

JAR - 6 / 1

E-ISSN: 2687-3338

FEBRUARY 2024



JOURNAL OF
AVIATION
RESEARCH

HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERĐİSİ





JOURNAL OF
AVIATION
RESEARCH

HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERĐİSİ

6 / 1



JOURNAL OF
**AVIATION
RESEARCH**

HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERĐİSİ

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

Cilt: 6
Sayı: 1
Yıl: 2024

2019 yılından itibaren yayımlanmaktadır.

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

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

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

Volume: 6
Issue: 1
Year: 2024

Published since 2019.

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

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



Yazışma Adresi:
Süleyman Demirel Üniversitesi
Sivil Havacılık Yüksekokulu Müdürlüğü
Keçiborlu / Isparta - Türkiye

E-Posta:
journalofaviationresearch@gmail.com

Telefon:
+90 246 211 85 00

Dahili:
8505

Correspondence Address:
Süleyman Demirel University
Directorate of Civil Aviation School
Keçiborlu / Isparta - Türkiye

E-Mail:
journalofaviationresearch@gmail.com

Telephone:
+90 246 211 85 00

Ext:
8505



JOURNAL OF AVIATION RESEARCH

HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERGİSİ

Yayın Sahibi

Doç. Dr. İnan Eryılmaz

Baş Editör

Doç. Dr. İnan Eryılmaz

Editör Kurulu

Doç. Dr. İnan Eryılmaz
Doç. Dr. Deniz Dirik
Doç. Dr. Yasin Şöhret
Dr. Öğr. Üyesi Şener Odabaşoğlu
Dr. Öğr. Üyesi Leyla Adiloğlu Yalçinkaya
Dr. Tamer Saraçyakupoğlu
Doç. Dr. Vahap Önen
Doç. Dr. Gökhan Tanrıverdi

Dil Editörleri

Doç. Dr. Deniz Dirik
Doç. Dr. Tuğba Erhan

Yayın ve Danışma Kurulu

Prof. Dr. Cem Harun Meydan
Prof. Dr. Dukagjin Leka
Prof. Dr. Ender Gerece
Prof. Dr. Ferişt Kolbakır
Prof. Dr. Osman Ergüven Vatandaş
Doç. Dr. Akansel Yalçinkaya
Doç. Dr. Asena Altın Gülova
Doç. Dr. Burcu Güneri Çangarlı
Doç. Dr. Engin Kanbur
Doç. Dr. Eyüp Bayram Şekerli
Doç. Dr. Ferhan Sayın
Doç. Dr. Florina Oana Virlanuta
Doç. Dr. Güler Tozkoparan
Doç. Dr. Hakkı Aktaş
Doç. Dr. Mehmet Kaya
Doç. Dr. Önder Altuntaş
Doç. Dr. Özgür Demirtaş
Doç. Dr. Rüstem Barış Yeşilay
Doç. Dr. Semih Soran
Dr. Öğr. Üyesi Birsan Açıkcel
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin Uzunbacak
Dr. Öğr. Üyesi Muhittin Hasan Uncular
Dr. Öğr. Üyesi Rukiye Sönmez
Dr. Öğr. Üyesi Tahsin Akçakanat
Dr. Öğr. Üyesi Uğur Turhan
Dr. Öğr. Üyesi Rıza Gürler Akgün

Grafik Tasarım

Dr. Öğr. Üyesi Rıza Gürler Akgün

Owner

Assoc. Prof. Dr. İnan Eryılmaz, Ph.D.

Editor in Chef

Assoc. Prof. Dr. İnan Eryılmaz, Ph.D.

Editorial Board

Assoc. Prof. İnan Eryılmaz, Ph.D.
Assoc. Prof. Deniz Dirik, Ph.D.
Assoc. Prof. Yasin Şöhret, Ph.D.
Asst. Prof. Şener Odabaşoğlu, Ph.D.
Asst. Prof. Leyla Adiloğlu Yalçinkaya, Ph.D.
Tamer Saraçyakupoğlu, Ph.D.
Assoc. Prof. Vahap Önen, Ph.D.
Assoc. Prof. Gökhan Tanrıverdi, Ph.D.

Language Editors

Assoc. Prof. Deniz Dirik, Ph.D.
Assoc. Prof. Tuğba Erhan, Ph.D.

Editorial and Advisory Board

Prof. Cem Harun Meydan, Ph.D.
Prof. Dukagjin Leka, Ph.D.
Prof. Ender Gerece, Ph.D.
Prof. Ferişt Kolbakır, Ph.D.
Prof. Osman Ergüven Vatandaş, Ph.D.
Assoc. Prof. Akansel Yalçinkaya, Ph.D.
Assoc. Prof. Asena Altın Gülova, Ph.D.
Assoc. Prof. Burcu Güneri Çangarlı, Ph.D.
Assoc. Prof. Engin Kanbur, Ph.D.
Assoc. Prof. Eyüp Bayram Şekerli
Assoc. Prof. Ferhan Sayın, Ph.D.
Assoc. Prof. Florina Oana Virlanuta, Ph.D.
Assoc. Prof. Güler Tozkoparan, Ph.D.
Assoc. Prof. Hakkı Aktaş, Ph.D.
Assoc. Prof. Mehmet Kaya, Ph.D.
Assoc. Prof. Önder Altuntaş, Ph.D.
Assoc. Prof. Özgür Demirtaş, Ph.D.
Assoc. Prof. Rüstem Barış Yeşilay, Ph.D.
Assoc. Prof. Semih Soran, Ph.D.
Asst. Prof. Birsan Açıkcel, Ph.D.
Asst. Prof. Hasan Hüseyin Uzunbacak, Ph.D.
Asst. Prof. Muhittin Hasan Uncular, Ph.D.
Asst. Prof. Rukiye Sönmez, Ph.D.
Asst. Prof. Tahsin Akçakanat, Ph.D.
Asst. Prof. Uğur Turhan, Ph.D.
Asst. Prof. Rıza Gürler Akgün, Ph.D.

Graphic Design

Asst. Prof. Rıza Gürler Akgün, Ph.D.



JOURNAL OF
**AVIATION
RESEARCH**
HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERGİSİ

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Articles

MEVLÜT COŞKUN TEZCAN

Pisagor Bulanık Kümelere Entegre AHP ve TOPSIS Yöntemleri ile Uçak Tipi Seçiminin Optimizasyonu: Havayolu İşlemleri İçin Model Önerisi

Optimization of Aircraft Type Selection by Integrated AHP and TOPSIS Methods on Pythagorean Fuzzy Sets: Model Suggestion for Airline Processing 1 - 24

BURAK ÇINAR

Air Warfare Over Europe: An Exploration of The Luftwaffe Experience

Avrupa Üzerinde Hava Savaşı: Luftwaffe Deneyiminin Keşfi 25 - 52

Derleme Makaleler / Review Articles

ENGİN GÖDE - ATANUR TEOMAN - MELİH CEMAL KUŞHAN - KÜRŞAT TONBUL - GÖKHAN İBRAHİM ÖĞÜNÇ - BATUHAN DAZ

İnsansız Hava Araçları (İHA) İçin Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) Bağımsız Navigasyon

Global Navigation Satellite System (GNSS) Independent Navigation for Unmanned Aerial Vehicles (UAV) 53 - 88

ARİF TUNCAL - UFUK EROL

Integrating Unmanned Aerial Vehicles in Airspace: A Systematic Review

İnsansız Hava Araçlarının Hava Sahasına Entegrasyonu: Sistemik Bir İnceleme 89- 115



Pisagor Bulanık Kümelere Entegre AHP ve TOPSIS Yöntemleri ile Uçak Tipi Seçiminin Optimizasyonu: Havayolu İşlemeleri İçin Model Önerisi

Mevlüt Coşkun TEZCAN¹ 

Araştırma Makalesi	DOI: 10.51785/jar.1371387	
Gönderi Tarihi: 04.10.2023	Kabul Tarihi: 22.01.2024	Online Yayın Tarihi: 28.02.2024

Öz

Bu çalışma ile havayolu işletmeleri için geniş gövde yolcu uçak tipi seçim kararının optimize edilmesi amaçlanmaktadır. Havayollarında birbirine yakın kapasite ve teknik özelliklerdeki uçak tipleri arasından hangisi veya hangilerinin seçilerek satın alma kararı oldukça farklı açılardan incelenmesi gereken, zaman alıcı ve karmaşık bir problemdir. Bir uçak tipi bir yönden üstün gelirken diğeri farklı bir yönden üstün gelebilmektedir. Bu gibi durumlarda birden fazla kriteri, verilen önem sırasına göre aynı anda dikkate alarak alternatifler arasında sıralama yapmaya olanak sağlayan modellere yönelmek faydalı olmaktadır. Bu tip uçak seçimi ya da uçak seçim kriterlerini önceliklendirme problemleri incelendiğinde literatürde sıklıkla çok kriterli karar verme (ÇKKV) modellerinin tercih edildiği görülmektedir. Bu çalışmada da aynı bakış açısıyla ÇKKV problemi olarak düşünülen uçak tipi seçimi, belirsizliklerin ve sözel değerlendirmelerin daha iyi modellenebilmesine imkan tanıyan bulanık mantık ile birleştirilmiş ve bir bulanık ÇKKV problemi olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda bulanık kümelere görece yeni bir yaklaşım olan Pisagor Bulanık Kümelere ile Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve İdeal Çözüme Benzerlik Yoluyla Tercih Sıralaması (TOPSIS) hibrit modeli üzerinde çalışılmış ve 6 kriter ile 8 alternatif uçak arasında seçim yapılmıştır. Uygulama iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada çalışmaya dahil edilen 3 uzman karar verici tarafından AHP anketi doldurularak aralık değerli Pisagor bulanık AHP yöntemiyle kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. İkinci aşamada ise aynı karar vericilerin değerlendirmeleri ve aralık değerli Pisagor bulanık TOPSIS metodolojisi ile alternatifler sıralanmıştır. Sonuç olarak Airbus A350-1000 tipi uçak ideal çözüme en yakın alternatif olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçak seçimi, Havayolu, Pisagor Bulanık Kümelere, AHP, TOPSIS.

JEL Sınıflandırma: C69, L93, M11.

Optimization of Aircraft Type Selection by Integrated AHP and TOPSIS Methods on Pythagorean Fuzzy Sets: Model Suggestion for Airline Processing

Abstract

It is aimed to optimize the wide-body passenger aircraft type selection decision for airline companies in this study. The decision to choose which aircraft types with similar capacities and technical specifications are selected in airlines is a time-consuming and complex problem that requires to be examined from a different perspective. One type of aircraft may prevail in one direction, while the other may prevail in another. In such cases, it is useful to take into account the models that allow ranking among alternatives by considering more than one criterion simultaneously in order of importance. When this type of aircraft selection or prioritization of aircraft selection criteria is examined, it is seen that multi-criteria decision-making (MCDM) models are frequently recommended in the literature. In this study, aircraft type selection, considered an MCDM problem from the same point of view, is combined with fuzzy logic, which allows better modeling of uncertainties and verbal evaluations that are pondered as a fuzzy MCDM problem. In this context, Pythagorean Fuzzy Sets,

¹ Doktor, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kıbrıs, coskun_tezcan@hotmail.com

which are a relatively new approach to fuzzy sets, and the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Technique for Order Preference Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) hybrid model have been studied, and a choice has been made between 6 criteria and 8 alternative planes. The application consists of two stages. In the first stage, the criteria weights were calculated using the interval-valued Pythagorean fuzzy AHP method by filling out the AHP questionnaire by 3 expert decision-makers included in the study. In the second stage, the evaluations and interval values of the same decision-makers were listed with the interval-valued Pythagorean fuzzy TOPSIS methodology. As a result, the Airbus A350-1000 type aircraft was determined as the closest alternative to the ideal solution.

Keywords: Aircraft selection, Airline, Pythagorean Fuzzy Sets, AHP, TOPSIS

JEL Classification: C69, L93, M11.

GİRİŞ

Hizmet sektöründe girdi, etki ve kapasitesi ile ön plana çıkan havacılık sektörü, bu alanda faaliyet gösteren işletmeler, sahip olduğu nitelikli insan gücü, kullanılmakta olan gelişmiş teknoloji ve uluslararası kurallara sahip olan yapısı ile önemli unsurları barındıran bir sistemdir (Akyurt ve Yaşlıoğlu, 2018: 428). Havacılık sisteminin merkezinde yer alan havayolu taşımacılığı insanların ve kargoların yer ve zaman faydası oluşturacak şekilde hava aracı kullanılarak yer değiştirmesi şeklinde ifade edilmektedir (Gerede, 2015: 3). Havayolu taşımacılığının ilk yıllarında 2 ya da 3 kişilik kapasitesi bulunan uçaklar ile taşımacılık gerçekleştirilirken, bu işlem günümüzde yüzlerce koltuk kapasitesi olan uçaklar ile gerçekleştirilmektedir. Havacılık sektörünün bu hızlı gelişmesinde bu alandaki serbestleşme hareketleri, globalleşme, nüfus artış trendi ve teknolojiye yeni yeniliklerin son derecede önemli katkıları olmuştur. Özellikle neo-liberal dalgalanmanın etkisi ile 1978 yılında ABD’de başlayan ve sonrasında diğer ülkelere de yayılan havacılıkta deregülasyon (kuralsızlaştırma) süreci ile özel işletmelerin havacılığa girişinin temin edilmesi havacılık sektörünün hızlı bir atılım göstermesini sağlamıştır. Havacılıktaki serbestleşme hareketleri ve globalleşme ile birlikte elektronik alanındaki ilerlemeler, malzeme teknolojileri ve jet motorlarındaki devrimsel gelişmeler doğrultusunda konfor ve güvenlik faktörünü bir üst segmente taşıyan uçakların imal edilmesi, havayolu ulaşımının önemli bir gelişmeye sahne olmasını ve bu gelişimin sürmesini sağlamaktadır.

Havayolu taşımacılığı, ortaya koymuş olduğu bu gelişim ile hız, emniyet, kalite ve konfor gibi avantajlar sunarak, havayolu taşımacılığına olan talebin her geçen gün artmasını sağlamakta ve ulaştırma sektörü içerisinde itici güç unsurlarından birisi olarak ön plana çıkmaktadır. Havayolu taşımacılığına duyulan talep sektörde kritik bir aktör olan havayolu şirketleri ile filo sayılarının artmasını da sağlamıştır. Havayolu şirketlerinin filo yapılarını genişletmek üzere yaptıkları uçak alımları havayolu şirketleri için yüksek yatırım maliyetlerinden kaynaklı olarak stratejik bir öneme sahiptir. Ayrıca havayolu işletmeleri uçak alırken yatırım maliyetlerinin haricinde çevresel etki, konfor, sürat ve benzeri birçok etkeni de dikkate almak durumundadır. Günümüzde ülkeler ve havalimanı otoriteleri uçakların yarattığı sera gazı salınımı ve gürültü düzeyi gibi çevresel etkileri göz önünde bulundurmaktadır. Bu çerçevede uçakların gürültü seviyesi, yakıt sarfiyatı ve emisyon miktarı gibi teknik özellikleri önemli hale gelmektedir. Bununla birlikte yolcuların kabin içi eğlence sistemi, koltuk aralığı ve genişliği gibi konfor beklentileri de artmaktadır. Bu noktada havayolu şirketleri ülkeler ve yolcuların beklentilerini maksimum düzeyde karşılamak amacıyla ve kendi çıkarları doğrultusunda teknik, operasyonel ve ekonomik faktörler arasında en iyi kombinasyona sahip uçak tiplerine yönelmektedir. Havayollarının

farklı gereksinimlerine karşılık vermek isteyen uçak imalatçısı firmalar ise farklı tipte uçaklar üretmektedirler (Kartal, 2022: 1).

Karar verme süreci, gerçekleştirilmesi tasarlanan hedef ve işlemlerin, karar verici yapı tarafından muhtemel alternatifler içerisinde, en uygun kriterleri sağlayan ihtimalin değerlendirilerek alternatifler içerisinde seçilmesidir. Günümüzde karar problemleri birden fazla kritere ve alternatife sahip karmaşık problemler halini almıştır, bu nedenle karar problemlerinin çözülmesi artık daha da zorlaşmış durumdadır. Bu tarz problemler çok kriterli karar verme (ÇKKV) teknikleri ile çözülebilmektedir. ÇKKV, seçilmesi planlanan ve fazla sayıda alternatifleri, kriterleri ve kısıtları temelinde barındıran problemlerin çözümüne imkân sağlayan yöntemler bütünüdür. ÇKKV yöntemleri mevcut alternatifler içerisinde performansları en iyiden en kötüye sıralayarak karar verici için performans sıralaması gerektiren her türlü alanda kullanılmaktadır. ÇKKV'de karar alma probleminin çözümünde bir süreç vardır. Problem çözümü bu işlemler takip edilerek sürdürülür ve optimum alternatif belirlenir.

Karar verme aşamalarında insanın dahil olduğu ve subjektif değerlendirmelerin yapıldığı süreçlerde genellikle bir belirsizlik söz konusu olmaktadır. Bu sebeple ÇKKV problemi olarak düşünülen uçak tipi seçimi, belirsizliklerin ve sözel değerlendirmelerin daha iyi modellenbilmesine imkan tanıyan bulanık mantık ile birleştirilmiş ve bir bulanık ÇKKV problemi olarak ele alınmıştır. Belirsizlik içeren bu karar probleminin çözümü için değişik ÇKKV yöntemleri ve farklı bulanık küme uzantıları incelenmiş, uygulamada yaygın kullanımı sebebiyle Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile İdeal Çözüme Benzerlik Yoluyla Tercih Sıralaması (TOPSIS) yöntemleri tercih edilmiştir ve uçak seçim probleminde bir çalışma bulunmaması sebebiyle de bu modelde bulanık kümelerle görece yeni bir yaklaşım olan Pisagor bulanık kümelerin (Pythagorean Fuzzy Sets/PFS) kullanılmasına karar verilmiştir.

Havayolu işletmeleri için geniş gövde yolcu uçağı seçim kararının optimize edilmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada kriter ağırlıklarının aralık değerli Pisagor bulanık AHP (Interval Valued Pythagorean Fuzzy AHP/IVPF-AHP) yöntemi ile elde edildiği, alternatif uçak tiplerinin ise aralık değerli Pisagor bulanık TOPSIS (IVPF-TOPSIS) yöntemi ile sıralandığı hibrit bir model önerilmektedir. Çalışmanın bir sonraki bölümünde havayolu işletmelerinde filo planlanması sürecine ilişkin kavramsal çerçeveye değinilmiş ve literatürde ÇKKV yöntemleri kullanılarak uçak seçimi üzerine yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Bundan sonraki bölümlerde ise sırasıyla yöntem, bulgular, tartışma ve sonuç kısımları yer almıştır.

1. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

1.1.Havayolu İşletmelerinde Filo Planlaması

Havayolu şirketlerinin filosu, havayolu tarafından herhangi bir zamanda işletilen toplam uçak sayısı ile belirli uçak tiplerinden oluşmaktadır. Filo yapısı oluşturmak havayolu şirketlerinin kurumsal ve operasyonel performanslarını, kapasite geliştirmelerini ve sürdürülebilirliklerini etkileyen en mühim uzun vadeli stratejik kararlardan biridir (Belobaba vd., 2009: 154). Havayolu şirketlerinin filo planları, gelişen uçak teknolojisi ve rekabet

halindeki havayollarının filo kararlarından etkilenmektedir. Bu bağlamda havayollarının filo yapılarını doğru bir biçimde oluşturmaları süratle değişim gösteren pazar şartlarına hızlı bir biçimde uyum sağlamaları ve gereksinimleri karşılama bakımından kritik öneme sahiptir.

Filo planlamasında kritik karar süreçlerinden birisi uçak tipi seçimidir. Havayolu şirketlerinin birçok değerlendirme kriterini aynı anda dikkate alarak farklı uçak alternatifleri arasından operasyonlarına en uygun uçak tipini doğru bir biçimde seçmesi diğer havayollarına nazaran stratejik rekabet avantajı elde etmelerini sağlamaktadır. Ayrıca sektörel, çevresel ve iktisadi kaynakların aktif ve verimli bir biçimde kullanılmasını temin etmektedir (Kiracı ve Bakır, 2018: 15).

Uçuş mesafesi ve hizmet verilen uçuş noktaları arasındaki taleplere bağlı olarak ekonomik ve karlı uçuş operasyonları için farklı tip ve büyüklükte uçaklara gereksinim duyulmaktadır. Bu noktada uçak seçim prosesi tüm havayolu şirketleri için çok önemli ve zor bir görevdir. Havayolu işletmeleri uyguladıkları iş modeli ve ağ yapıları çerçevesinde havayolunun gelecek projeksiyonuna göre uçak tercihinde bulunmaktadırlar. Düşük maliyetli havayolları ile talebe göre tarifesiz seferler yapan charter taşıyıcılar tipik olarak ekonomi sınıf kabin konfigürasyonuna sahip bir ya da birkaç uçak tipinden oluşan filo yapısına sahip olmakta iken, tam hizmet sunan havayolu işletmeleri ise sektörde tüm pazar bölümlerine hizmet verebilmek amacıyla business ve ekonomi sınıf kabin konfigürasyonuna sahip pek çok uçak tipinden müteşekkil heterojen bir filo yapısına sahip olmaktadır. Ayrıca genel uçuş ağına bağlı olarak, kıta içindeki uçuşlarda bölgesel ve kısa menzilli uçaklara, kıtalararası uçuşlarda ise orta ve uzun menzilli uçaklara gereksinim duyulmaktadır. Bunların dışında değişik uçuş noktalarındaki talepler çerçevesinde uçakların boyutları da farklılaşmaktadır. Yoğun havalimanlarında slot (kapasite kullanımı) sıkıntısı ve yüksek iniş ücretleri, havayolu firmalarını tercih ettikleri bazı uçuş noktalarında uçuş frekansını azaltmaya ancak söz konusu bu uçuşlarda geniş gövdeli uçak kullanımına zorlamaktadır (Schmitt ve Gollnick, 2006: 6-7).

1.2. Literatür Taraması

Havayolu yolcu ve kargo taşımacılığında kullanılan birçok uçak modeli bulunmaktadır. Uçak tipi seçimi havayolu şirketlerinin stratejik hedefleri, operasyonel gereksinimleri ve finansal durumuyla bütünleşen bir süreç olup, doğru uçak tipi seçiminde detaylı bir analiz ve planlama yapmak önemlidir. Literatürde uçak seçim probleminin çözümü ile işletmelerin doğru karar alabilmesi adına birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalardan bazıları şu şekildedir;

Wang ve Chang (2007), Tayvan Hava Kuvvetleri Akademisi için eğitim amaçlı uçak modeli seçimi üzerine çalışmış, yöntem olarak da TOPSIS' i kullanmışlardır. Çalışmada yakıt kapasitesi, güç, servis tavanı, maksimum ve minimum G kuvveti limiti, iniş takımları açık halde maksimum operasyon hızı, flaplar aşağıda maksimum operasyon hızı, yangın durumunda minimum uçuş hızı, maksimum seyir hızı, ekonomik seyir hızı, deniz seviyesinde maksimum tırmanma oranı, kalkış mesafesi, iniş mesafesi, kalkış ve 50 feet yüksekliğe ulaşmak için gereken mesafe, 50 feet yükseklikten iniş ve tam duruş için gereken mesafe olmak üzere 16 kriter belirlenmiştir. Çalışma kapsamında değerlendirilen T-34, PC-7, PC-9, PC-7 MK2, T-6A, KT-1 ve T-27 tipi uçak alternatifleri arasından KT-1'in en iyi

alternatif olduğu belirlenmiştir.

Özdemir ve arkadaşları (2011) çalışmalarında, Türk Hava Yolları işletmesi için uçak seçim problemini Analitik Ağ Süreci (Analytic Network Process/ ANP) yöntemini kullanarak ele almışlardır. Çalışmada satın alma maliyeti, operasyon maliyeti, bakım maliyeti, kurtarma maliyeti alt kriterlerini içeren maliyet kriteri; teslimat süresi ve faydalı ömür alt kriterlerini içeren zaman kriteri; boyut, güvenlik, güvenilirlik ve hizmet kalitesine uygunluk alt kriterlerini içeren fiziksel özellikler kriterleri çerçevesinde A319, A320 ve B737 uçakları değerlendirilmiştir. Çalışma sonucuna göre en uygun uçağın B737 olduğu tespit edilmiştir.

Dozic ve Kalic (2014) çalışmasında, Güneydoğu Avrupa bölgesinde 27 rotada bölgesel uçuşlar gerçekleştirdiği varsayılan Belgrad Havalimanı merkezli bir havayolu işletmesi için uçak seçim kararını AHP yöntemi ile değerlendirmiştir. Çalışmada 6 kriter üzerinden ERJ-190, CRJ-700, CRJ-900, CRJ-1000, ATR 72-500, ATR 72-600 ve Q 400 uçakları değerlendirmeye alınmıştır. Bölgesel uçuşlar için ATR 72-600 modeli en uygun uçak olarak belirlenmiştir.

Bruno ve arkadaşları (2015) çalışmasında, AHP ve Bulanık Küme Teorisini birlikte kullanarak Air Italy için gerekli uçak tipi seçimini anlatmaktadır. Çalışmada birim operasyonel maliyet, uçak fiyatı, seyir hızı, koltuk konforu, otonomi, kabin bagaj bölmesi boyutu, çevre kirliliği ve gürültü kriterleri baz alınarak Bombardier CRJ-1000, Sukhoi SSJ-100 ve Embraer ERJ-190 tipi uçaklar değerlendirilmiştir. Kriter ağırlıklarının AHP yöntemi ile belirlendiği, alternatif uçak tiplerinin ise Bulanık Küme Teorisi ile sıralandığı çalışmada havayolu işletmesi için en uygun uçağın Sukhoi SSJ-100 olduğu kararına varılmıştır.

Kiracı ve Bakır (2018a), çalışmalarında, herhangi bir havayolu işletmesi için kısa ve orta mesafe uçuşlarda kullanılacak uçak tipi seçiminde TOPSIS yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada yakıt tüketimi, fiyat, yolcu kapasitesi, menzil ve hız kriterleri doğrultusunda A320, A321, B737-800 ve B737-900ER tipi uçaklar karşılaştırılmıştır. Buna göre en uygun uçak tipi B737-800 olarak belirlenmiş ve bu uçak tipini sırası ile B737-900ER, A321, A320 uçakları takip etmiştir.

Kiracı ve Bakır (2018b), yapmış oldukları başka bir çalışmada ÇKKV yöntemlerini kullanarak ticari uçak seçimi yapmaktadır. Bu çalışmada yakıt tüketimi, fiyat, koltuk kapasitesi, menzil, maksimum yük kapasitesi, hız ve gaz emisyon miktarı kriterlerini kullanmışlardır. Kriter ağırlıkları AHP yöntemi ile belirlendikten sonra COPRAS ve MOORA yöntemleri uygulanarak uçak alternatiflerinin sıralaması elde edilmiştir. Her iki yöntemde de sıralama aynı çıkmış ve en iyi uçak tipinin B737-800 olduğu tespit edilmiştir. Bu uçağı sırası ile B737-900ER, A321 ve A320 takip etmiştir.

Güntut (2019), düşük maliyetli bir havayolu için filo planlama optimizasyonu yapabilmek amacıyla bulanık TOPSIS yöntemini kullanmıştır. Çalışmasında ilk olarak, karar vericilerle birlikte 4 farklı uçak üreticisine ait 17 farklı dar gövdeli uçak modelini değerlendirerek, 5 adet ana kriter ve bu kriterlere bağlı 21 adet alt kriter belirlenmiştir. Sonrasında iki aşamalı değerlendirme sürecine geçilmiştir. İlk aşamada, karar vericiler tarafından sözel değişkenler kullanılarak kriterler değerlendirilmiş ve ağırlıkları belirlenmiştir. İkinci aşamada, karar vericiler tarafından sözel değişkenler kullanılarak uçak alternatiflerinin performansları ifade

edilmiştir. Son olarak elde edilen veriler kullanılarak bulanık TOPSIS yöntemiyle hesaplamalar yapılmış ve alternatiflerin sıralanması sağlanmıştır.

Akyurt ve Kabadayı (2020) çalışmasında, Türkiye’de faaliyet gösteren bir hava kargo işletmesi için uçak seçim problemini ele almışlardır. Çalışmada maliyet, operasyonel uyumluluk ve zaman ana kriterleri altında tanımlı 16 alt kriter belirlenmiştir. Kriter ağırlıklarının hesaplanmasında bulanık AHP yöntemi, kargo uçağı alternatiflerinin sıralanmasında ise bulanık gri ilişkisel analiz (GIA) yöntemi kullanılmıştır. Buna göre firma için en faydalı uçak tipi B777F olarak belirlenirken ikinci sırada A320-200F, üçüncü sırada A310-300F son olarak da B747-400F yer almıştır.

Durmaz ve Gencer (2020) çalışmasında, Türk Hava Kuvvetleri Komutanlığı’nın kullanımına uygun akrobasi uçağı seçimi JSMAA programına yeni bir yazılım SMAA-2 ve SWARA-SMAA-2 yöntemleri ile analiz edilmiştir. Analizde uçak performansı, uluslararası prestij, pilot adaptasyonu, lojistik performans ve ekonomiklik kriterleri dikkate alınarak KT-1T, HÜRKUŞ-B, F-16, JF-17 tipi uçaklar arasında seçim yapılmış ve en uygun uçak modelinin F-16 olduğu görülmüştür.

Kiracı ve Akan (2020), herhangi bir havayolu işletmesi için uçak seçimini AHP ve TOPSIS yöntemlerinin Aralık Tip-2 Bulanık Küme (Interval Type-2 Fuzzy Sets) uzantısına entegre edildiği hibrid bir model kapsamında incelemiştir. Çalışmada ekonomik performans, teknik performans ve çevresel etki olmak üzere 3 ana kriter; koltuk/mil başına yakıt tüketimi, uçak hizmet ömrü, maksimum kalkış ağırlığı, koltuk kapasitesi, işletme maliyeti, uçak fiyatı, kirlilik ve gürültü olmak üzere 8 alt kriter kullanmışlardır. A320neo, A321neo, B737max8 ve B737max9 tipi uçaklar arasında yapılan değerlendirmede A321neo en iyi alternatif olarak belirlenmiştir.

Lozano ve Rodriquez (2020), İspanya Hava Kuvvetleri için ileri eğitim uçağı seçimini AHP ve Bulanık İdeal Referans Yöntemi (FRIM) kapsamında incelemiştir. Kriter olarak çatışma yüksekliği, dayanıklılık, itiş gücü, kalkış ağırlığı, kalkış mesafesi, hız, menzil, taktiksel kapasite, manevra yeteneği, ergonomi ve uyumluluk kriterlerini baz almışlardır. Çalışmada alternatif olarak değerlendirilen KAI T-50, Alenia Aermacchi M-346 Master, Yakovlev YAK-130, Northrop F-5 Freedom Fighter uçak tipleri arasından Alenia Aermacchi M-346 Master en avantajlı model olarak saptanmıştır.

Kocakaya ve arkadaşları (2021), Türkiye’de oluşturulacak bölgesel havacılık operasyonları için jet motorlu uçak modelinin seçim kararını küresel bulanık AHP ve küresel bulanık TOPSIS yöntemleri ile değerlendirmişlerdir. Çalışmada maliyet, teknik özellikler ve emniyet geçmişi ana kriterleri çerçevesinde 10 alt kriter ile 9 alternatif uçak değerlendirilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgulara göre küresel ağırlıklı aritmetik ortalama (SWAM) operatörüne göre Bombardier CRJ100/200 uçağı, küresel ağırlıklı geometrik ortalama (SWGGM) operatörüne bağlı olarak da Embraer ERJ-135 uçağı en iyi seçenek olarak tespit edilmiştir.

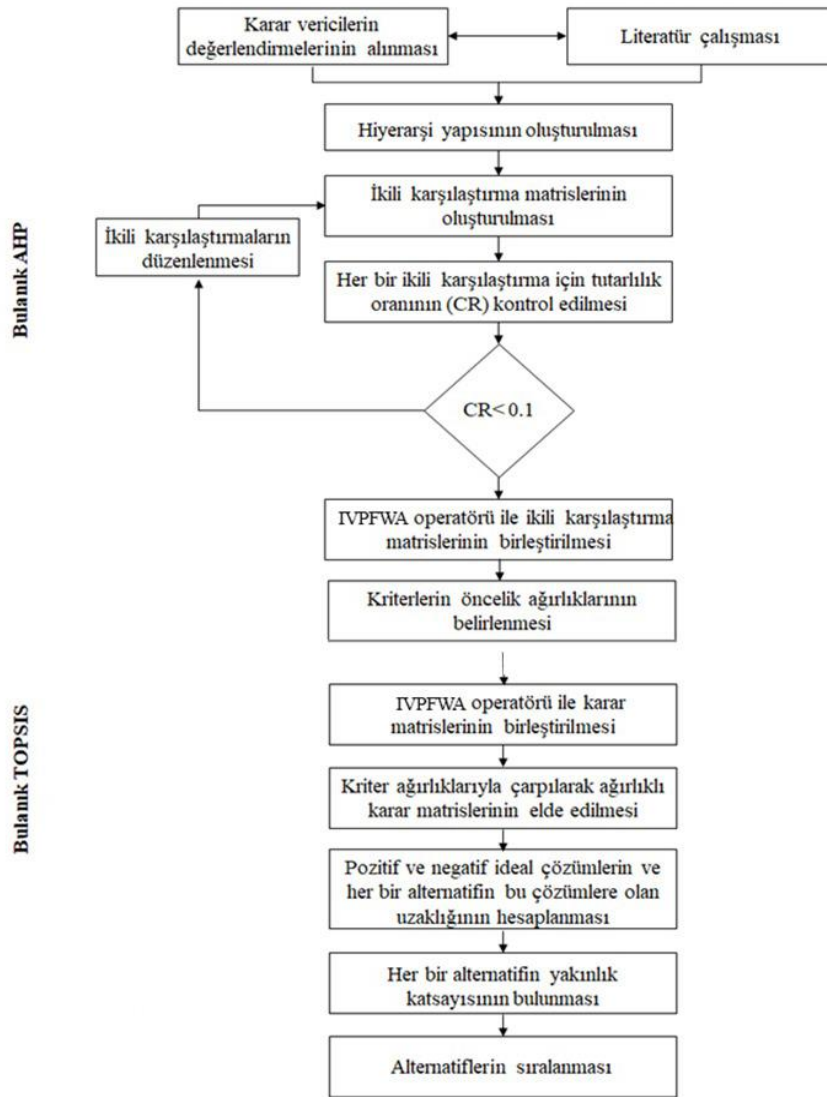
Kocaoğlu ve arkadaşları (2021) çalışmalarında, Türkiye’de filo alımını hedeflemeyen kişi veya işletmeler için AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanarak pistonlu tek motorlu uçak seçimi gerçekleştirmiştir. Çalışma sportif, bireysel ve eğitim amaçlı kullanılabilir 3 uçak

alternatifi arasından 8 kriter esas alınarak yapılmıştır. Çalışmalarında uçağın satın alma maliyeti, motor gücü, menzil, minimum kalkış mesafesi, servis tavanı, faydalı yük ve hız kriterlerini değerlendirdikleri görülmüştür.

2. YÖNTEM

2.1.Araştırma Modeli

Bu araştırmanın amacı havayolu işletmeleri için geniş gövde yolcu uçağı seçim kararını bulanık ÇKKV yöntemleri ile analiz etmektir. Çalışmada kriter ağırlıklarının aralık değerli Pisagor bulanık AHP yöntemi kullanılarak elde edildiği ve sonrasında alternatif uçak tiplerinin aralık değerli Pisagor bulanık TOPSIS yöntemiyle sıralandığı hibrit bir model önerilmektedir. Önerilen metodoloji kriter ağırlıklarının elde edilmesi ve tutarlılık testlerinin yapılması ile alternatiflerin sıralanması olmak üzere 2 aşamadan oluşmakta ve akış diyagramı özet olarak Şekil 1’de gösterilmektedir. Bu çalışma Etik Kurul izni gerektirmemektedir.



Şekil 1. Araştırma Modeli

2.2. Bulanık Kümeler

Mantığı ilk olarak sistemli bir şekilde ele alan ve mantık biliminin temellerini atan Aristoteles (M.Ö. 384-322) ile klasik mantık süreci başlamıştır. Boolean mantığı olarak da bilinen klasik mantığın temelinde kıyasa dayalı iki değerli bir anlayış yatmaktadır. Diğer bir deyişle klasik mantıkta sorulan sorunun cevabı ya doğrudur ya da yanlış. Programlama dilinde ise bu cevaplar 0 (yanlış ise) ve 1 (doğru ise) şeklinde ifade edildiğinden 0-1 mantığı olarak da bilinmektedir. Ancak gerçek dünyada doğru ya da yanlış gibi yalnızca iki kesin değerden söz etmek çoğu zaman mümkün değildir. Azerbaycan asıllı matematikçi ve bilgisayar bilimcisi Lotfi A. Zadeh 2 değerli mantığın limitleri üzerine çalışmış ve 1965 yılında yayınladığı bir makalesinde bulanık mantık kuramını ortaya atmıştır (Paksoy vd., 2013).

Klasik mantık ile bulanık mantık kavramları birbirinden farklı olduğu gibi klasik küme ile bulanık küme kavramları da birbirinden farklı şekilde tanımlanmaktadır. Klasik küme teorisinde bir elemanın bir kümeye ait olup olmadığı net bir şekilde belirli olup karakteristik fonksiyonla gösterilir. x elemanının kümenin elemanı olup olmamasına göre karakteristik fonksiyon 0 ya da 1 değerini alır (Peng ve Selvachandran, 2019; Şimşek vd, 2022). Klasik kümelerdeki ait ya da ait olmama durumuna karşın bulanık küme teorisinde kısmi aitlik durumu bulunmaktadır. Bulanık küme, “bir elemanın ilgili kümeye ait olmasının $[0,1]$ sürekli aralığında karakteristik fonksiyona atanan sayının büyüklüğü ile açıklandığı küme” olarak tanımlanmaktadır (Altaş, 1999).

Zadeh’in 1965 yılında bulanık küme teorisini ortaya atmasıyla birlikte belirsizliği ve kesin olmama durumunu ele alan birçok teori geliştirilmiştir. Zadeh’in sunduğu klasik bulanık küme teorisini bir elemanın kümeye ait olma derecesi üzerine kuruluyken, zamanla elemanın kümeye ait olmama derecesi, kümeye ait olup olmama konusundaki kararsızlığın derecesi vb. konularında da çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar sonucunda Tablo 1’de tarihsel gelişimi gösterilen bulanık küme uzantıları ortaya çıkmıştır.

Tablo 1. Bulanık Küme Uzantıları

Tarih	Araştırmacı	Bulanık Küme Tipi
1965	Zadeh	Klasik Bulanık Kümeler (Ordinart Fuzzy Sets)
1975	Zadeh	Tip-2 Bulanık Kümeler (Type-2 Fuzzy Sets)
1975	Zadeh, Sambuc ve Jahn	Aralık Değerli Bulanık Kümeler (Interval-Valued Fuzzy Sets)
1986	Atanassov	Sezgisel Bulanık Kümeler (Intuitionistic Fuzzy Sets)
2007	Garibaldi ve Ozen	Durağan Olmayan Bulanık Kümeler (Nonstationary Fuzzy Sets)
2010	Torra	Tereddütlü Bulanık Kümeler (Hesitant Fuzzy Sets)
2013	Yager	Pisagor Bulanık Kümeler (Pythagorean Fuzzy Sets)
2014	Cuong	Resimli Bulanık Kümeler (Picture Fuzzy Sets)
2019	Kutlu, Gündoğdu ve Kahraman	Küresel Bulanık Kümeler (Spherical Fuzzy Sets)

Kaynak: Kabak ve Erdebilli, 2021; Kahraman, Öztayşı ve Onar, 2016.

2.2.1. Pisagor Bulanık Kümeler

Atanassov’un 1986 yılında sunduğu sezgisel bulanık kümeler (IFS), bulanık kümedeki bir elemanın hem üye olma hem de üye olmama derecelerine dayanmaktadır. Klasik bulanık kümelerde üye olma ve üye olmama derecelerinin toplamı daima 1 iken sezgisel bulanık

kümelerde bu toplam 1'den küçük veya eşit olmalıdır. Her zaman bir elemanın üye olmama derecesinin 1- üye olma derecesine eşit olmadığı gerçek hayat örnekleri üzerinde bir tereddüt derecesinin olabileceği düşüncesine dayanmaktadır (Peng ve Yang, 2016).

Gerçek hayatta karşılaştığımız bazı durumlarda üyelik ve üye olmama derecelerinin toplamı birden büyük olabilir, ancak bunların kare toplamları birden küçük veya eşittir. Dolayısıyla, bu gibi durumlarda başa çıkmada yetersiz olan sezgisel bulanık kümelerin özel bir hali olan ikinci tip sezgisel bulanık kümeler Antanassov tarafından önerilmiştir. Ardından, Yager 2013 yılında sezgisel ikinci tip bulanık kümeleri Pisagor bulanık kümeler (PFS) olarak adlandırmıştır. Her bir sezgisel bulanık kümenin aynı zamanda bir Pisagor bulanık küme olduğu ancak tersinin doğru olmadığı göz önüne alındığında, Pisagor bulanık kümelerin karar verme problemleriyle başa çıkmak için daha üstün bir model olduğu belirtilmektedir (Peng ve Selvachandran, 2019). Aralık değerli Pisagor bulanık kümelerle ilişkin tanımlamalar ve matematiksel işlemler aşağıda sunulmuştur. (İlbarhar, Cebi, ve Kahraman, 2020; Peng ve Yang, 2016):

Tanım 1: \tilde{p} , X evreninde bulunan aralık değerli bir Pisagor bulanık küme (IVPFS) ve $x \in X$ olsun. x elementinin üye olma derecesi μ ve üye olmama derecesi ν , L ve U ise bu derecelerinin alt ve üst sınırlarını ifade ediyorsa, \tilde{p} kümesi Denklem 1'de belirtilen şekilde tanımlanır.

$$\tilde{p} = \{ (x, [\mu_p^L(x), \mu_p^U(x)], [\nu_p^L(x), \nu_p^U(x)]); x \in X \} \quad (1)$$

Tanım 2: $\tilde{p} = ([\mu^L, \mu^U], [\nu^L, \nu^U])$, $\tilde{p}_1 = ([\mu_1^L, \mu_1^U], [\nu_1^L, \nu_1^U])$ ve $\tilde{p}_2 = ([\mu_2^L, \mu_2^U], [\nu_2^L, \nu_2^U])$ şeklinde üç adet IVPFS olsun. $\lambda > 0$ olmak üzere pisagor bulanık sayılar ile yapılacak matematiksel işlemler Denklem 2, 3, 4, 5, 6 ve 7' de belirtilen formüller ile tanımlanır.

$$\begin{aligned} & \tilde{p}_1 \oplus \tilde{p}_2 \\ = & \left(\left[\sqrt{(\mu_1^L)^2 + (\mu_2^L)^2 - (\mu_1^L)^2(\mu_2^L)^2}, \sqrt{(\mu_1^U)^2 + (\mu_2^U)^2 - (\mu_1^U)^2(\mu_2^U)^2} \right], [\nu_1^L \nu_2^L, \nu_1^U \nu_2^U] \right) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \tilde{p}_1 \otimes \tilde{p}_2 \\ = & \left([\mu_1^L \mu_2^L, \mu_1^U \mu_2^U], \left[\sqrt{(\nu_1^L)^2 + (\nu_2^L)^2 - (\nu_1^L)^2(\nu_2^L)^2}, \sqrt{(\nu_1^U)^2 + (\nu_2^U)^2 - (\nu_1^U)^2(\nu_2^U)^2} \right] \right) \quad (3) \end{aligned}$$

$$\lambda \tilde{p} = \left(\left[\sqrt{1 - (1 - (\mu^L)^2)^\lambda}, \sqrt{1 - (1 - (\mu^U)^2)^\lambda} \right], [(\nu^L)^\lambda, (\nu^U)^\lambda] \right) \quad (4)$$

$$\tilde{p}^\lambda = \left([(\mu^L)^\lambda, (\mu^U)^\lambda], \left[\sqrt{1 - (1 - (\nu^L)^2)^\lambda}, \sqrt{1 - (1 - (\nu^U)^2)^\lambda} \right] \right) \quad (5)$$

$$\tilde{p}_1 \oplus \tilde{p}_2 \oplus \tilde{p}_3 = \tilde{p}_1 \oplus \tilde{p}_3 \oplus \tilde{p}_2 \quad (6)$$

$$\tilde{p}_1 \otimes \tilde{p}_2 \otimes \tilde{p}_3 = \tilde{p}_1 \otimes \tilde{p}_3 \otimes \tilde{p}_2 \quad (7)$$

Tanım 3: $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ ağırlık vektörü ve $w_i \in [0, 1]$; $w_i = 1$ olmak üzere aralık değerli Pisagor bulanık kümelerin aritmetik ortalama (IVPFWA) operatörü Denklem 8’de, aralık değerli Pisagor bulanık geometrik ortalama (IVPFWG) operatörü ise Denklem 9’da sunulan formüller yardımı ile hesaplanır.

$$\begin{aligned} & \text{IVPFWA}(\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_n) \\ &= \left(\left[\sum_{i=1}^n w_i \mu_i^L, \sum_{i=1}^n w_i \mu_i^U \right], \left[\sum_{i=1}^n w_i v_i^L, \sum_{i=1}^n w_i v_i^U \right] \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \text{IVPFWG}(\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_n) \\ &= \left(\left[\prod_{i=1}^n (\mu_i^L)^{w_i}, \prod_{i=1}^n (\mu_i^U)^{w_i} \right], \left[\prod_{i=1}^n (v_i^L)^{w_i}, \prod_{i=1}^n (v_i^U)^{w_i} \right] \right) \end{aligned} \quad (9)$$

2.3. Analitik Hiyerarşi Prosesi

1977 yılında Thomas Lorie Saaty tarafından geliştirilen AHP (Analytic Hierarchy Process), karar problemini hiyerarşik yapıda inceleyen toplamli ağırlıklandırma yöntemlerinden biridir. Karar alternatifleri hiyerarşik yapının tabanını oluştururken amaç hiyerarşinin en üstünde yer almaktadır (İlbarhar, Cebi ve Kahraman, 2019). AHP yönteminin aşamaları aşağıdaki gibi sıralanmaktadır (Tezcan, 2021: 85):

- i. Problem net bir şekilde tanımlanarak amacı, kriterleri ve alternatifleri gösteren hiyerarşik yapı oluşturulur.
- ii. Tablo 2’deki Saaty tarafından sunulan önem skalası kullanılarak önce kriterler ve varsa alt kriterler için, sonrasında ise kriterlere göre alternatiflerin kıyaslandığı ikili karşılaştırma matrisleri hazırlanır.
- iii. Her bir sütun değerinin ayrı ayrı sütun toplamına bölünmesiyle normalleştirilmiş matris hazırlanır. Satır bileşenlerinin ortalaması alınarak yüzde önem ağırlıkları bulunur ve bu ağırlıklar öncelik vektörünü oluşturur.
- iv. Tutarlılık oranı (CR=CI/RI) sayesinde kıyaslamalardaki tutarlılık ölçülür. Deneysel gözlemlere göre tutarlılık oranının %10’dan küçük olması kabul edilebilirdir ve yapılan karşılaştırmalardaki yargılar tutarlıdır. Oranın %10’dan büyük çıkması durumunda karar matrisi yeniden düzenlenmelidir.
- v. Kriterlerin öncelik vektörlerinin birleşim ile oluşturulan tüm öncelikler matrisi ile alternatiflerin öncelik vektörü çarpılıp toplanarak sonuç vektörü elde edilir. En yüksek değeri alan alternatif karar problemi için en iyi alternatif olarak seçilir.

Tablo 2. AHP Önem Skalası

Önem Derecesi	Tanım	Açıklama
1	Aynı Derecede Mühim	Faktörlerin ikisi de eşit önemde olmasıdır
3	Orta Derecede Mühim	Bir faktörün diğer faktöre göre biraz daha önemli olmasıdır. (Az Üstünlük)
5	Kuvvetli Derecede Mühim	Bir faktörün diğer faktöre göre belirgin bir şekilde önemli olmasıdır. (Fazla Üstünlük)
7	Çok Kuvvetli Derecede Mühim	Faktörlerden birinin diğerine göre yüksek düzeyde önemli olmasıdır. (Çok Üstünlük)
9	Mutlak Derecede Mühim	Faktörlerden birinin diğerine göre çok belirgin düzeyde daha önemli olmasıdır. (Kesin Üstünlük)
2,4,6,8	Ara Değerler	Faktörler arasında yukarıda bulunan derecelerin ara değerleridir. (Uzlaşma Değerleri)
Karşılıklı Değerler	a,b karşılaştırıldığında değerlerden biri (x)ise ; b,a ile karşılaştırılırken alacağı değer (1/x)'dir.	

2.4. TOPSIS Yöntemi

Hwang ve Yoon tarafından 1981 yılında geliştirilen TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), alternatiflerin kriterlere göre değerlendirilmesinde, kriterler için belirlenen referans pozitif ideal çözüme en yakın, negatif ideal çözüme en uzak olması mantığına göre en iyi alternatif (ler)in belirlenmesi yöntemidir. TOPSIS yönteminin adımları aşağıdaki gibi sıralanmaktadır (Chen, 2000; Hwang ve Yoon, 1981):

- Karar problemi tanımlanarak amaç, alternatifler ve kriterler belirlenir.
- Karar verici tarafından alternatifler (n) ve kriterler (m) değerlendirilerek $n \times m$ boyutunda karar matrisi oluşturulur.
- Normalize edilmiş standart karar matrisi oluşturulur ve ağırlık değerleriyle çarpılarak ağırlıklı standart karar matrisi elde edilir.
- Değerlendirme ölçütünün amacına göre her bir kriter için pozitif ve negatif ideal çözüm kümeleri oluşturulur. Değerlendirme kriterleri maksimizasyon (fayda) yönlü ise pozitif ideal çözüm ağırlıklı standart matrisinin sütunlarının en büyük değerleri olup negatif ideal çözüm için en küçük değerleridir. Değerlendirme kriterlerinin minimizasyon (maliyet) yönlü olması durumunda tam tersi değerler dikkate alınır.
- Öklid uzaklığı kullanılarak her bir alternatife ilişkin değerlendirme ölçütlerinin pozitif ve negatif ideal çözüme uzaklıkları hesaplanır.
- Pozitif ve negatif ideal çözüme olan uzaklıklar üzerinden her bir alternatif için göreceli yakınlık katsayısı hesaplanır. Katsayı negatif ideal çözüme uzaklığın toplam uzaklık içindeki payını gösterdiğinden katsayısı 1'e yakın alternatifler tercih edilir.

2.5. Aralık Değerli Pisagor Bulanık AHP-TOPSIS Yöntemi

Çalışmada uygulanacak aralık değerli Pisagor bulanık AHP-TOPSIS metodolojisinin aşamaları aşağıda gösterilmektedir:

Adım 1 Karar problemi net olarak tanımlanır ve ardından problem; amaç, kriterler ve alternatiflerden oluşan bir hiyerarşi yapısına dönüştürülür.

Adım 2 Kriterler ve alternatifleri değerlendirecek karar verici ve uzmanların belirlenerek karar modeline göre kriterler için ikili karşılaştırma matrisini oluşturmaları beklenir. Öncelikle klasik AHP yöntemindeki dilsel skala ve karşılık gelen klasik değerleri kullanılarak her bir ikili karşılaştırma matrisi için Saaty'nin tutarlılık prosedürü uygulanır (Saaty, 1980). Tutarlılık oranı 0,1'den küçük olan karşılaştırma matrisi tutarlı olarak kabul edilir. Sonrasında Tablo 3'teki dilselskala ve karşılık gelen aralık değerli Pisagor bulanık sayılar ile ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur.

Tablo 3. Aralık Değerli Pisagor Bulanık AHP-TOPSIS Dilsel Skala

Sözel ifadeler	Aralık Değerli Pisagor Bulanık Sayılar ([a, b], [c, d])
Kesinlikle yüksek derecede önemli (AMI)	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])
Çok yüksek derecede önemli (VHI)	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
Yüksek derecede önemli (HI)	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])
Ortalama üstü derecede önemli (SMI)	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])
Eşit derecede önemli (EI)	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])
Ortalama altı derecede önemli (SLI)	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])
Düşük derecede önemli (LI)	([0.21, 0.34], [0.56, 0.69])
Çok düşük derecede önemli (VLI)	([0.12, 0.25], [0.65, 0.78])
Kesinlikle düşük derecede önemli (ALI)	([0.03, 0.16], [0.74, 0.87])

Adım 3 Aralık değerli Pisagor ağırlıklı aritmetik ortalama (IVPFWA) formülü kullanılarak farklı uzmanlar tarafından oluşturulan karar matrisleri birleştirilir.

$$= \left\langle \left[\sqrt{1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{iL}^2)^{w_i}}, \sqrt{1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{iU}^2)^{w_i}} \right], \right\rangle \quad (10)$$

$$\left[\prod_{i=1}^n v_{iL}^{w_i}, \prod_{i=1}^n v_{iU}^{w_i} \right]$$

Adım 4 Denklem 11 ve 12'deki formüller ile üyelik ve üye olmama derecelerinin alt ve üst değerleri kullanılarak fark matrisi $D = (d_{ik})_{m \times m}$ elde edilir.

$$d_{ikL} = \mu_{ikL}^2 - v_{ikU}^2 \quad (11)$$

$$d_{ikU} = \mu_{ikU}^2 - v_{ikL}^2 \quad (12)$$

Adım 5 Denklem 13 ve 14 vasıtasıyla aralıklı çarpım matrisi $S = (S_{ik})_{m \times m}$ elde edilir.

$$S_{ikL} = \sqrt{1000 d_{ikL}} \quad (13)$$

$$s_{ikU} = \sqrt{1000^{d_{ikU}}} \quad (14)$$

Adım 6 İkili karşılaştırma matrisi elemanları r_{ik} için denklem 15 vasıtasıyla belirlilik değeri T_{ik} hesaplanır.

$$\tau_{ik} = 1 - (\mu_{ikU}^2 - \mu_{ikL}^2) - (v_{ikU}^2 - v_{ikL}^2) \quad (15)$$

Adım 7 Belirlilik değeri ve aralıklı çarpım matrisinin çarpılmasıyla normalizasyon öncesi ağırlık matrisi $T = (t_{ik})_{m \times m}$ oluşturulur.

$$t_{ik} = \left(\frac{s_{ikL} + s_{ikU}}{2} \right) \tau_{ik} \quad (16)$$

Adım 8 Normalleştirilmiş öncelik ağırlıkları w_i Denklem 17 vasıtasıyla hesaplanır.

$$w_i = \frac{\sum_{k=1}^m t_{ik}}{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m t_{ik}} \quad (17)$$

Kriter ağırlıklarının ardından alternatiflerin sıralanacak olduğu 2. aşama, uzmanların değerlendirmelerini toplayarak 9. Adım ile başlar ve alternatifleri önceliklendirerek sona erer.

Adım 9 Karar vericilerin her bir alternatifi Tablo 3'teki dilsel skala yardımıyla değerlendirmesi istenir ve ardından dilsel ifadeler aynı çizelge yardımıyla karşılık gelen aralık değerli Pisagor bulanık sayılara dönüştürülerek Pisagor karar matrisleri $D = C_j(X_i)_{m \times n}$ oluşturulur. Burada $C_j (j = 1, 2, \dots, n)$ ve $X_i (i = 1, 2, \dots, m)$ sırasıyla kriterleri ve alternatifleri göstermekte olup karar matrisi D aşağıdaki gibidir.

$$D = C_j(x_i)_{m \times n} =$$

$$\begin{bmatrix} ([\mu_{11}^L(u), \mu_{11}^U(u)], [V_{11}^L(u), V_{11}^U(u)]) & \dots & ([\mu_{1n}^L(u), \mu_{1n}^U(u)], [V_{1n}^L(u), V_{1n}^U(u)]) \\ ([\mu_{m1}^L(u), \mu_{m1}^U(u)], [V_{m1}^L(u), V_{m1}^U(u)]) & \dots & ([\mu_{mn}^L(u), \mu_{mn}^U(u)], [V_{mn}^L(u), V_{mn}^U(u)]) \end{bmatrix}$$

Adım 10 Birden fazla karar verici olması durumunda öncelikle her bir uzmanın ayrı ayrı karar matrisini oluşturması talep edilir. Ardından denklem 10'daki aralık değerli Pisagor bulanık ağırlıklı aritmetik ortalama (IVPFWA) ile karar matrisleri birleştirilir.

Adım 11 Denklem 18 kullanılarak kriter ağırlıkları ile değerlendirme matrisleri çarpılarak ağırlıklı aralık değerli Pisagor bulanık karar matrisi $D = C_j(X_{iw})_{m \times n}$ oluşturulur.

$$\lambda. \tilde{a} = \left\{ \left[\sqrt{1 - (1 - a^2)^\lambda}, \sqrt{1 - (1 - b^2)^\lambda} \right], [c^\lambda, d^\lambda] \right\} \quad (18)$$

Adım 12 Aşağıdaki skor fonksiyonu vasıtasıyla ağırlıklı aralık değerli Pisagor bulanık karar matrisi oluşturulur.

$$\begin{aligned}
& \text{Score}(C_j(x_{iw})) \\
&= \left((\mu_p^L(u))^2 + (\mu_p^U(u))^2 - (v_p^L(u))^2 - (v_p^U(u))^2 \right) / 2 \quad (19)
\end{aligned}$$

$$\text{Score}(\tilde{P}) \in [-1, 1]$$

Adım 13 Bir önceki adımda elde edilen skor değerleriyle aralık değerli Pisagor bulanık pozitif ideal çözüm (IVPF-PIS) X^* ve negatif ideal çözüm (IVPF-NIS) X^- ile hesaplanır.

$$X^* = \{C_j \max_i < \text{Score}(C_j(x_{iw})) > \mid j = 1, 2, \dots, n\} \quad (20)$$

$$X^- = \{C_j \min_i < \text{Score}(C_j(x_{iw})) > \mid j = 1, 2, \dots, n\} \quad (21)$$

Adım 14 Her bir alternatifin pozitif ve negatif ideal çözüme olan uzaklığı Denklem 22 ve 23 vasıtasıyla hesaplanır.

$$\begin{aligned}
d(X_{ij}, X_j^+) &= \frac{1}{4n} \sum_{j=1}^n \left(|(\mu_{ij}^L)^2 - (\mu_j^+)^2| + |(\mu_{ij}^U)^2 - (\mu_j^+)^2| \right. \\
&\quad \left. + |(v_{ij}^L)^2 - (v_j^+)^2| + |(v_{ij}^U)^2 - (v_j^+)^2| \right) \quad (22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d(X_{ij}, X_j^-) &= \frac{1}{4n} \sum_{j=1}^n \left(|(\mu_{ij}^L)^2 - (\mu_j^-)^2| + |(\mu_{ij}^U)^2 - (\mu_j^-)^2| \right. \\
&\quad \left. + |(v_{ij}^L)^2 - (v_j^-)^2| + |(v_{ij}^U)^2 - (v_j^-)^2| \right) \quad (23)
\end{aligned}$$

Adım 15 Denklem 24 vasıtasıyla her bir alternatifin yakınlık katsayısı elde edilir ve yakınlık katsayısına göre alternatifler sıralanarak en iyi çözüm bulunur.

$$\text{Yakınlık Katsayısı}_i = \frac{d(X_{ij}, X_j^-)}{d(X_{ij}, X_j^-) + d(X_{ij}, X_j^+)} \quad (24)$$

3. BULGULAR

Havayolu işletmeleri açısından uçak seçim kararının hangi kriterlere göre analiz edileceği ve bu kriterler üzerinden hangi uçak modelinin seçilmesi gerektiği bu çalışmanın konusu olarak incelenmektedir. Modelin uygulamasına geçilmeden önce uçak seçimi üzerine kapsamlı bir literatür taraması yapılmış, ardından farklı havayolu işletmelerinin filo planlama departmanında çalışan 3 uzman karar verici ile görüşülerek modelde değerlendirmeye alınmak üzere 6 kriter belirlenmiştir: Yakıt tüketimi (C1), işletme ve yedek parça maliyeti (C2), satın alma maliyeti (C3), maksimum koltuk kapasitesi (C4), menzil (C5), maksimum kalkış ağırlığı/MTOW (C6). Sonrasında kriterler açısından değerlendirilmek üzere yeni nesil geniş gövde yolcu uçakları arasından 8 alternatif uçak

modelinin alternatifler kümesi olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Çalışmada kullanılan alternatifler: B787-10 (A1), B787-9 (A2), B787-8 (A3), A350-1000 (A4), A350-900 (A5), A330-900 (A6), A330-800 (A7), A330-300 (A8) olarak belirlenmiştir.

Çalışmada değerlendirmeye alınan 6 kriter ve 8 alternatif ile KV1, KV2, KV3 olmak üzere 3 uzman karar vericinin değerlendirmeleri Bölüm 2.5. Aralık Değerli Pisagor Bulanık AHP-TOPSIS' te verilen adımlar üzerinden analiz edilmiştir. Her bir karar vericinin Tablo 3'te verilen dilsel skalayı kullanarak AHP anketine verdiği cevaplar sonucunda oluşan ikili karşılaştırmalar KV1, KV2 ve KV3 için sırasıyla Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. İkili Karşılaştırmalar Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	EI, EI, EI	SLI, VHI, EI	SLI, SMI, SMI	EI, EI, EI	EI, EI, SMI	SLI, SMI, HI
C2		EI, EI, EI	SMI, LI, EI	SMI, VLI, EI	VHI, VLI, EI	SMI, SLI, SMI
C3			EI, EI, EI	EI, EI, SMI	SMI, SMI, SMI	SMI, SMI, VHI
C4				EI, EI, EI	HI, SMI, EI	SMI, SMI, HI
C5					EI, EI, EI	EI, EI, SMI
C6						EI, EI, EI

Her bir ikili karşılaştırma için klasik AHP yöntemindeki dilsel skala ve karşılık gelen klasik değerleri kullanılarak tutarlılık oranı hesap edilmiştir. KV1, KV2 ve KV3 için tutarlılık oranı sırasıyla 0.089, 0.071, 0.095 olarak hesaplanmış ve 0.1'den küçük olduğundan tüm karar vericilerin değerlendirmeleri tutarlı kabul edilerek modelin uygulanmasına geçilmiştir. Çalışmada eşit önem derecesine sahip 3 uzman karar vericinin değerlendirmeleri Tablo 3'teki dilsel skala baz alınarak karşılık gelen aralık değerli Pisagor bulanık sayılar ile eşleştirildiği ikili karşılaştırma matrisleri denklem 10'daki aralık değerli Pisagor ağırlıklı aritmetik (IVPFWA) operatörüyle birleştirilmiş ve aşağıdaki ikili karşılaştırma matrisi elde edilmiştir (Tablo 5).

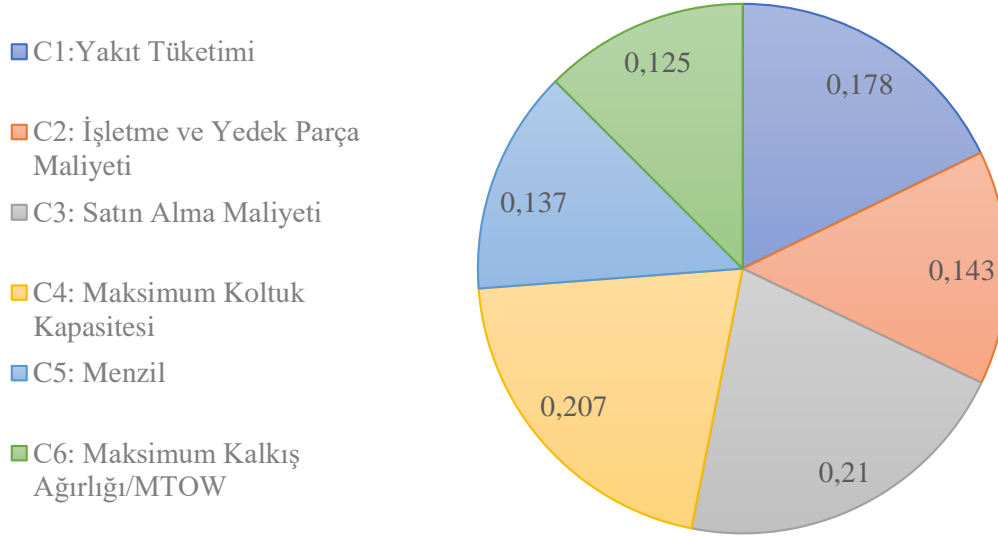
Tablo 5. IVPFWA Operatörüyle Oluşturulmuş İkili Karar Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.48, 0.62], [0.28, 0.42])	([0.42, 0.55], [0.35, 0.48])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.41, 0.54], [0.35, 0.48])	([0.46, 0.59], [0.31, 0.44])
C2		([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.37, 0.5], [0.4, 0.53])	([0.36, 0.49], [0.42, 0.56])	([0.46, 0.59], [0.31, 0.46])	([0.42, 0.55], [0.35, 0.48])
C3			([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.41, 0.54], [0.35, 0.48])	([0.47, 0.6], [0.3, 0.43])	([0.54, 0.68], [0.22, 0.36])
C4				([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.48, 0.61], [0.29, 0.42])	([0.5, 0.63], [0.27, 0.4])
C5					([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.41, 0.54], [0.35, 0.48])
C6						([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])

Birleştirilmiş karar matrisi üzerinden Bölüm 2.5.'deki adım 4-5-6-7 uygulanmış ve sonuçlarında sırasıyla fark matrisi, aralıklı çarpım matrisi, belirlilik değeri ve Tablo 6'daki normalizasyon öncesi ağırlık matrisleri hesaplanmıştır. Sonrasında Denklem 17 vasıtasıyla normalize edilmiş öncelik ağırlıkları Şekil 2'deki gibi elde edilmiştir

Tablo 6. Normalizasyon Öncesi Ağırlık Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00	1.52	1.04	0.83	1.00	1.32
C2	0.66	1.00	0.76	0.68	1.27	1.04
C3	0.96	1.32	1.00	1.00	1.41	2.22
C4	1.20	1.48	1.00	1.00	1.49	1.73
C5	1.00	0.79	0.71	0.67	1.00	1.00
C6	0.76	0.96	0.45	0.58	1.00	1.00

**Şekil 2.** Kriterlerin Normalize Edilmiş Öncelik Vektörü

Kriter ağırlıklarının bulunmasıyla birlikte 1. Aşama tamamlanmış, ardından karar vericilerin her bir kriter için alternatifleri değerlendirmesiyle modelin 2. Aşaması uygulanmaya başlamıştır. Her bir karar vericinin Tablo 3'teki dilsel skala yardımıyla alternatifleri değerlendirmesi ve ardından ifadelerin aynı tablo yardımıyla karşılık gelen aralık değerli Pisagor bulanık sayılara dönüştürülerek oluşturulan karar matrisleri KV1, KV2 ve KV3 için sırasıyla Tablo 7, 8 ve 9 ile aşağıda sunulmuştur.

Tablo 7. KV1 Tarafından Yapılan Değerlendirme Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A2	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A3	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A4	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])
A5	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])

A6	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])
A7	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A8	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])

Tablo 8. KV2 Tarafından Yapılan Değerlendirme Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A2	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A3	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A4	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A5	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A6	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.60], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A7	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A8	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.43], [0.30, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])

Tablo 9. KV3 Tarafından Yapılan Değerlendirme Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A2	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.21, 0.34], [0.56, 0.69])
A3	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])
A4	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])
A5	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A6	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])
A7	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.21, 0.34], [0.56, 0.69])	([0.12, 0.25], [0.65, 0.78])
A8	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])

Karar vericilerin yapmış olduğu sözel değerlendirmeler Tablo 3'teki aralık değerli Pisagor bulanık sayı karşılıkları üzerinden Denklem 10'daki aralık değerli Pisagor bulanık ağırlıklı aritmetik ortalama (IVPFWA) ile alternatiflerin kriterler bakımından değerlendirildiği karar matrisi elde edilmiştir.

Tablo 10. IVPFWA Operatörü ile Birleştirilmiş Karar Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	([0.59, 0.73], [0.14, 0.31])	([0.59, 0.72], [0.17, 0.31])	([0.54, 0.67], [0.23, 0.37])	([0.45, 0.58], [0.31, 0.45])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A2	([0.48, 0.61], [0.29, 0.42])	([0.68, 0.82], [0.08, 0.22])	([0.59, 0.73], [0.14, 0.32])	([0.6, 0.74], [0.13, 0.3])	([0.59, 0.72], [0.17, 0.31])	([0.56, 0.7], [0.2, 0.35])
A3	([0.43, 0.56], [0.33, 0.47])	([0.57, 0.7], [0.2, 0.33])	([0.43, 0.56], [0.33, 0.47])	([0.5, 0.63], [0.26, 0.4])	([0.59, 0.73], [0.14, 0.32])	([0.57, 0.71], [0.19, 0.33])
A4	([0.66, 0.8], [0.07, 0.24])	([0.64, 0.78], [0.1, 0.26])	([0.56, 0.71], [0.16, 0.35])	([0.56, 0.7], [0.16, 0.35])	([0.69, 0.83], [0.06, 0.21])	([0.71, 0.85], [0.05, 0.19])
A5	([0.63, 0.77], [0.11, 0.27])	([0.71, 0.85], [0.05, 0.19])	([0.51, 0.64], [0.26, 0.4])	([0.66, 0.8], [0.07, 0.24])	([0.62, 0.75], [0.14, 0.28])	([0.68, 0.82], [0.08, 0.22])
A6	([0.6, 0.74], [0.13, 0.3])	([0.68, 0.82], [0.08, 0.22])	([0.51, 0.64], [0.26, 0.4])	([0.57, 0.72], [0.15, 0.33])	([0.59, 0.72], [0.17, 0.31])	([0.66, 0.79], [0.09, 0.24])
A7	([0.43, 0.56], [0.33, 0.47])	([0.59, 0.72], [0.17, 0.31])	([0.37, 0.5], [0.4, 0.54])	([0.45, 0.58], [0.31, 0.45])	([0.48, 0.61], [0.29, 0.43])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.37])
A8	([0.57, 0.72], [0.15, 0.33])	([0.55, 0.68], [0.21, 0.35])	([0.46, 0.59], [0.31, 0.44])	([0.48, 0.62], [0.28, 0.42])	([0.61, 0.75], [0.12, 0.29])	([0.68, 0.82], [0.08, 0.22])

Aralık değerli Pisagor bulanık sayının bir skaler ile çarpımını gösteren denklem 18'deki şekilde Şekil 2'deki kriter ağırlıkları ile Tablo 10'daki birleştirilmiş karar matrisi çarpılmış ve aşağıdaki ağırlıklı karar matrisi elde edilmiştir (Tablo11).

Tablo 11. IVPFWA Operatörü ile Birleştirilmiş Ağırlıklı Karar Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	([0.91, 0.95], [0.7, 0.81])	([0.93, 0.96], [0.78, 0.84])	([0.88, 0.92], [0.73, 0.81])	([0.85, 0.89], [0.78, 0.84])	([0.92, 0.95], [0.81, 0.86])	([0.95, 0.97], [0.77, 0.84])
A2	([0.88, 0.92], [0.8, 0.86])	([0.95, 0.97], [0.69, 0.8])	([0.89, 0.94], [0.67, 0.79])	([0.9, 0.94], [0.66, 0.78])	([0.93, 0.96], [0.79, 0.85])	([0.93, 0.96], [0.82, 0.88])
A3	([0.86, 0.9], [0.82, 0.87])	([0.92, 0.95], [0.79, 0.85])	([0.84, 0.89], [0.8, 0.85])	([0.87, 0.91], [0.75, 0.83])	([0.93, 0.96], [0.77, 0.86])	([0.93, 0.96], [0.81, 0.87])
A4	([0.93, 0.96], [0.62, 0.77])	([0.94, 0.96], [0.72, 0.82])	([0.89, 0.93], [0.68, 0.8])	([0.88, 0.93], [0.68, 0.8])	([0.95, 0.97], [0.68, 0.81])	([0.96, 0.98], [0.68, 0.81])
A5	([0.92, 0.95], [0.68, 0.79])	([0.95, 0.98], [0.65, 0.79])	([0.87, 0.91], [0.75, 0.83])	([0.92, 0.96], [0.57, 0.74])	([0.94, 0.96], [0.77, 0.84])	([0.95, 0.97], [0.72, 0.83])
A6	([0.91, 0.95], [0.7, 0.81])	([0.95, 0.97], [0.69, 0.8])	([0.87, 0.91], [0.75, 0.83])	([0.89, 0.93], [0.67, 0.79])	([0.93, 0.96], [0.79, 0.85])	([0.95, 0.97], [0.74, 0.84])
A7	([0.86, 0.9], [0.82, 0.87])	([0.93, 0.96], [0.78, 0.84])	([0.81, 0.86], [0.83, 0.88])	([0.85, 0.89], [0.78, 0.84])	([0.91, 0.94], [0.84, 0.89])	([0.93, 0.95], [0.82, 0.88])
A8	([0.91, 0.94], [0.71, 0.82])	([0.92, 0.95], [0.8, 0.86])	([0.85, 0.9], [0.78, 0.84])	([0.86, 0.9], [0.77, 0.84])	([0.94, 0.96], [0.75, 0.84])	([0.95, 0.97], [0.72, 0.83])

Ardından ağırlıklı karar matrisi Denklem 19'daki skor fonksiyonu vasıtasıyla durulaştırılmış ve Tablo 12'de sunulmuştur.

Tablo 12. Ağırlıklı Karar Matrisinin Skor Fonksiyon Değerleri

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	3.366	2.676	2.309	1.554	1.914	2.003
A2	2.036	3.414	2.800	2.818	2.052	1.578
A3	1.401	2.507	1.379	1.832	1.868	1.616
A4	3.864	3.067	2.589	2.253	2.533	2.251
A5	3.433	3.689	2.079	3.421	2.182	2.133
A6	3.137	3.414	2.079	2.631	2.052	2.047
A7	1.401	2.676	0.907	1.554	1.458	1.546
A8	2.913	2.183	1.742	1.642	2.156	2.133

Her kriter için skor fonksiyonlarının aldığı en büyük ve en küçük değerleri üzerinden pozitif ideal çözüm (PIS) ve negatif ideal çözüm (NIS) saptanmıştır. Bulunan çözümler Tablo 12’de en büyük değerler sarı ile, en küçük değerler ise gri renk ile gösterilmiştir. Tablo 11’deki ağırlıklı değerler en büyük ve en küçük değerlere karşılık gelmesine göre pozitif ve negatif ideal çözüm olarak Tablo 13’te sunulmuştur.

Tablo 13. Aralık değerli Pisagor Bulanık Pozitif ve Negatif İdeal Çözümler

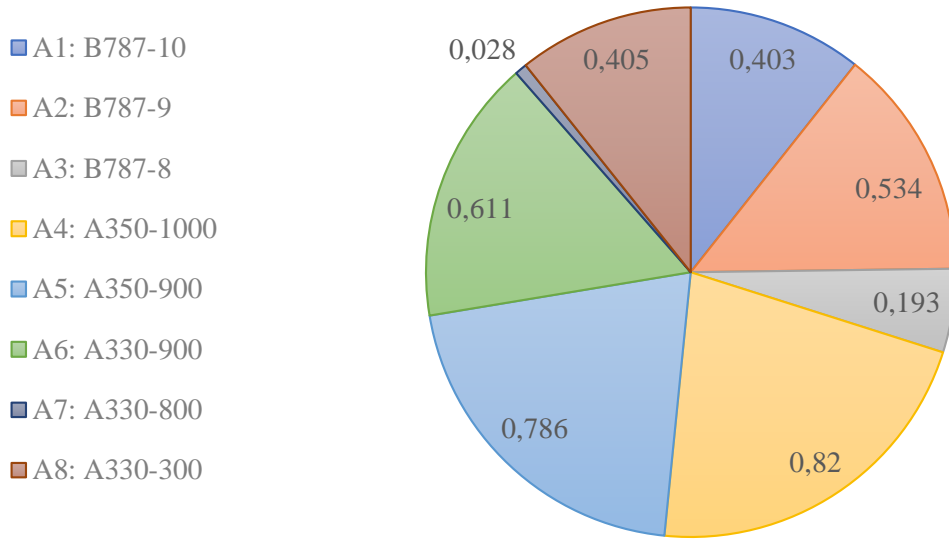
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
X^+	([0.93, 0.96], [0.62, 0.77])	([0.95, 0.98], [0.65, 0.79])	([0.89, 0.94], [0.67, 0.79])	([0.92, 0.96], [0.57, 0.74])	([0.95, 0.97], [0.68, 0.81])	([0.96, 0.98], [0.68, 0.81])
X^-	([0.86, 0.9], [0.82, 0.87])	([0.92, 0.95], [0.8, 0.86])	([0.81, 0.86], [0.83, 0.88])	([0.85, 0.89], [0.78, 0.84])	([0.91, 0.94], [0.84, 0.89])	([0.93, 0.95], [0.82, 0.88])

Son olarak, her bir alternatifin pozitif ve negatif ideal çözümlere olan mesafeleri sırasıyla denklem 22 ve 23 vasıtasıyla hesaplanmıştır. Denklem 24 ile mesafeler üzerinden yakınlık katsayısı hesaplanmış ve elde edilen bilgiler Tablo 14’de sunulmuştur.

Tablo 14. İdeal Çözümlere Olan Mesafeler ve Yakınlık Katsayıları

	$d(X_{ij}, X_j^+)$	$d(X_{ij}, X_j^-)$	Yakınlık Katsayısı
A1	0.087	0.059	0.403
A2	0.068	0.078	0.534
A3	0.118	0.028	0.193
A4	0.026	0.120	0.820
A5	0.031	0.115	0.786
A6	0.057	0.089	0.611
A7	0.142	0.004	0.028
A8	0.087	0.059	0.405

Yakınlık katsayıları büyükten küçüğe doğru sıralandığında en uygun alternatif A4 (A350-1000) olarak bulunmuş ve tüm alternatif sıralaması $A4 > A5 > A6 > A2 > A8 > A1 > A3 > A7$ şeklinde çıkmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Alternatiflerin Sıralaması

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Küresel ekonominin ve şehirleşmenin büyümesi havayolu taşımacılığını büyüyen bir pazar olarak tutmaya devam etmektedir. İki büyük ticari uçak üreticisi olan Airbus ve Boeing, yaptıkları pazar araştırmasına göre, havayolu trafiğindeki büyümenin devam edeceğini tahmin etmektedir. Airbus, “Global Market Forecast 2019-2038” araştırmasına göre, 20 yıllık aralık için yüzde 4.3’lük büyüme öngörürken, Boeing, “Commercial Market Outlook 2019-2038” araştırmasına göre, yüzde 4.6’lık büyüme öngörmektedir. Bu büyüme tahminlerine göre, havayolu taşımacılığını kullanan yolcu sayısının giderek artması beklenmektedir. Yolcu sayısındaki artış beraberinde uçak sayısını da artıracaktır. Airbus, aynı araştırmaya göre, 2019’da 22.680 olan yolcu uçak sayısının 2038’de 47.680 olacağını öngörmektedir (Tezcan ve Aktaş, 2002: 3). Benzer şekilde, küresel bir danışmanlık şirketi olan Oliver Wyman’ın havacılık sektörünün geleceğine yönelik 2018 yılında yayınladığı raporda aynı yıl için dünya genelinde 5273 adet geniş gövdeli yolcu uçağının kullanımda olduğu, 2028 yılına yönelik tahminde ise bu sayının 7377 olacağı belirtilmektedir (Oliver Wyman, 2018).

Havayolu taşımacılığının temel bileşenlerinden birisi olan uçaklar yüksek satın alma maliyetleri nedeniyle havayolu işletmeleri için en önemli maliyet kalemlerinden birisi olmaktadır. Bu nedenle yatırım sermayesinin geri kazanılması süreci ancak uzun vadede ve farklı uçak alternatifleri arasından piyasa koşulları ile havayollarının gereksinimlerini en iyi şekilde karşılayan uçak tip (ler)inin seçimi ile tamamlanabilecektir. Farklı uçak alternatifleri arasından filoya dahil edilmesi gereken uçak tip (ler)inin seçimi havayollarının kurumsal ve operasyonel performanslarını, kapasite geliştirmelerini ve sürdürülebilirliklerini etkileyen stratejik bir karardır. Mevcut literatür, uçak tipi seçiminde çeşitli niceliksel ve niteliksel faktörlerin önemli bir rol oynadığı ve bu durumun da filo planlamacıları açısından yüksek karmaşıklık düzeyinde bir problem olduğunu göstermektedir. Bu noktadan hareketle bu

araştırmada, havayolu işletmelerinin yatırım planları içerisinde çok büyük bir yere sahip olan uçak tipi seçimi planlarının daha doğru yapılabilmesine yardımcı olmak ve literatüre katkı sağlayabilmek için geniş gövdeli yolcu uçak tipi seçimi problemi ele alınmıştır. Karar problemindeki belirsizlik ve sözel ifadelerin daha iyi modellenenebilmesi, çalışmada bulanık ÇKKV yöntemlerinin kullanılmasına sebebiyet vermiştir. Bu bağlamda farklı bulanık küme uzantıları ve değişik ÇKKV yöntemleri incelenmiş, bulanık kümelerle görece yeni bir yaklaşım olması ve uçak seçim alanında bir çalışma bulunmaması sebebiyle aralık değerli Pisagor bulanık kümeler ve bu tip karar problemlerinde yaygın kullanımı ve güvenilirliği nedeniyle bulanık AHP-TOPSIS yöntemleri tercih edilmiştir. Çalışmada kriter ağırlıklarının hesaplanmasında aralık değerli Pisagor bulanık AHP, alternatiflerin kriterler açısından değerlendirilmesinde ise aralık değerli Pisagor bulanık TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır.

Aralık değerli Pisagor bulanık AHP-TOPSIS metodolojisinin uçak seçim probleminde uygulanması sonucunda;

- IVPF-AHP yöntemi kullanılarak satın alma maliyetinin uçak seçiminde en önemli kriter olduğu tespit edilmiştir. Satın alma maliyetinin ardından ise sırayla koltuk kapasitesi, yakıt tüketimi, işletme ve yedek parça maliyeti, menzil ve maksimum kalkış ağırlığı/MTOW kriterleri gelmektedir.
- Metodolojinin ikinci aşamasını oluşturan IVPF-TOPSIS yöntemi ile alternatif uçak tipleri sıralandığında, A350-1000 uçak tipinin ideal çözüme en yakın alternatif olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer alternatiflerin ideal sıralaması ise şu şekilde tespit edilmiştir: A350-900, A330-900, B787-9 Dreamliner, A330-300, B787-10 Dreamliner, B787-8 Dreamliner, A330-800.

Bu çalışmada uçak tipi seçiminde literatürde henüz kullanılmamış bir model kurularak bu alanda aralık değerli Pisagor bulanık AHP-TOPSIS tekniği bu probleme uygulanmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilecek gelecek çalışmalarda alternatif uçak sayısı ve kriter sayısının artırılması modeli destekleyecektir. Metot içerisinde bilgisine başvuru uzman sayısının daha artırılması kriter önemlerinin belirlenmesinde önemli bir fayda sağlayacaktır. Ayrıca oluşturulan bu model, farklı sektörlerde de uygulanabilecek ve gerçekleştirilen bu çalışma benzeri ÇKKV problemlerine uygulanma aşamasında rehberlik edebilecektir.

Bu uygulamada önerilen yöntemlerin gelecek çalışmalarda farklı bulanık kümeler ile geliştirilmesi ve var olan yöntemlerle kıyaslanması sağlanabilir. Bu çalışmada ÇKKV yöntemlerinden yalnızca iki tanesi kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda TOPSIS yerine VIKOR ya da WASPAS gibi başka ÇKKV yöntemlerinden de yararlanılabilir. Ayrıca tip-2 bulanık kümeler ya da resim bulanık kümeler de kullanılabilir. Bu bulanık kümeler kullanılarak elde edilen sonuçlar bu çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılabilir ya da çalışmada kullanılan aralık değerli bulanık kümeler yerine üçgensel ya da yamuk bulanık kümeler kullanılarak da çalışmalar yeniden ele alınabilir.

KAYNAKÇA

- Akyurt, İ. Z., & Kabadayı, N. (2020). Bulanık AHP ve bulanık gri ilişkisel analiz yöntemleri ile kargo uçak tipi seçimi: Bir Türk havayolu firmasında uygulama. *Journal of Yasar University*, 15(57), 38-55.
- Akyurt, İ. Z., & Yaşlıoğlu, D. (2018). Havacılık sektöründe ekip planlama yönetimi: Bir Türk havayolu örneği. *Journal of Business Research Turk*, 10(1), 424-446.
- Altaş, İ. H. (1999). Bulanık mantık: Bulanıklılık kavramı. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 62, 80-85.
- Belobaba, P., Odoni, A., & Barnhart, C. (2009). *The global airline industry*. West Sussex: Wiley Publication.
- Bruno, G., Esposito, E., & Genovese, A. (2015). A model for aircraft evaluation to support strategic decisions. *Expert Systems with Applications*, 42(13), 5580-5590.
- Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for Group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114, 1-9.
- Dozic, S., & Kalic, M. (2014). An AHP approach to aircraft selection process. *Transportation Research Procedia*, 3, 165-174.
- Durmaz, K. İ., & Gencer, C. (2020). JSMAA tabanlı yeni bir eklenti: SWARA-JSMAA ve akrobasi uçağı seçimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 1487-1498.
- Garg, H. (2016). A novel accuracy function under interval-valued Pythagorean fuzzy environment for solving multicriteria decision making problem. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 31, 529-540.
- Gerede, E. (2015). *Havayolu Taşımacılığı ve ekonomik düzenlemeler teori ve Türkiye uygulaması*. Ankara: Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Güntut, C. (2019). *Bulanık Topsis yöntemiyle düşük maliyetli bir havayolu için filo planlama optimizasyonu* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag.
- İlbahar, E., Cebi, S., & Kahraman, C. (2019). A state-of-the-art review on multi- attribute renewable energy decision making. *Energy Strategy Rev*, 25, 18-33.
- İlbahar, E., Cebi, S., & Kahraman, C. (2020). Assessment of renewable energy alternatives with pythagorean Fuzzy WASPAS method: A case study of Turkey. *In Advances in Intelligent Systems and Computing*, 888-895.
- Kabak, M., & Erdebilli, B. (2021). *Bulanık çok kriterli karar verme yöntemleri - MS Excel ve software çözümlü uygulamalar*. Ankara: Nobel Yayın.
- Kahraman, C., Öztaysi, B., & Onar, S. C. (2016). A comprehensive literature review of 50 years of fuzzy set theory. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 9(Supplement 1), 3.
- Kartal, M. (2022). *Havayolu İşletmeleri için uçak seçim stratejisinde SWARA tabanlı EDAS ve COPRAS yöntemlerinin kullanımı* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Hitit Üniversitesi, Çorum.

- Kiracı, K., & Akan, E. (2020). Aircraft selection by applying AHP and TOPSIS in interval type-2 fuzzy sets. *Journal of Air Transport Management*, 89, 1-16.
- Kiracı, K., & Bakır, M. (2018a). Hava aracı seçim problemlerinde çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanılması ve bir uygulama. *Journal of Transportation and Logistics*, 3(1), 13-24.
- Kiracı, K., & Bakır, M. (2018b). Application of commercial aircraft selection in aviation Industry through multi-criteria decision making methods. *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 16(4), 307-332.
- Kocakaya, K., Engin, T., Tektaş, M., & Aydın, U. (2021). Türkiye’de bölgesel havayolları için uçak tipi seçimi: Küresel bulanık AHP-TOPSIS yöntemlerinin entegrasyonu. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulama Dergisi*, 4(1), 27-58.
- Kocaoğlu, B., Odabaşoğlu, Ş., & Özaslan, İ. H. (2021). Türkiye’de pistonlu tek motorlu uçak seçiminde çok kriterli karar verme AHP ve TOPSIS yöntemlerinin kullanılması. *Journal of Aviation Research*, 3(2), 243-263.
- Lozano, J. M. S., & Rodriguez, O. N. (2020). Application of fuzzy reference ideal method (FRIM) to the military advanced training aircraft selection. *Applied Soft Computing Journal*, 88, 1-12.
- Oliver, W. (2018). Global Fleet & MRO market forecast commentary 2018-2028, <https://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2018/jan/2018-2028-fleetand-mro-forecast-commentary.html>. Erişim Tarihi: 23.08.2022.
- Özdemir, Y., Basligil, H., & Karaca, M. (2011). Aircraft selection using analytic network process: A case for Turkish airlines. *Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE) Vol II*, London, 9-13.
- Paksoy, T., Yapıcı Pehlivan, N., & Özceylan, E. (2013). *Bulanık küme teorisi (1st ed.)*. Ankara: Nobel Yayın.
- Peng, X., & Selvachandran, G. (2019). Pythagorean fuzzy set: State of the art and future directions. *Artificial Intelligence Review*, 52(3), 1873-1927.
- Peng, X., & Yang, Y. (2016). Fundamental properties of interval-valued Pythagorean fuzzy aggregation operators. *International Journal of Intelligent Systems*, 31, 444-487.
- Saaty, T.L. (1980). *The analytic Hierarchy process: Planning, priority setting, resources allocation*. New York: McGraw-Hill.
- Sancar, S. (2022). *Pisagor bulanık AHP ve pisagor bulanık WASPAS yöntemleri ile bakım stratejisi seçimi: Gazete matbaası örneği* (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). İbn Haldun Üniversitesi, İstanbul.
- Schmitt, D., & Gollnick, V. (2016). *Air transport system*. New York: Springer.
- Seker, S., & Kahraman, C. (2020). Socio-economic evaluation model for sustainable solar PV panels using a novel integrated MCDM methodology: A case in Turkey. *Socio-Economic Planning Sciences*. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038012120308351>). Erişim tarihi 27.08.2023.
- Şimşek, H., Özaslan, İ. H., & Eryılmaz, İ. (2022). Pilot Selection in Airline Organizations with the Analytical Hierarchy Process. *Journal of Aviation*, 6(2), 218-227. <https://doi.org/10.30518/jav.1111580>.

- Tezcan, M. C. (2022). Uçak Teknisyenlerinde negatif vijilans faktörlerin analitik belirlenmesi ve vijilans düzeylerinin ölçümü. *Journal of Aviation Research*, 4(1), 76-104.
- Tezcan, M. C., & Aktaş, B. B. (2022). İş sağlığı ve güvenliği performans değerlendirmesi: Uçak bakım organizasyonu üzerine bir araştırma. *OHS ACADEMY*, 5(1), 1-12.
- Wang, T., & Chang, T. (2007). Application of TOPSIS in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 33(4), 870-880.



Bu eser [Creative Commons Atf-GayriTicari 4.0 Uluslararası Lisansı](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) ile lisanslanmıştır.