak, çok yüksek hızlarda,

artan direnç nedeniyle yakıt akışı tekrar artabilir. Gözlemlenen genel trend, hız arttıkça yakıt akışının azaldığını göstermektedir. Ancak bu ilişki tamamen lineer değildir ve belirli hız aralıklarında değişkenlik gösterebilir.



Şekil 4.4. Yakıt akışı- N1 nokta grafiği

1 numaralı motorun dönüş hızı (N1) ile yakıt akışı arasındaki ilişki Şekil 4.4'te sunulmuştur. Grafiğe ve tanımlayıcı istatistik değerlerine göre dağılımın çarpık olduğu, saçılımın ise üst üçgensel bölgede gruplandığı görülmektedir. N1 için 45 ve üzeri değerlerin veri setindeki dağılımdan farklı olduğu görülmektedir. 35'e kadar ise net bir negatif ilişkinin olduğu gözlenmiştir. 35-45 arasında ise negatifikten söz edilebilse de ilişkinin bir önceki grup kadar keskin olmadığı ifade edilebilir.



Şekil 4.5. Yakıt akışı-mesafe nokta grafiği

Mesafe-yakıt akışı ilişkisini gösteren Şekil 4.5 incelendiğinde, mesafenin azalmasıyla beraber yakıt akışının artma eğilimi olduğu görülmektedir. Bu durum, özellikle pist başına olan uzaklık azaldıkça uçakların daha düşük irtifalarda uçuşuyla ve uçağın daha az aerodinamik hale gelmesiyle açıklanabilir. Ayrıca bu durum daha verimsiz bir uçuş profilini işaret etmektedir.

4.1.1. Rassal etkiler model bulguları

LASSO yöntemi ve uzman görüşüyle seçilmiş olan değişkenlerle kurulan rassal etkili regresyon model sonuçları bu bölümde ele alınmıştır.

Tablo 4.3. Rassal etkili model girdi değerleri

Dengesiz Panel	n=42	T=24-43	N=1577
----------------	------	---------	--------

Tablo 4.3'e göre toplam gözlem sayısı (n) 42 olup, toplam satır sayısı (N) 1577'dir. Bazı uçuşlara ait aykırı değerlerin veri setinden çıkarılmasının ardından, T değeri 24 ile 43 arasında değişmiştir. Bu nedenle veri seti dengesiz panel verisidir.

Tablo 4.4. *Rassal etkili model etki sonuçları*

Etki Türü	Varyans	Standard Sapma	Varyans Oranı
Özgün	471,080	21,704	0,944
Bireysel	27,852	5,277	0,056

Bu modelin Tablo 4.4'e göre etkiler değeri dikkate alındığında özgün etkilerin değeri 471,080, standart sapması 21,704 olması nedeniyle toplam varyansın %94,4'ünün açıklandığı görülmüştür. Bireysel etkilerin ise varyansının 27,852, standart sapması 5,277 nedeniyle varyansın %5,6'sını açıkladığı görülmüştür.

Theta terimi, özellikle modelin hata bileşenlerinin yapılarını ve bireysel etkilerin önemini vurgulamak için faydalı olduğundan bu çalışmada değerler hesaplanarak Tablo 4.5'teki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.5. *Rassal etkili model theta değerleri*

Theta	
Ölçüm	Değer
Minimum	0,3570
1. Çeyrek	0,4346
Ortanca	0,4500
Ortalama	0,4442
3. Çeyrek	0,4596
Maksimum	0,4687

Tablo 4.5'teki theta değeri, bireysel varyansın toplam varyans içindeki oranını temsil etmektedir. Genellikle, theta değeri 0'a yakınsa, bu durum sabit etkiler modelinin daha uygun olabileceğini göstermektedir. Çünkü bu durum, uçuşlar arası varyansın toplam varyans içindeki payının çok düşük olduğunu ifade eder. Eğer theta 1'e yakınsa, bu durumda rassal etkiler modelinin uygun olduğunu, çünkü uçuşlar arası varyansın toplam varyansta büyük bir paya sahip olduğunu gösterir. Tablo 4.5'teki theta değerleri incelendiğinde değerlerin 0,3570 ile 0,4687 arasında değiştiği gözlenmektedir. Bu

durum, uçuşlar arasında varyansın var olduğunu ancak toplam varyansın büyük bir kısmını oluşturmadığı şeklinde yorumlanabilir. Ancak bu değerlerin analiz için ne anlama geldiğini daha iyi değerlendirmek için ek bilgilere ve model karşılaştırmalarına ihtiyaç duyulabilir. Örneğin, sabit etkiler modeli ile karşılaştırma yapmak, hangi modelin veri setinize daha iyi uyduğunu değerlendirmeye yardımcı olur.

Tablo 4.6. *Rassal etkili model artıkları sonuçları*

Artıklar	
Ölçüm	Değer
Minimum	-132,319
1. Çeyrek	-4,658
Ortanca	0,729
Ortalama	-0,004
3. Çeyrek	6,172
Maksimum	209,270

Tablo 4.6'daki artık analizin sonuçlarına göre model ile tahmin edilen değerler ve gerçek veri değerleri arasındaki fark sunulmuştur. Artık analizi modelin başarısını ifade etmektedir. Artık değeri ne kadar küçük ise modelin veriye o kadar uyduğu söylenebilir. Tablo 4.6'ya göre artıkların büyük çoğunluğu -4,658 ile 6,172 arasında bir değer almaktadır. Bu durum, modelin çoğu tahmininin gerçek değerlere yakın olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.7. *R², düzeltilmiş R² ve Ki-kare test sonuçları*

Ölçüm	Değer
Toplam kareler toplamı	7478300
Artık kareler toplamı	745810
R ²	0,90027
Düzeltilmiş R ²	0,89957
Ki-kare (x ²)	13614,3
Serbestlik derecesi	11
P-değeri	< 2,22e-1

Tablo 4.7’de gösterilen R^2 ve düzeltilmiş R^2 istatistikleri, modelin uyumunu ölçmek için kullanılan istatistiklerdir. Tablo 4.7’ye göre R^2 0,90027 ve düzeltilmiş R^2 0,89957’dir. Bu değerler, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenin varyansının %90’ını açıkladığını göstermektedir. Analizlerde ANOVA (Varyans analizi) yapılarak, sonuçları modelin genel yeterliliğinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Burada ki-kare değeri 13614,3 ve p değeri $<2,22e-16$ ’dır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde model istatistiksel olarak anlamlıdır. Bağımsız değişkenlerin yakıt akışı üzerindeki etkisinin veya modelde önerilen ilişkilerin güçlü ve belirlenen veriler tarafından desteklendiğini göstermektedir.

Tablo 4.8. Rassal etkili model katsayıları

Katsayılar	Tahmin	Std. Hata	Z-değeri	Pr(> z)	Anlamlılık [#]
Sabit Değer	1,4597e+02	1,5105e+01	9,6602	$< 2,2e-16$	****
Uçuş süresi	7,1048e-02	3,3746e-02	2,1054	0,0352606	*
İrtifa	-1,2139e-02	8,9851e-04	-13,5098	$< 2,2e-16$	****
FPA	-9,6007e+00	2,6703e+00	-3,5953	0,0003240	****
TAS	-3,8528e-01	3,9601e-02	-9,7293	$< 2,2e-16$	****
Pist başına olan mesafe	-1,013e+00	3,0207e-01	-3,3529	0,0007998	****
Toplam yakıt miktarı	-3,1567e-03	2,6741e-03	-1,1805	0,2378125	
İnumaralı motor dönüş hızı (N1)	1,4123e+01	1,5624e-01	90,3917	$< 2,2e-16$	****
Rüzgâr hızı	7,6377e-02	7,6693e-02	0,9959	0,3193095	
Sıcaklık	-7,8019e-01	3,8473e-01	-2,0279	0,0425728	*
Dikey hız (ROD)	-1,7410e-02	5,0528e-03	-3,4456	0,0005698	*****

[#]: 0 ‘****’ 0.001 ‘***’ 0.01 ‘**’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘.’ 1

Tablo 4.8’deki anlamlılık sütunu, her bir bağımsız değişkenin modeldeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirtmektedir. Düşük p-değerleri ($<0,05$) değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ifade eder.

Tablo 4.8’deki model katsayıları incelendiğinde sabit değer, tüm bağımsız değişkenler sıfır olduğunda bağımlı değişkenin değerini temsil eder. Bu modelde sabit terim 145,97 olarak tahmin edilmiştir. Bu, tüm bağımsız değişkenler sıfır olduğunda, yakıt akışının beklenen değerinin yaklaşık 145,97 olduğu anlamına gelmektedir.

Tablo 4.8’ye göre yakıt akışıyla ilişkili olan değişkenlerin sonuçları değerlendirildiğinde uçuş süresinin etkisi istatistiksel olarak anlamlı ($p = 0,035$) olup,

pozitif bir ilişkiye sahiptir. Bu noktada uçuş süresindeki artış yakıt tüketimini arttırmaktadır. İrtifanın yakıt akışı üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, istatistiksel olarak son derece anlamlı bir sonuç elde edilmiştir ($p < 2,2e-16$) ve irtifa ile yakıt akışı arasında negatif bir ilişki bulunmaktadır. FPA ile yakıt akışı ilişkisi de istatistiksel olarak son derece anlamlıdır ($p = 0,000324$) ve bu iki değişken arasında negatif bir ilişki vardır. TAS'ın yakıt akışı üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, bu etkinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($p < 2,2e-16$) ve negatif bir ilişkiye sahip olduğu görülmektedir. Mesafenin etkisi de istatistiksel olarak anlamlıdır ($p = 0,0008$) ve negatif bir ilişkiye sahiptir. N1 ile yakıt akışı arasındaki ilişki analiz edildiğinde, bu ilişkinin istatistiksel olarak son derece anlamlı ($p < 2,2e-16$) ve pozitif olduğu görülmektedir. Rüzgâr hızının etkisi değerlendirildiğinde ise, sonuç istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p = 0,319$), bu çalışmada rüzgâr hızının yakıt akışı üzerinde belirgin bir etkisi gözlemlenmemiştir. Sıcaklığın etkisi ise istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p = 0,043$) ve pozitif bir etkiye sahiptir. Dikey hızın (ROD) etkisi değerlendirildiğinde, bu etkinin istatistiksel olarak anlamlı ($p = 0,00057$) ve negatif bir ilişkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Genel olarak rassal etkiler modeliyle yapılan analiz sonucu elde edilen katsayıların çoğu istatistiksel olarak anlamlı olarak elde edilmiştir. Elde edilen veriler, yakıt akışını hangi değişkenlerin nasıl etkilediğini açıklamada önemli bilgiler sağlamaktadır.

4.1.2. Sabit etkiler model bulguları

LASSO yöntemi ve uzman görüşüyle seçilmiş olan değişkenlerle kurulan sabit etkili regresyon model sonuçları bu bölümde ele alınmıştır.

Tablo 4.9. Sabit etkili model girdi değerleri

Dengesiz Panel	n=42	T=24-43	N=1577
-----------------------	------	---------	--------

Tablo 4.3'e göre toplam gözlem sayısı (n) 42 olup, toplam satır sayısı (N) 1577'dir. Bazı uçuşlara ait aykırı değerlerin veri setinden çıkarılmasının ardından, T değeri 24 ile 43 arasında değişmiştir. Bu nedenle veri seti dengesiz panel verisidir.

Tablo 4.10. Sabit etkili model artıkları sonuçları

Artıklar	
Ölçüm	Değer
Minimum	-132,71856
1. çeyrek	-4,31220
Ortanca	0,62992
3. çeyrek	5,68951
Maksimum	204,7001

Tablo 4.10'daki artık analizinin sonuçlarına göre model ile tahmin edilen değerler ve gerçek veri değerleri arasındaki fark sunulmuştur. Artık analizi modelin başarısını ifade etmektedir. Artık değeri ne kadar küçük ise modelin veriye o kadar uyduğu söylenebilir.

Sabit etkiler modeline göre Tablo 4.10'da elde edilen değerler incelendiğinde, artıkların değerleri en düşük -132,71856 ve en yüksek 204,7001 arasında değişmektedir. Bu, bazı tahminlerde modelin gerçek değerlerden önemli ölçüde sapabileceğini göstermektedir. Ancak, artıkların çoğunluğu daha dar bir aralıkta (-4,31220'den 5,68951'e) bulunmuştur. Bu analize göre elde edilen medyan değeri 0,62992'dir, bu da çoğu atığın hafif pozitif olduğunu göstermektedir. Bu durumda, model çoğu tahminde gerçek değerlere yakın tahminler gerçekleştirmektedir. Ancak bazı uç durumlarda önemli sapmaların olabileceği düşünülmelidir.

Tablo 4.11. R^2 , düzeltilmiş R^2 ve F-testi sonuçları

Ölçüm	Değer
Toplam kareler toplamı	6951600
Artık kareler toplamı	717930
R^2	0,89672
Düzeltilmiş R^2	0,8932
F-testi	1202,97
Serbestlik derecesi	11 / 1524
P-değeri	< 2,22e-16

Seçilen değişkenlerde kurulan sabit etkiler modelinin Tablo 4.11'deki sonuçları değerlendirildiğinde, 0,8967'lik yüksek R^2 değerinin de gösterdiği gibi iyi bir uyuma sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca düzeltilmiş R^2 değeri olan 0,8932 de bağımsız

değişkenlerin birlikte yakıt akışı dağılımının yaklaşık %89,32'sini açıkladığını göstermektedir. Bu değer modelin oldukça iyi olduğunu ifade eder. Modelin anlamlılığını değerlendirmek içinse F-testi yapılmıştır. Buradaki F testi, modelin bağımsız değişkenlerinin, modelin açıklamadığı varyansa kıyasla yakıt akışında ne kadar dağılım açıkladığını göstermektedir. F-testi ' $<2,22.10^{-16}$ ' p-değeri ile oldukça anlamlıdır ve bu da genel regresyon modelinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.12. Sabit etki model katsayıları

Katsayılar	Tahmin	Std. Hata	t-değeri	Pr(> t)	Anlamlılık [#]
Uçuş süresi	0,0785256	0,0337546	2,3264	0,0201294	*
İrtifa	-0,0146201	0,0011126	-13,1408	< 2,2e-16	***
FPA	-10,211978	2,8700748	-3,5581	0,0003850	***
TAS	-0,3902128	0,0464403	-8,4025	< 2,2e-16	***
Pist başına olan mesafe	-1,4944570	0,4695848	-3,1825	0,0014895	**
Toplam yakıt miktarı	-0,0812737	0,0283171	-2,8701	0,0041596	**
1 numaralı motor dönüş hızı (N1)	14,1515602	0,1619591	87,3774	< 2,2e-16	***
Rüzgâr hızı	0,1267095	0,0862585	1,4690	0,1420525	
Sıcaklık	-1,5887652	0,4499269	-3,5312	0,0004261	***
Dikey hız (ROD)	-0,0181249	0,0053817	-3,3679	0,0007763	***

[#]: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tablo 4.12'de verilen SEM model sonucunun katsayıları değerlendirildiğinde, uçuş süresi istatistiksel olarak anlamlı ($p = 0,0201$) ve pozitif ilişkiye sahiptir. Bu, uçuş süresinin uzaması ile yakıt akışının arttığını gösterir. İrtifa etkisi, istatistiksel olarak son derece anlamlıdır ($p < 2,2e-16$), dolayısıyla irtifa arttıkça yakıt akışının düştüğü sonucuna varılabilir. FPA değerlendirildiğinde istatistiksel olarak son derece anlamlıdır ($p = 0,000385$) ve yakıt akışıyla negatif ilişkiye sahiptir. TAS etkisi de istatistiksel olarak son derece anlamlıdır ($p < 2,2e-16$) ve negatif ilişki vardır. Mesafenin etkisi de istatistiksel olarak anlamlı ($p = 0,00149$) ve negatif ilişkiye sahiptir. Toplam yakıt miktarı rassal etkili modelde anlamsız bulunmuşken SEM'de katsayısı 0,01 düzeyinde istatistiksel olarak anlamlıdır ve yakıt akışının varyasyonunun bir kısmını açıklayabilmektedir. 1 numaralı motorun dönüş hızı (N1) istatistiksel olarak son derece anlamlı olup ($p < 2,2e-16$) yüksek derecede pozitif ilişkiye sahiptir. Bu modelde rüzgâr hızı katsayısı rassal etki modeline göre istatistiksel olarak anlamlı değildir ($p > 0,05$), bu da rüzgâr hızının bu model için

yakıt tüketimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmayabileceğini göstermektedir. Sıcaklık etkisi de istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p = 0,000426$). Dikey hız (ROD) etkisi de istatistiksel olarak anlamlıdır ($p = 0,000776$) ve negatif etkiye sahiptir.

4.2. SSA Etkinlik Bulguları

Yapılan çalışmada 42 farklı SSA'nın AIC değerleri elde edilerek, uçuşlar sıralanmıştır. Uçuşların AIC değerleri karşılaştırıldığında ise 24 numaralı uçuşun AIC değeri en düşük değer olarak hesaplanmıştır. Bu değer sayesinde bu uçuşun en iyi modellemeyi sunan uçuş olduğu bulunmuştur. Bunun yanı sıra, SSA ile elde edilen teknik etkinlik tablosu da değerlendirildiğinde 24 numaralı uçuş en etkin uçuş olarak hesaplanmıştır. Bu noktada çalışmada 42 uçuş için elde edilen AIC değerleri tablo 4.13'te verilmiştir.

Tablo 4.13. AIC değerleri

Uçuş Numarası	AIC Değeri	Uçuş Numarası	AIC Değeri
1	250,9384	12	275,0655
2	376,7691	13	263,5515
3	340,7721	14	239,7537
4	309,9583	15	402,0328
5	368,7369	16	241,2486
6	356,7633	17	311,6595
7	290,0319	18	269,7051
8	240,2123	19	352,7283
9	235,8620	20	342,9471
10	333,9283	21	223,4073
11	391,0243	22	333,0117
23	302,0219	34	235,2052
24	136,0375	35	288,7752
25	166,1921	36	284,0812
26	360,6956	37	250,3452
27	224,0327	38	212,0710
28	321,5855	39	317,6180
29	369,9558	40	327,6149
30	227,8921	41	335,0815
31	367,3064	42	250,2181
32	288,7190		
33	312,1482		

Verilen AIC deęerleri listesi incelendięinde, 24. modelin 136,0375 ile en dūřuk AIC deęerine sahip olduęunu görülmektedir. Bu nedenle, 24 numaralı uęuř, listelenen modeller arasında en iyi sonuca sahip model olarak kabul edilmiřtir.

Teknik etkinlik analizi için, stokastik sınır modelinin panel veri analizi yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla, 42 uğuşa dair, 24.000 feet irtifadan 3000 feet irtifaya kadar 500'er feet aralıklarla toplam 43 farklı irtifa oluşturulmuştur. SSA için belirlenen değişkenlerle model kurularak 42 farklı uğuş içinde ayrı ayrı SSA analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu analizler sonucu 42 uğuş için teknik etkinlik skorları elde edilerek tablo haline getirilmiştir. Yapılan analiz değerlendirildiğinde SSA yöntemiyle 42 uğuştan en etkili uğuşun 24 numaralı uğuş olduğu hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuç AIC değerine göre seçilen modelinde 24 numaralı uğuş olması sayesinde analizlerin doğruluğunu teyit etmektedir. 24 numaralı uğuşun hem AIC değerine göre en iyi model hem de SSA ile elde edilen teknik etkinliğe göre en etkin uğuş olması nedeniyle sonuç bölümünde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Tablo 4.14. Teknik etkinlik skorları

Uçuş Numarası	Etkinlik	Uçuş Numarası	Etkinlik
24	0,7422748	28	0,6658118
9	0,7416764	23	0,6614382
27	0,7305487	22	0,6584732
42	0,7254260	26	0,6577952
17	0,7253648	11	0,6574923
1	0,7244457	25	0,6571474
16	0,7190834	19	0,6563261
4	0,7161742	31	0,6539108
37	0,7161229	6	0,6450164
18	0,7134871	36	0,6414602
41	0,7054611	33	0,6035837
14	0,6984619	3	0,5998260
34	0,6982356	8	0,5807891
38	0,6978091	15	0,5741488
21	0,6920531	35	0,5681973
39	0,6899653	29	0,5584333
2	0,6878448	13	0,5476694
7	0,6798324	12	0,5319866
32	0,6796497	5	0,5149043
10	0,6758989	20	0,5067514
40	0,6722834	30	0,4746404

Analiz sonucu elde edilen teknik etkinlik skorları, bir uçuşun teorik olarak mümkün olan en verimli duruma ne kadar yakın olduğunu göstermektedir. Etkinlik skorları 0 ile 1 arasında değişen değerler almaktadır. Tablo 4.14’te ‘1’ e yakın olan değerler tam etkinliği ifade ederken, ‘0’ tam verimsizliği temsil etmektedir.

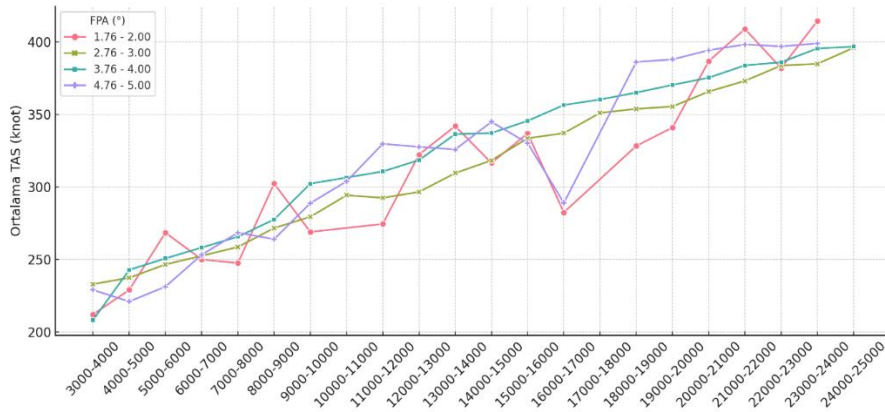
Tablo 4.14’te listelenen uçuş numaraları ve karşılık gelen etkinlik değerlerine bakarak, genel olarak uçuşların çoğunun yüksek etkinlik skorlarına sahip olduğu gözlemlenmektedir. Etkinlik skorları 0,5’in üzerinde, çoğunlukla 0,6 ve 0,7 aralığında yer almaktadır. Ancak, 0,5’ten daha düşük skorlar, belirli uçuşların teorik kapasiteye göre daha az verimli olduğunu göstermektedir. İlk sıralarda yer alan uçuşlar (örneğin; 24, 9, 27 gibi), 0,74 civarında oldukça yüksek etkinlik değerlerine sahiptir. Bu durum, bu uçuşların operasyonel olarak oldukça verimli gerçekleştiğini gösterir. Daha düşük skorlara sahip uçuşlar ise (örneğin 30,20 gibi) iyileştirilmesi gereken alanları işaret

etmektedir. Bu sayede bu uçuşların operasyonlarında verimliliği artırmak için yakıt akışının azaltılması ve optimizasyonu, aerodinamik verimliliği arttıracak şekilde uçuş prosedürlerinde irtifalara göre hız ve FPA'ların belirlenmesi gibi odaklanılması gereken noktalar belirlenerek uçuşların daha etkin şekilde gerçekleştirilmesi sağlanabilir.

42 farklı uçuş için verilmiş olan teknik etkinlik tablosu, otokorelasyon gibi tanısal kontrol aşamalarından geçirilmiş olan model için değişkenlerin potansiyel bir ilişkisi varsa bunun yönünü keşfetmek amacıyla belirlenmiş teknik etkinlik değerlerini içermektedir. Genel olarak, bu tablo üzerinden yapılabilecek stratejik kararlar ve iyileştirmeler için daha düşük skorlara sahip uçuşların analizi yapılabilir.

Örneğin, Tablo 4.14'te elde edilen teknik etkinlik skorlarına göre etkin olan uçuş verileri incelendiğinde yüksek TAS değerlerinde daha yüksek FPA değerleri daha az yakıt akışı sağlamaktadır. Yüksek hızlarda düşük FPA değerleri ise yakıt akışını arttırmaktadır.

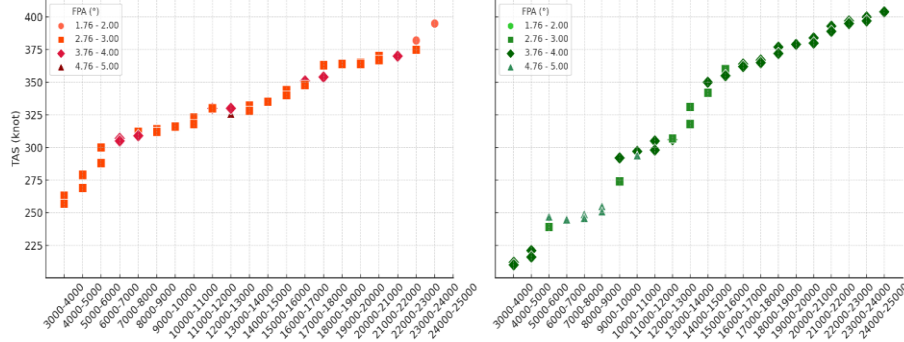
Bu bağlamda ilk olarak FPA'ya bağlı TAS ve irtifa ilişkisi Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. İrtifa-TAS-FPA ilişkisi

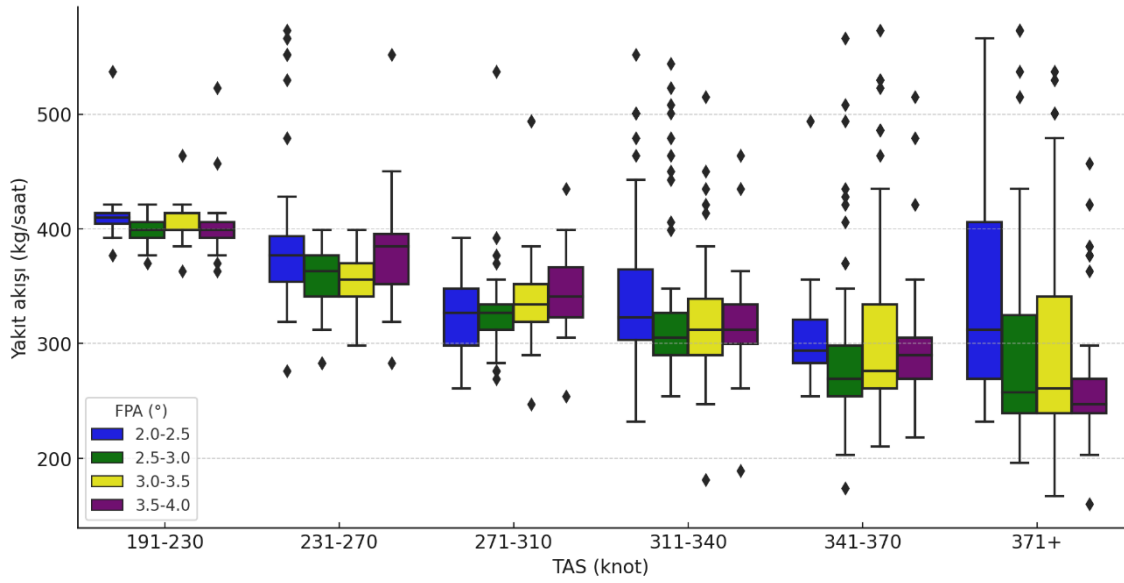
Analizlere göre, irtifa arttıkça TAS'de belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Belirlenen her bir FPA aralığı için farklı irtifa segmentlerindeki TAS eğilimlerini ortaya koymaktadır. Aynı irtifa segmentlerine göre uçuşlar değerlendirildiğinde FPA'daki artışla birlikte daha yüksek TAS'a doğru bir eğilim olduğu görülmektedir. Daha yüksek irtifa segmentleri için FPA'lar değerlendirildiğinde (18.000 feet ve üzeri), aynı irtifa kategorisi içinde FPA'nın TAS üzerindeki etkisi daha net görülmeye başlanmıştır. Bu seviyeler

değerlendirildiğinde daha yüksek FPA'nın daha yüksek TAS anlamına geldiği görülmektedir.



Şekil 4.7. Teknik etkinlik skoruna göre seçilmiş uçuşlar için İrtifa-TAS-FPA ilişkisi

Şekil 4.7'ye göre uçuş 5 (turuncu) ve uçuş 9 (yeşil) için yapılan dağılım grafiği değerlendirildiğinde daha yüksek FPA'nın daha yüksek TAS anlamına geldiği görülmektedir. Bu sayede daha yüksek FPA'ların (3,76-4,00, 4,76-5,00 gibi), uçuş hızlarında daha fazla artış sağladığı ve bu durumunda yakıt akışının azalmasına etki etmesi durumunu desteklemektedir. Yapılan analizlerle birlikte Şekil 4.7 ayrıntılı olarak değerlendirildiğine uçuş 5'in en çok '2,76- 3,00' FPA kategorisinde uçuş gerçekleştirdiği görülmektedir. Uçuş 9 ise en çok '3,76- 4,00' FPA kategorisinde uçuş gerçekleştirmiştir. Uçuş 5'in en çok uçuş gerçekleştirdiği '2,76-3,00' FPA kategorisindeki ortalama hızı (TAS) 327,68 knot iken, uçuş 9'un en çok uçuş gerçekleştirdiği '3,76-4,00' FPA kategorisindeki ortalama hızı (TAS) ise 341,64 knot'tır.



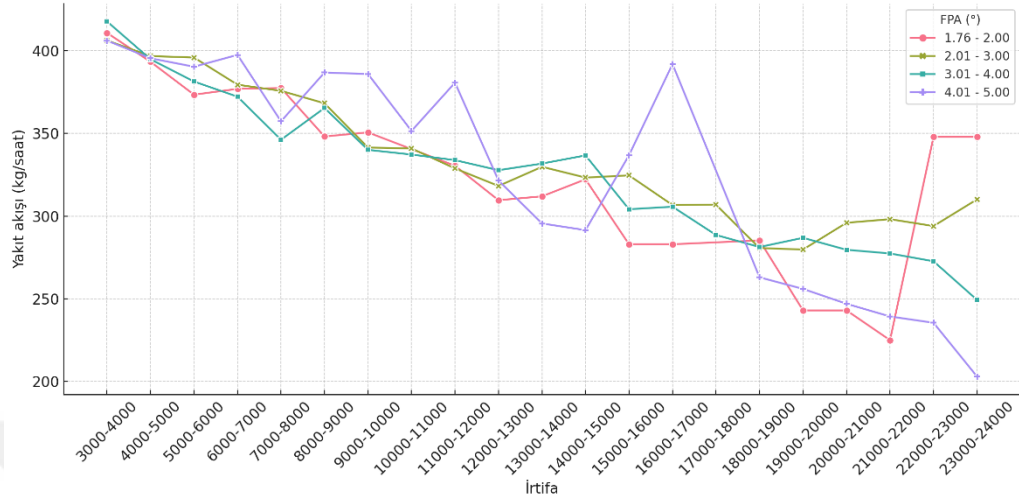
Şekil 4.8. Yakıt akışı-TAS-FPA ilişkisi

Şekil 4.8, farklı FPA'lar için TAS'ın yakıt akışı üzerindeki etkilerini göstermektedir. TAS verileri 40 knot aralıklarla gruplandırılmıştır. TAS gruplarına göre analiz yorumlandığında uçuş hızı arttıkça, artan FPA ile yakıt akışında bir azalma gözlemlenmiştir. Bu sonuç, daha yüksek FPA'ların daha yüksek hava hızlarına ve dolayısıyla daha yüksek iniş hızlarına yol açtığını ve böylece yakıt akışını azaldığını göstermektedir. Özellikle yüksek hızlara çıkıldıkça, düşük FPA değerlerinin yüksek yakıt akışına neden olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 4.14, belirlenen FPA aralıklarına göre tüm veri setinde yakıt akışı ve TAS'ın nasıl değiştiğini ve bu değerlerin varyansını göstermektedir. Tablo 4.15 her bir FPA aralığı için yakıt akışı ve TAS değişkenlerinin ortalama değerleri ile standart sapmalarını özetlemektedir.

Tablo 4.15. Yakıt akışı-TAS-FPA ilişkisi

FPA Aralığı	Yakıt Akışı(kg/saat)	Yakıt Akışı Standart Sapma Değeri	TAS (knot)	TAS Standart Sapma Değeri
2,0-2,5	360,14	65,87	286,98	51,43
2,5-3,0	321,46	64,82	319,10	54,62
3,0-3,5	321,04	69,79	332,25	50,22
3,5-4,0	306,09	64,73	338,61	60,84

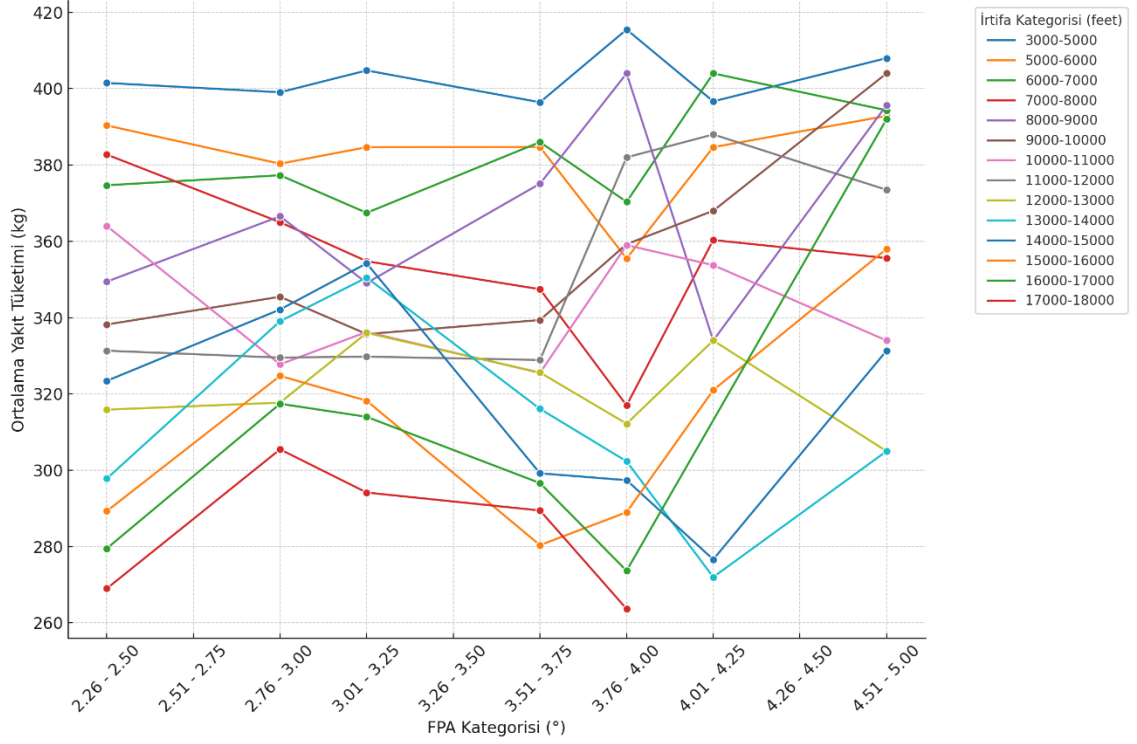
Tablo 4.15'e göre de yüksek FPA aralıklarında, yakıt akışı ortalamasının azaldığını ve TAS ortalamasının arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9. Yakıt akışı-irtifa-FPA ilişkisi

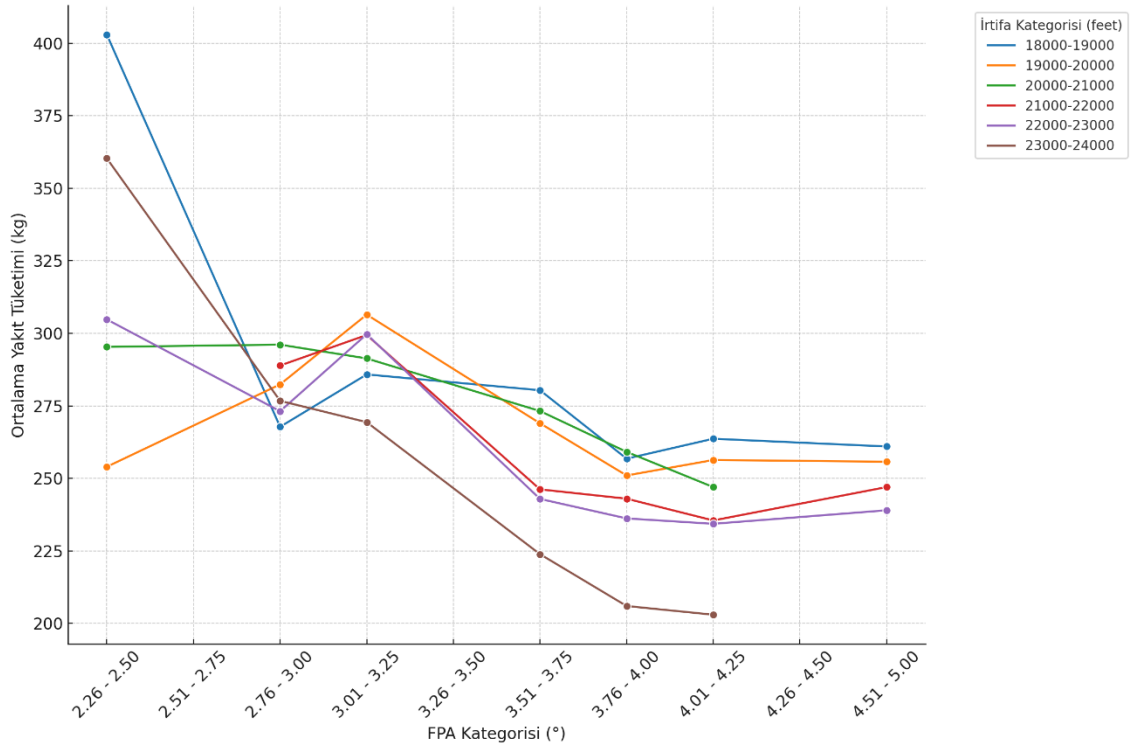
Şekil 4.9'e göre, irtifa arttıkça yakıt akışının genel eğilimi azalma yönündedir; ancak belirli noktalarda artışlar gözlemlenmektedir. Yakıt akışı farklı FPA kategorilerine göre değerlendirildiğinde, FPA kategorileri arasında belirgin farklar olduğu görülmektedir. Daha yüksek FPA değerlerine sahip uçuşlarda, yakıt akışı genellikle 18.000 feet irtifaya kadar daha yüksek seviyelerde seyretmektedir. Bu irtifadan sonra ise, daha yüksek FPA ve irtifalarda yakıt akışının azaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle 2,01-3,00 ve 3,01-4,00 FPA kategorilerinde yakıt akışının genellikle daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, bu açı aralıklarındaki uçuşların daha verimli olabileceğini göstermektedir. FPA'ların etkisini daha iyi analiz edebilmek için FPA kategorileri 0,25

derecelik açılara bölünmüş ve genel grafikte yakıt tüketim değişikliğinin başladığı 18.000 feet irtifadan itibaren veriler ikiye ayrılarak grafikler oluşturulmuştur.



Şekil 4.10. 3000-18.000 feet aralığında yakıt akışı-FPA-irtifa ilişkisi

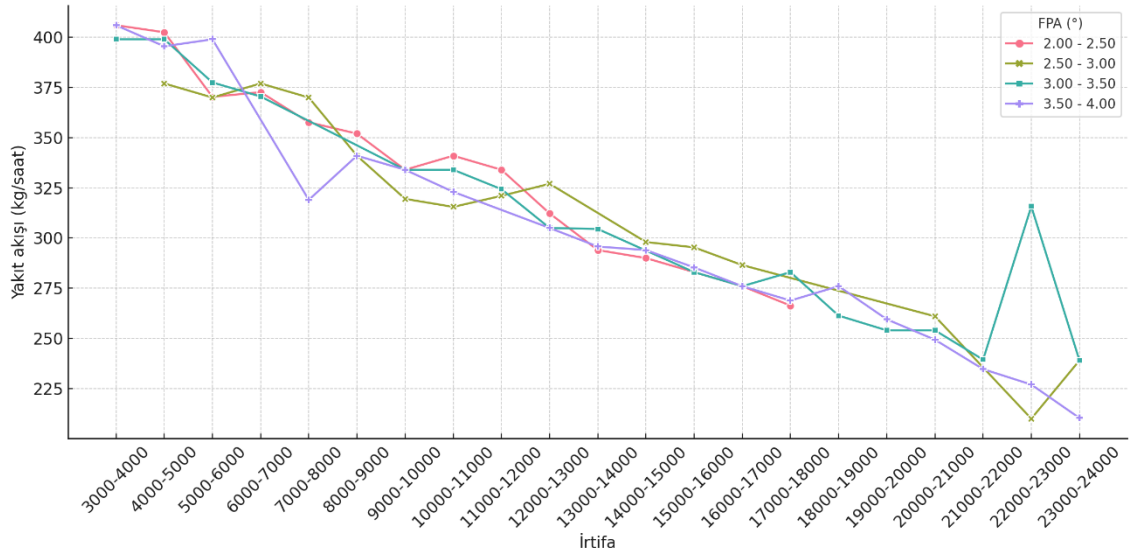
Şekil 4.10 incelendiğinde, 3000-18.000 feet aralığındaki irtifalar için FPA kategorilerine göre ortalama yakıt akışının dağılımı görülmektedir. FPA değerleri arttıkça (sağa doğru), irtifanın da artmasıyla birlikte ortalama yakıt akışında belirgin bir azalma gözlemlenmektedir. En düşük yakıt akışı ise 17.000 feet irtifada 3,76° ve 4,00° FPA kategorilerinde kaydedilmiştir. Analizlere göre, düşük irtifalarda (3000-18.000 feet) en düşük yakıt akışının görüldüğü FPA aralıkları 3,01-3,25 (339,25 kg/saat) ile 3,51-4,00 (335,65 kg/saat) olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.11. 18.000-24.000 feet aralığında yakıt akışı-FPA-irtifa ilişkisi

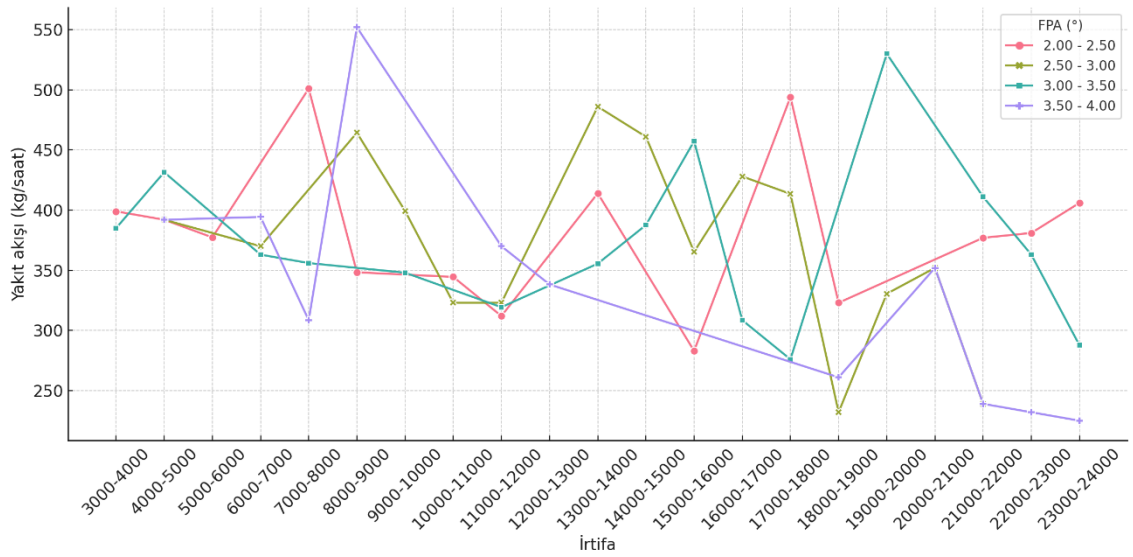
Şekil 4.11, 18.000-24.000 feet aralığındaki irtifalar için FPA kategorilerine göre ortalama yakıt akışını göstermektedir. Şekil 4.13'e göre, FPA değeri arttıkça ortalama yakıt akışında belirgin bir azalma gözlemlenmektedir. Bu analizlere göre, daha yüksek FPA ve yüksek irtifalarda daha verimli yakıt akışı sağlandığı görülmektedir. Yüksek irtifalarda (18.000-24.000 feet) en düşük yakıt tüketimi ise 3,76-4,00 FPA aralığında yaklaşık 210 kg/saat olarak belirlenmiştir.

Her iki grafik de FPA değerleri arttıkça yakıt akışının azaldığını ve daha yüksek irtifalarda genellikle daha düşük yakıt akışı olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlara dayanarak, yakıt tüketimini azaltmak için düşük irtifalarda (3000-18000 feet) FPA'yı 2,76-4,00 aralığında tutmak yakıt tüketimini azaltabilir. Yüksek irtifalarda (18000-24000 feet) ise FPA'yı 3,01-4,00 aralığında tutmak yakıt tüketimini azaltabilir olarak görülürken, özellikle 3,76-4,00 aralığında en düşük tüketim gözlemlenmiştir.



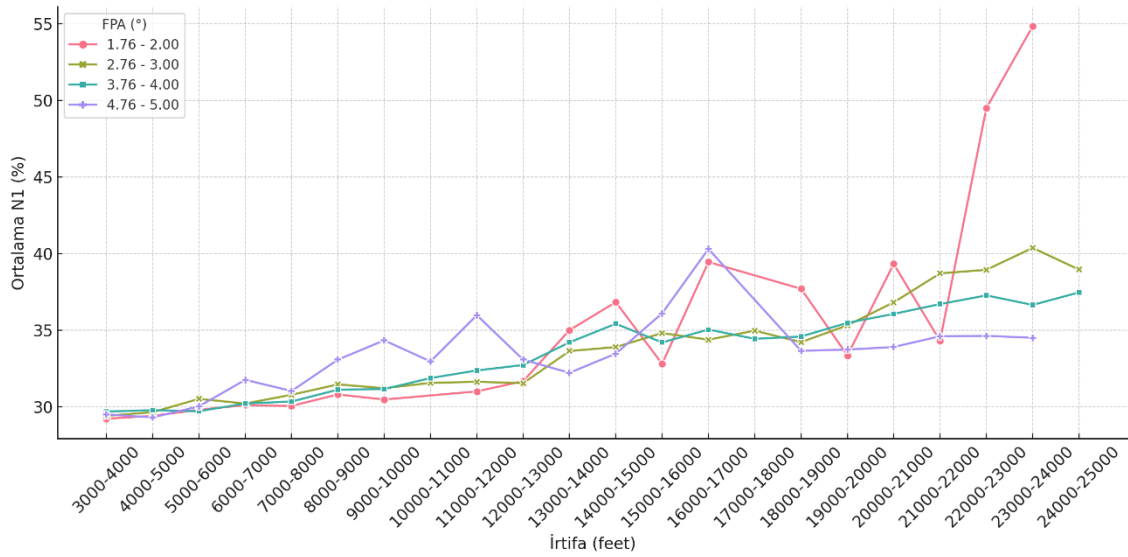
Şekil 4.12 Etkin (uçuş 24,9,27,42,17) uçuşların irtifaya bağlı yakıt akışı-FPA ilişkisi

Şekil 4.12'e göre etkin uçuşların,10.000-15.000 feet arasında FPA dağılımının 2,50-3,00 ve 3,00-3,50 dereceler arasında değiştiği görülmektedir. Bu irtifalar dikkate alındığında, belirlenen FPA'lar ile etkin uçuşlar daha az yakıt akışı gerçekleştirmiştir. 15.000-20.000 feet aralığında ise bu uçuşların 3,00-3,50 ve 3,50-4,00 FPA değerleriyle alçalışta oldukları görülmüştür. Nispeten daha yüksek irtifalarda yüksek FPA değerlerinin yakıt akışını daha fazla düşürdüğü görülmektedir.



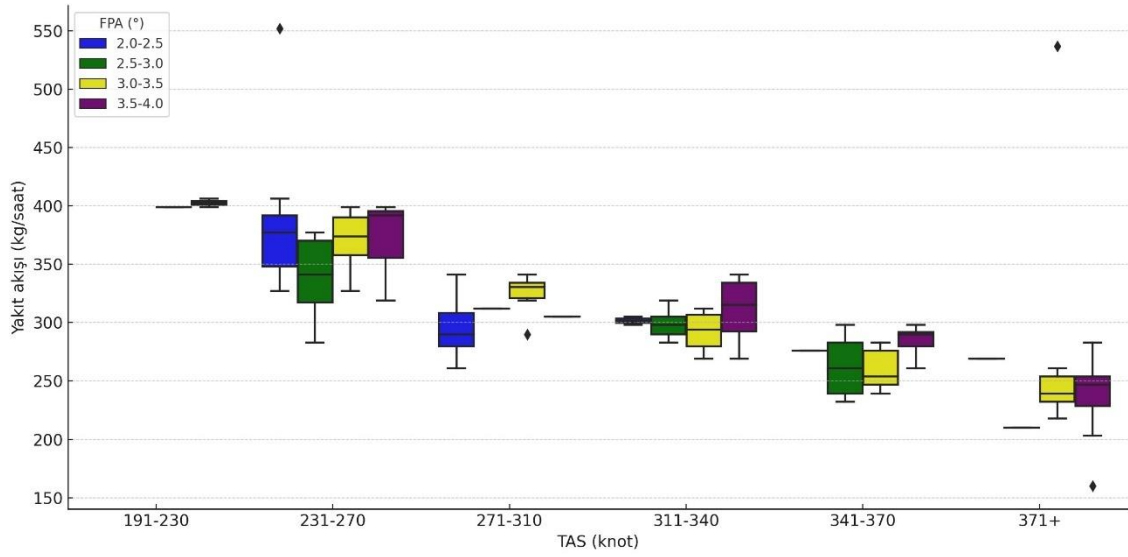
Şekil 4.13. Etkin olmayan (20,5,12,13,29) uçuşların irtifaya bağlı yakıt akışı-FPA ilişkisi

Şekil 4.13'te görülen etkin olmayan uçuşlarda ise 10.000-15.000 feet aralığında FPA dağılımının 3,00-3,50 ve 3,50-4,00 arasında olduğu görülmektedir. Etkin olan uçuşlara göre değerlendirildiğinde aynı irtifalarda etkin olmayan uçuşların daha yüksek FPA'larda alçalış yaptığı belirlenmiştir. 15.000-20.000 feet aralığında ise FPA dağılımının 2,00-2,50 ve 2,50-3,00 arasında değiştiği görülmektedir. Etkin olan uçuşlara göre bu irtifa aralıklarındaki FPA değerleri de daha düşük olması nedeniyle daha fazla yakıt akışına neden olmuştur.



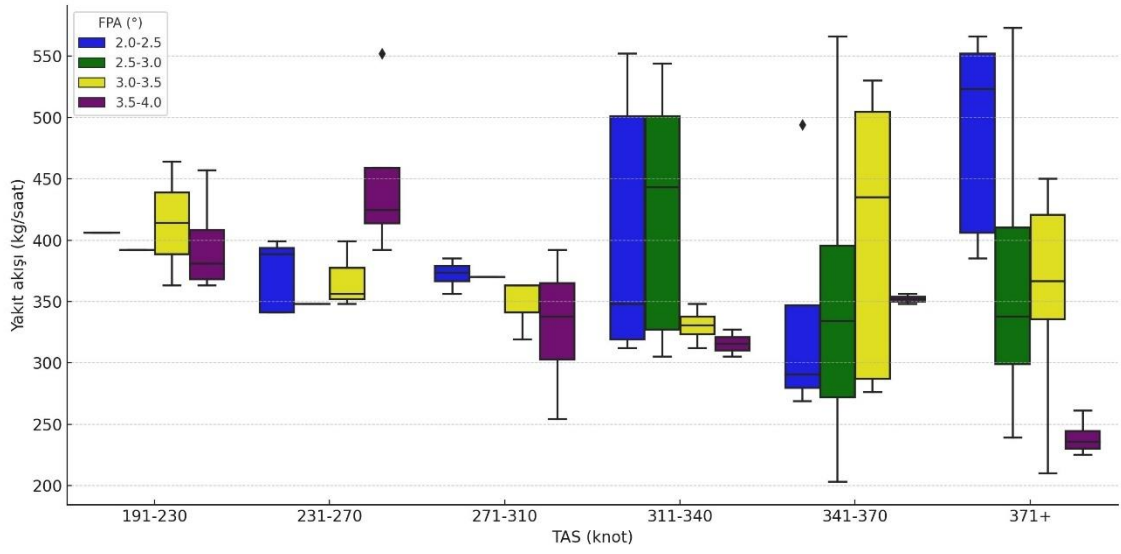
Şekil 4.14. İrtifa-N1-FPA ilişkisi

Şekil 4.14'e göre, N1 motor fan hızı, genellikle daha yüksek irtifalarda artma eğilimindedir. Düşük irtifa değerlerinde yüksek FPA değerlerine (3,76-4,00 ve 4,76-5,00) sahip uçuşlarda N1 motor devir hızı genellikle daha yüksek olarak görülmektedir. Düşük FPA değerlerinde (1,76-2,00) ise N1 motor fan hızı nispeten daha düşük seviyelerde gözlemlenmektedir. İrtifa arttıkça, özellikle 8000 feet sonrasında, N1 motor fan hızı daha belirgin artışlar göstermektedir.



Şekil 4.15. Etkin uçuşların FPA'ya bağlı yakıt akışı-TAS ilişkisi

Şekil 4.15, en etkin uçuşlar olan 24, 9, 27, 42, 17'nin belirlenen FPA'lara bağlı olarak yakıt akışı ve TAS arasındaki ilişkisini göstermektedir. Etkin uçuşlar için yakıt akışı, TAS ve FPA kategorileri arasında belirgin bir ilişki gözlemlenmektedir. Bu uçuşlar genellikle daha düşük TAS aralıklarında, daha düşük FPA'larla alçalmıştır. Daha yüksek TAS'larda ise daha yüksek FPA açılarıyla alçalış gerçekleştirmişlerdir. Etkin uçuşlar için yapılan analizde, hız aralıklarına göre FPA ve yakıt akışı ilişkisi incelenmiştir. Şekil 4.15 incelendiğinde 191-230 knot aralığında, daha düşük FPA değerlerinde (2,0-2,5 derece) yakıt akışı genellikle daha düşüktür, ancak 3,5-4,0 derece FPA değerlerinde yakıt akışı artmaktadır. 231-270 knot aralığında uçuşların daha çok 2,5-3,0 derece FPA değerleriyle alçaldığı belirlenmiş olup, yakıt akışının diğer FPA değerlerine göre daha düşük seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Aynı hız aralığı için 3,5-4,0 derece FPA değerlerinde yakıt akışı artış göstermektedir.



Şekil 4.16. Etkin olmayan uçuşların FPA'ya bağlı yakıt akışı-TAS ilişkisi

Şekil 4.16 ise en az etkin olan 20, 5, 12, 13, 29 numaralı uçuşların FPA değerlerine bağlı yakıt akışı ve TAS arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Etkin olmayan uçuşlar için yapılan analizde 231-270 knot aralığı için değerlendirildiğinde, yüksek FPA değerlerinde (3,5-4,0 derece) yakıt akışı artmakta ve uçuşlar daha çok bu FPA değerleriyle alçalmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Sabiha Gökçen Havalimanı'nda uygulanan geliş prosedürlerinin yakıt tüketimi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada LASSO yöntemiyle yakıt akışıyla ilişkisi olabilecek değişkenler seçilmiştir. Panel veri analizi yöntemiyle yakıt akışını etkileyen değişkenlerin yakıt akışıyla ilişkilerinin analizi sağlanmıştır. Stokastik Sınır Analizi (SSA) yöntemi kullanılarak yapılan bu analizde, uçuş verileri uçuş veri kaydedicisinden (FDR) alınan gerçek zamanlı verilerle değerlendirilmiştir. Geliş prosedürlerinde kullanılan Toplama Noktası Sisteminin (PMS), uçuşlara bağlı teknik etkinlik skorları hesaplanmıştır.

Yapılan analizlerde, uçuş süresi, irtifa, FPA, yer hızı, TAS, düzeltilmiş hava hızı, mesafe, N1, toplam yakıt miktarı, rüzgâr hızı, sıcaklık ve ROD değişkenlerine bağlı olarak yakıt tüketiminin etkinliği hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular, bu değişkenlerin yakıt tüketimi ile istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler içerdiğini göstermiştir. Özellikle TAS, irtifa, N1 ve FPA'nın yakıt akışıyla istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler içerdiği ve önemli etkilere sahip olduğu bulunmuştur. Farklı işaret ve yön değerlerine sahip olan bu değişkenlerin yakıt akışı üzerindeki etkilerini daha iyi görebilmek için teknik etkinlik analizi yapılmıştır. SSA'ya göre uçuşların çoğunun 0,75 ile 0,50 arasında etkinlik değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. En yüksek etkinlik skorlarına sahip ilk 10 uçuşun değerleri 0,70 ile 0,74 arasında değişmektedir. Bu uçuşların operasyonel olarak verimli gerçekleştirildiği belirlenmiştir. Ancak, 5 ve 20 numaralı uçuşlar gibi daha düşük teknik etkinlik skorlarına sahip uçuşlar, genel operasyonel verimliliği artırmak için odaklanılması gereken değişkenleri ortaya koymaktadır.

Özellikle yapılan çalışmada, daha yüksek FPA'nın daha yüksek TAS ile ilişkili olduğu görülmüştür. Düşük FPA kategorilerinde yakıt akışı daha yüksekken, daha yüksek FPA kategorilerinde yakıt akışının belirgin şekilde azaldığı görülmüştür. Özellikle etkin uçuşlarda, yüksek FPA kategorilerinde yakıt akışının daha düşük olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, daha az etkin uçuşlar genellikle düşük FPA kategorilerinde daha yüksek yakıt akışı ile karakterize edilmiştir. Ayrıca, 3000-18.000 feet aralığındaki irtifalarda FPA değerleri arttıkça ortalama yakıt akışında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara dayanarak, yakıt akışını azaltmak için düşük irtifalarda (3000-18.000 feet) FPA'nın 2,5-3,0 aralığında tutulması, yüksek irtifalarda (18.000-

24.000 feet) ise FPA'nın 3,50-4,00 aralığında tutulmasının yakıt akışını azaltabileceği öngörülmektedir.

Yapılan analizler sonucunda, etkin ve etkin olmayan uçuşlar belirlenmiştir. Aynı hız aralığı (191-230 knot) incelendiğinde, etkin uçuşların 2,0-2,5 derece FPA ile alçaldığı, etkin olmayan uçuşların ise 3,5-4,0 derece FPA ile alçaldığı gözlemlenmiştir. 231-270 knot aralığında, etkin uçuşlar 2,5-3,0 derece FPA ile alçalırken, etkin olmayan uçuşlar 3,5-4,0 derece FPA ile alçalmıştır.

Etkin olmayan uçuşların etkin hale getirilebilmesi için TAS ve FPA değerlerinde belirli optimizasyonlar yapılabileceği görülmektedir. Özellikle, uçuşların alçalışlarını 2,5-3,0 FPA değerleriyle gerçekleştirmesi durumunda daha düşük yakıt tüketim değerleri elde edilebilmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, Sabiha Gökçen Havalimanı'nda uygulanan geliş prosedürlerinin yakıt akışı üzerindeki etkilerini ayrıntılı bir şekilde ortaya koymuştur. Çalışma, havacılık sektöründe sürdürülebilir operasyonlar için önemli bulgular sunmakta ve gelecekte yapılacak araştırmalar için değerli bir rehber niteliği taşımaktadır. Uçuş operasyonlarının verimliliğini artırmak için mevcut prosedürlerin optimize edilmesi ve başarılı uygulamaların yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bu doğrultuda, havacılık sektöründe sürdürülebilirlik ve verimlilik hedeflerine ulaşmada önemli adımlar atılabilecektir.

KAYNAKÇA

- [1] ICAO. Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis. *International Civil Aviation Organization (ICAO), Montréal, Canada* 2021;(May):125.
- [2] COVID-19 Eurocontrol Comprehensive Air-Traffic Assessment. 2020;(December). <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-comprehensive-assessment-covid-19s-impact-european-air-traffic>.
- [3] Eurocontrol. Long-Term Forecast IFR Flight Movements 2008 – 2030. 2008.
- [4] Eurocontrol COVID-19 Impact on european aviation. 2021;(June).
- [5] Eurocontrol. European Aviation Overview- 9th February 2023. 2023 <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2023-09/eurocontrol-european-aviation-overview-20230926.pdf>.
- [6] Innovation for a Green Transition. 2022 <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ICAO>.
- [7] Aksoy H, Turgut ET, Usanmaz Ö., The design and analysis of optimal descent profiles using real flight data. *Transp Res D Transp Environ* 2021;100(September). doi: 10.1016/j.trd.2021.103028.
- [8] Gui D, Le M, Huang Z, Zhang J, D'Ariano A., Optimal aircraft arrival scheduling with continuous descent operations in busy terminal maneuvering areas. *J Air Transp Manag* 2023;107.
- [9] Clarke J-PB, Ho NT, Ren L, Brown JA, Elmer KR, Tong K-O, et al., Continuous Descent Approach: Design and Flight Test for Louisville International Airport. *J Aircr* 2004;41(5):1054–1066.
- [10] Errico A, Vito V Di., A methodology for efficient CDA trajectories automatic generation based on precision 3D curved approach in presence of obstacles. In: *17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. doi:10.2514/6.2017-4099.
- [11] Sahin O, Usanmaz O, Turgut ET., An assessment of flight efficiency based on the point merge system at metroplex airports. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 2018;90(1):1–10.
- [12] Jin L, Cao Y, Sun D., Investigation of Potential Fuel Savings Due to Continuous-Descent Approach. *J Aircr* 2013;50(3):807–816.
- [13] Cao Y, Jin L, Nguyen NVP, Landry S, Sun D, Post J., Evaluation of fuel benefits depending on continuous descent approach procedures. *Air Traffic Control Quarterly* 2014;22(3):251–275.
- [14] Dalmau R, Prats X. Controlled time of arrival windows for already initiated energy-neutral continuous descent operations. *Transp Res Part C Emerg Technol* 2017; 85:334–347.

- [15] Ellerbroek J, Inaad M, Hoekstra JM., fuel and emission benefits for continuous descent approaches at Schiphol. *International Conference on Research in Air Transportation* 2018;(November).
- [16] Sandberg M, Reynolds TG, Thomas J, Hansman RJ., Delayed deceleration approach noise assessment. *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference* 2016;(June):1–13.
- [17] Dumont JM, Reynolds TG, John Hansman R., Fuel burn and emissions reduction potential of Low Power/Low Drag approaches. In: *11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, including the AIAA Balloon Systems Conference and 19th AIAA Lighter-Than-Air Technology Conference*. 2011 doi:10.2514/6.2011-6886.
- [18] Sahin O., The effects of flap extension time on the fuel burn of commercial aircraft. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 2022;94(10):1825–1833.
- [19] Huynh JL, Mahseredjian A, John Hansman R., Delayed deceleration approach noise impact and modeling validation. *J Aircr* 2022;59(4):992–1004.
- [20] Pellerito VR, Huynh JL., Environmental analysis of fleet-wide implementation of delayed deceleration approaches. In: *AIAA AVIATION 2022 Forum*. American Institute of Aeronautics and Astronautics: Chicago doi:10.2514/6.2022-3918.
- [21] Eurocontrol. A Grand Solution to The City’s Challenges: ‘We are being charged for makes it easy to navigate the airport’. *Supporting European Aviation, Skyway Magazine* 2018.
- [22] Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü. İstatistikler. 2023. <https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/Istatistikler.aspx> (accessed 17 Dec 2023).
- [23] Türkiye AIP’si DHMİ. Aerodrome Location Indicator and Name. 2020;4.
- [24] Geliştirme Strateji Başkanlığı Dairesi. DHMİ Havayolu Sektör Raporu. 2022 <https://www.dhmi.gov.tr/Lists/HavaYoluSektorRaporlari/Attachments/16/2022-Havayolu-Sektor-Raporu.pdf> (accessed 17 Dec 2023).
- [25] Airport arrival air traffic flow management (ATFM) delays | Aviation Intelligence Unit Portal. https://ansperformance.eu/capacity/atfm_apr/ (accessed 13 Dec 2020).
- [26] Coelli T, Perelman S, Romano E. accounting for environmental influences in stochastic frontier models: with application to international airlines. *Journal of Productivity Analysis* 1999;11(3):251–273.
- [27] Yenilmez İ, Mert Kantar Y. Efficiency measurement of Turkish universities using the stochastic frontier model. In: *EGE 7th International Conference on Applied Science*. İzmir, 2022: 1017–1023.
- [28] Yenilmez I, Mert Kantar Y. An Estimation with Flexible Error Distributions for Stochastic Frontier Model. *ICOAEF VI*, Balıkesir, 2019.
- [29] Kantar YM, Yenilmez İ. Technical efficiency assessment of Turkish banks using stochastic frontier method. In: *Book of the I. International Symposium on Economics, Finance and Econometrics*. İstanbul, 2017.

- [30] Zou B, Kwan I, Hansen M, Rutherford D, Kafle N. Airline fuel efficiency: Assessment methodologies and applications in the U.S. domestic airline industry. *Advances in Airline Economics* 2016;5(October 2019):317–353.
- [31] Assaf AG, Tsionas MG, Gillen D. Measuring firm performance: Differentiating between uncontrollable and controllable bad outputs. *Tour Manag* 2020; 80.
- [32] Ngo T, Tsui KWH. Estimating the confidence intervals for DEA efficiency scores of Asia-Pacific airlines. *Operational Research* 2022;22(4):3411–3434.
- [33] Kaya G, Kayalıca Ö. Aviation-caused CO₂ emissions reduction efficiency in EU-28 under CORSIA compliance. *Akıllı Ulaştırma Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi* 2022;5(2). doi:10.51513/jitsa.1164739.
- [34] Bourjade S, Muller-Vibes C. Optimal leasing and airlines' cost efficiency: A stochastic frontier analysis. *Transp Res Part A Policy Pract* 2023;176.
- [35] Omrani H, Shamsi M, Emrouznejad A. Evaluating sustainable efficiency of decision-making units considering undesirable outputs: an application to airline using integrated multi-objective DEA-TOPSIS. *Environ Dev Sustain* 2023;25(7):5899–5930.
- [36] Li Y, Huang X, Cui Q. Exploring the environmental efficiency of airlines through a parallel RAM approach. *Energy Effic* 2022;15(7):45.
- [37] Kaleab Atsbaha DrT. An Analysis of the Production Efficiency of Ethiopian Airports BT - Efficiency and Growth of Ethiopian Air Transport Industry. In: Kaleab Atsbaha T, editor. Springer Nature Singapore: Singapore, 2022: 75–124.
- [38] Martini G, Porta F, Scotti D. Persistent and transient productive efficiency in the African airline industry. *Journal of Productivity Analysis* 2023. doi:10.1007/s11123-023-00674-3.
- [39] Yakath Ali NS, See KF. Revisiting an environmental efficiency analysis of global airlines: A parametric enhanced hyperbolic distance function. *J Clean Prod* 2023; 394.
- [40] Tanriverdi G, Merkert R, Karamaşa Ç, Asker V. Using multi-criteria performance measurement models to evaluate the financial, operational and environmental sustainability of airlines. *J Air Transp Manag* 2023; 112.
- [41] Hong SJ, Kim W, Niranjana S. Challenges to the air cargo business of combination carriers: Analysis of two major Korean Airlines. *J Air Transp Manag* 2023; 108.
- [42] Cui Q, Li Y. Airline energy efficiency measures considering carbon abatement: A new strategic framework. *Transp Res D Transp Environ* 2016; 49:246–258.
- [43] Fleurquin, P., Ramasco J., Eguíluz VM. Characterization of delay propagation in the US air-transportation network. *Transportation Journal* 2014;53(3):330–344.
- [44] Chen Z, Wanke P, Antunes JJM, Zhang N. Chinese airline efficiency under CO₂ emissions and flight delays: A stochastic network DEA model. *Energy Econ* 2017; 68:89–108.

- [45] Tsionas MG, Chen Z, Wanke P. A structural vector autoregressive model of technical efficiency and delays with an application to Chinese airlines. *Transp Res Part A Policy Pract* 2017; 101:1–10.
- [46] Martín JC, Román C, Voltes-Dorta A. A stochastic frontier analysis to estimate the relative efficiency of Spanish airports. *Journal of Productivity Analysis* 2009;31(3):163–176.
- [47] Martini G, Manello A, Scotti D. The influence of fleet mix, ownership and LCCs on airports' technical/environmental efficiency. *Transp Res E Logist Transp Rev* 2013;50(1):37–52.
- [48] Grampella M, Scotti D, Malighetti P, Martini G, Volta N. The impact of airport competition on technical efficiency: A stochastic frontier analysis applied to Italian airport. *J Air Transp Manag* 2012; 22:9–15.
- [49] Kaleab Atsbaha T. An analysis of the cost efficiency of ethiopian airports BT- efficiency and growth of ethiopian air transport industry. In: Kaleab Atsbaha T, editor. . Springer Nature Singapore: Singapore, 2022: 35–74.
- [50] Adachi K. The Impact of Airport Concession on Technical Efficiency: Evidence from Major Airports in Japan BT- Current Issues in Public Utilities and Public Policy: Empirical Studies Focusing on Japan. Springer Nature Singapore: Singapore, 2023: 113–127.
- [51] Adler N, Kumar S. Efficiency assessment of airports and the impact of regulation on performance bt- economic regulation of urban and regional airports: incentives, efficiency and benchmarking. In: Forsyth P, Müller J, Niemeier H-M, Pels E, editors. Springer International Publishing: Cham, 2023: 247–272
- [52] Omoke V, Nwaogbe O, Ibrahim Ayinla A, Yakubu-Wokili hauwa. Operational performance of air transportaion in northern nigeria airports. 2021; Vol. 3:132–143.
- [53] Lin, Zhuo, Choo, Yap Y., Oum TH, Zhuo (Frank) Lin, Yap Yin Choo THO. Efficiency benchmarking of north American airports: Comparative results of productivity index, data envelopment analysis and stochastic frontier analysis. *Journal of the Transportation Research Forum* 2013; 52:47–67.
- [54] Pagoni I, Koumoutsidi A. Efficiency of regional airports: Insights on the effect of airline type and seasonal variations in traffic. *Future Transportation* 2022;2(4):774–792.
- [55] Irfan M, Mahapatra B, Shahbaz M. Energy efficiency in the Indian transportation sector: Effect on carbon emissions. *Environ Dev Sustain* 2023;1–24.
- [56] Sjögren S. Modeling Airline Efficiency – A comparison of international airlines using data envelopment analysis. *Airline Efficiency* 2016;5(Advances in Airline Economics):103–129.
- [57] Astar M. Ekonometrik modellerin değişken seçiminde en küçük aç regresyonu ve diğer yöntemlerle karşılaştırılması. 2012.
- [58] Li W, Liu RY, Xie M, Zhang C-H. Simultaneous variable selection and outlier detection using LASSO with applications to aircraft landing data analysis. 2012.

- [59] Rajeswari R, Satheesh Kumar J, Devi T. LASSO: A feature selection technique in predictive modeling for machine learning. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2016.
- [60] Singh D, Kumar M, Arya K V., Kumar S. Aircraft engine reliability analysis using machine learning algorithms. In: *2020 IEEE 15th International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2020-Proceedings*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020: 443–448.
- [61] Hidiyanto F, Leksono S, Fajar R, Atmaja ST. Data exploratory analysis and feature selection of low-speed wind tunnel data for predicting force and moment of aircraft. *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri (Journal of Industrial Technology Assessment 2022;16(2):87–94*.
- [62] Grampella M, Martini G, Scotti D, Tassan F, Zambon G. The environmental costs of airports' aviation activities: a panel data econometric analysis of Italian airports.
- [63] Fukui H, Miyoshi C. The impact of aviation fuel tax on fuel consumption and carbon emissions: The case of the US airline industry. *Transp Res D Transp Environ* 2017; 50:234–253.
- [64] Yanto J, Liem RP. Efficient fast approximation for aircraft fuel consumption for decision-making and policy analysis. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)*, 2017 doi:10.2514/6.2017-3338.
- [65] Kiracı K. COVID-19 financial risk and the airline industry. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 2021;8(3):1557–1581.
- [66] Fox J, Andersen R. Using The R Statistical Computing Environment to Teach Social Statistics Courses. 2005
- [67] Wickham H., Tidy data. *J Stat Softw* 2014.
- [68] Aktürk Z., Acemoğlu H., Sağlık çalışanları için araştırma ve pratik istatistik örnek problemler ve spss çözümleri. 2011.
- [69] Ovla HD, Taşdelen B., Aykırı değer yönetimi. *Mersin Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi* 2012;5(3).
- [70] Ateş M. *Aykırı Değerlerin Tespit Yöntemi*. 2022.
- [71] Emiroğlu E. Optimizasyon uygulaması olarak regresyon parametrelerinin tahmini. 2014.
- [72] Alpar R. Uygulamalı çok değişkenli istatistiksel yöntemler. *Detay Yayıncılık: Ankara*, 2017.
- [73] Tibshirani R., Regression shrinkage and selection via the LASSO, 1996.
- [74] Fonti V, Belitser E., Feature selection using LASSO, 2017.
- [75] Derici Yıldırım D, Çiftçi AT. Etkili değişkenlerin cezalı regresyon yöntemleri ile belirlenmesi: Diyabet veri kümesi üzerine bir uygulama. *Mersin Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi* 2021;14(1):105–112.

- [76] Yenilmez I, Kantar YM. *An analysis of export data with panel tobit model*. ICONDATA19,2019.
- [77] Wooldridge JM. *Introductory econometrics*. 2012.
- [78] Taş N. *Ekonomik değişkenlerin panel veri analizi ile çözümlenmesi*. 2012.
- [79] Pazarlıoğlu MV. 1980-1990 döneminde Türkiye’de iç göç üzerine ekonometrik model çalışması. 5. *Ulusal Ekonometri ve İstatistik Sempozyumu*. Çukurova Üniversitesi: Adana, 2001: 1–24.
- [80] Verbeek M. *A guide to modern econometrics*. 2nd ed. John Wiley & Sons Ltd., 2004.
- [81] Stock JH, Watson MW. *Ekonometriye Giriş*. Efil Yayınevi: Ankara, 2011.
- [82] Kurt Y. Türkiye ve uluslararası müzik endüstrisinin durumu:Panel veri analizi. 2015.
- [83] Baltagi BH. *Econometric Analysis Of Panel Data*. John Wiley & Sons, 2005.
- [84] Kennedy Peter. *Ekonometri Kılavuzu*. 5th ed. Gazi Kitapevi: Ankara, 2006.
- [85] Yalçın E. *Stokastik Sınır Analizi ile Türkiye’deki Havalimanlarının Etkinliğinin Ölçülmesi*. 2017.
- [86] Kınacı H. *Stokastik sınır analizinde yeni bir yaklaşım*. 2016.
- [87] Farrell MJ. The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society* 1957;120(3):16–35.
- [88] Jones JC, Lovell DJ, Ball MO. Combining control by CTA and dynamic enroute speed adjustment to improve ground delay program performance. *Proceedings of the 11th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, ATM 2015* 2015.
- [89] T. Günther and H. Fricke. Second international conference on research in air transportation. in *Proceedings of the 2nd International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT)* 2006; I:197–201.
- [90] Carlier S, De Lépinay I, Hustache JC, Jelinek F. Environmental impact of air traffic flow management delays. *Proceedings of the 7th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, ATM 2007* 2007;319–331.
- [91] Aigner D, Lovell CAK, Schmidt P. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *J Econom* 1977;6(1):21–37.
- [92] Battese GE, Coelli TJ. Frontier Production Functions, Technical Efficiency and Panel Data: With Application to Paddy Farmers in India. *Journal of Productivity Analysis* 1992; 3:153–169.

- [93] Tutulmaz O. An evaluation on technical efficiency analysis using stochastic frontier method. *Hitit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi* 2012; 5:109–127.
- [94] Tutulmaz O, Şahin H. Türk Havayolu Ulaştırmasının Açılım Dönemine Yönelik Teknik Etkinlik Analizi: Bir Stokastik Sınır Yöntemi Uygulaması. *Çukurova Üniversitesi İİBF Dergisi* 2014;18(2):49–73.
- [95] Coelli, T. J., Rao, D.S.P., & Battese GE. *An introduction to efficiency analysis*. 2005
- [96] Caglayan Akay E, Guris S. *Ekonometri Temel Kavramlar*. 2015.
- [97] UÇAL ŞM., Ekonometrik model seçim kriterleri üzerine kısa bir inceleme. 2006.



EKLER

Ek 1:

Bir sütunun sayısal olup olmadığını ve NA değerleri içermediğini kontrol eden özel işlev:

```
is_numeric_no_na <- function(col) {  
  
  is_numeric <- is.numeric(col)  
  
  no_na <- !anyNA(col)  
  
  return(is_numeric & no_na)  
  
}
```

EK-2:

```
x_1 <- subset(all_num_na, select = c(x_1))  
x_2 <- subset(all_num_na, select = c(x_2))  
  
# Bireysel ve zaman tanımlayıcılarını belirtin  
  
individual_variable <- "x_1" # Bireysel tanımlayıcı sütun adını değiştir  
  
time_variable <- "x_2" # Zaman tanımlayıcı sütun adını değiştir
```

EK-3:

```
y= all_used$x_12
```

```
# Install and load necessary packages  
library(glmnet)
```

```
# Assuming 'X' is your feature matrix and 'y' is the response variable  
# Fit LASSO regression model  
lasso_model <- glmnet(x_used, y, alpha = 1) # alpha = 1 for LASSO
```

```
# Plot the coefficient profiles
```



```
plot(lasso_model)

# Seçilen sütunların katsayılarını al
selected_coef <- coef(lasso_model, s = 0)

# Sıfırdan farklı olan katsayıların indekslerini bul
selected_indices <- which(selected_coef != 0)

# Orijinal veri setindeki sütun adlarını al
selected_columns <- colnames(x_used)[selected_indices]

# Seçilen sütunların adlarını yazdır
print(selected_columns)
selected_col = all_used[selected_indices]
```

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0009-0000-2777-934X

Ad Soyad : Serkan Aslaner

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2015, Anadolu Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Hava Trafik Kontrol Bölümü
- 2017, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı
- 2015, Hava Trafik Kontrolörü, Sivas Nuri Demirağ Havalimanı-DHMI

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- 2019, Makale, Fuel and Carbon Dioxide Emission Assessment for a Curved Approach Procedure, Ozlem Sahin, Enis T. Turgut, Serkan Aslaner, and Oznur Usanmaz, Journal of Aircraft 2019 56:6, 2108-2117

Mesleki Birlik/Dernek/Kuruluş Üyelikleri:

- 2015, Türkiye Hava Trafik Kontrolörleri Derneği, İstanbul