



Araştırma Makalesi

Fermatean bulanık ortamda çok kriterli karar analizi: Yangın söndürme uçak tipi seçimi üzerine bir araştırma

Mevlüt Coşkun Tezcan¹

Öz. Dünya üzerinde karasal alanların üçte birini kaplayan ormanlar, ekolojik dengenin sağlanması, biyoçeşitliliğin korunması ve karbon emisyonu gibi pek çok hayati fayda sağlayarak canlı yaşamı için kritik bir öneme sahiptir. Ormanlar, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi evrensel problemler nedeniyle de tüm dünya için büyük bir değer taşımaktadır. Bu nedenle, ormanların korunması ulusal bir mesele olmanın ötesinde, Rio Sözleşmesi, Kyoto Protokolü ve Paris Anlaşması gibi birçok uluslararası anlaşmanın konusu olmuştur. Ormanların korunmasına yönelik küresel hassasiyete rağmen hem dünya genelinde hem de Türkiye’de orman alanlarının sürdürülebilirliğini tehdit eden en büyük sorun orman yangınlarıdır. Orman yangınlarının yıkıcı gücü, orman ekosistemine verdiği zararın yanı sıra, can ve mal kayıplarına neden olarak ağır sonuçlar doğurmaktadır. Bu nedenle, devletin orman yangınlarıyla mücadelede etkin bir savaş organizasyonu hazırlaması, yani orman idaresinin yangın gerçekleşmeden önce gerekli önlemleri alarak yangına hazırlıklı olması, yangınların vereceği zararların en aza indirilmesi açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmada, orman ve orman dışı yangınlara müdahale konusunda kritik öneme sahip olan yangın söndürme uçak tipi seçimi üzerine bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Orman Genel Müdürlüğü’nün mevcut filosunu genişletme kararı alması halinde en uygun uçak tipinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, üç boyutlu bulanık küme uzantılarından Fermatean bulanık kümeler entegrasyonu yapılan SWARA (Aşamalı Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi) ve TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerlik Yoluyla Tercih Sıralaması) yöntemleri kullanılarak 3 alternatif uçak için 11 değerlendirme kriteri üzerinden seçim yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre Beriev Be-200 tipi uçak en uygun seçenek olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçak seçimi, yangın söndürme, orman yangını, orman yangınları ile mücadele, Fermatean bulanık kümeler.

Research Paper

Fermatean fuzzy environment-based multi-criteria decision analysis: A Study on the selection of firefighting aircraft type

Abstract. Forests, which cover one-third of the world’s land area, are of critical importance for living life by providing many vital benefits such as maintaining ecological balance, protecting biodiversity and carbon emissions. Forests are of great value to the whole world due to universal problems such as global warming and climate change. For this reason, the protection of forests, beyond being a national issue, has become the subject of many international agreements such as the Rio Convention, Kyoto Protocol and Paris Agreement. Despite this global sensitivity towards the protection of forests, the biggest problem that threatens the sustainability of forest areas both around the world and in Turkey is forest fires. The destructive power of forest fires has serious consequences, causing loss of life and property, as well as damage to the forest ecosystem. For this reason, it is important for the state to prepare an effective combat organization to combat forest fires, that is, for the forest administration to be prepared for fires by taking the necessary precautions before the fire occurs, to minimize the damage caused by fires. In this study, an investigation is carried out on the selection of firefighting aircraft types, which are of critical importance in combating forest and non-forest fires. The aim of the study is to determine the most suitable aircraft type in the event that the General Directorate of Forestry decides to expand its existing fleet. For this purpose, a selection is made among three alternative aircraft based on eleven evaluation criteria by using the SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) methods, integrated with Fermatean fuzzy sets derived from three-dimensional fuzzy set extensions. According to the findings, Beriev Be-200 type aircraft is determined as the most suitable option.

Keywords: Aircraft selection, firefighting, forest fire, fighting forest fires, Fermatean fuzzy sets.

¹ Sosyal Bilimler Programları, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ Kuzey Kıbrıs Kampüsü), 99738, Güçehyurt, KKTC; mevluttezcan@gmail.com (Sorumlu Yazar)

<https://doi.org/10.52995/jass.1756564>

Geliş Tarihi: 1 Ağustos 2025; Kabul Tarihi: 26 Eylül 2025; Yayımlanma Tarihi: 28 Şubat 2026

© 2026 Yazar(lar). Türk Hava Kurumu Üniversitesi tarafından yayımlanmıştır.

Bu makale Creative Commons Atıf-GayriTicari-AynıLisanslaPaylaş 4.0 Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır.



1. GİRİŞ

Dünya üzerinde karasal alanların üçte birini kaplayan ve yeryüzündeki bitki ve hayvan çeşitliliğinin %80'ini barındıran ormanlar, ekolojik dengenin sağlanması, biyoçeşitliliğin korunması ve karbon emisyonu gibi pek çok hayati fayda sağlayarak canlı yaşamı için kritik bir öneme sahiptir. Ormanlar, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi evrensel problemler nedeniyle de tüm dünya için büyük bir değer taşımaktadır (Küçük, Tiryaki Güngör, & Küçük, 2024). Bu nedenle, ormanların korunması ulusal bir mesele olmanın ötesinde, Rio Sözleşmesi, Kyoto Protokolü ve Paris Anlaşması gibi birçok uluslararası anlaşmanın konusu olmuştur. Ormanların korunmasına yönelik bu küresel hassasiyete rağmen hem dünya genelinde hem de Türkiye'de orman alanlarının sürdürülebilirliğini tehdit eden en büyük sorun orman yangınlarıdır.

Coğrafi konumu, topoğrafik özellikleri ve iklim koşulları nedeniyle Türkiye orman yangınlarından doğrudan etkilenmektedir. Akdeniz havzasında yer alan diğer ülkeler gibi, ülkemiz de özellikle yaz mevsiminin kurak geçtiği dönemlerde sıklıkla orman yangınlarıyla karşı karşıya kalmaktadır. Orman yangınlarının yıkıcı gücü, orman ekosistemine verdiği zararın yanı sıra, can ve mal kayıplarına neden olarak ağır sonuçlar doğurmaktadır. Bu nedenle, devletin orman yangınlarıyla mücadelede etkin bir savaş organizasyonu hazırlaması, yani orman idaresinin yangın gerçekleşmeden önce gerekli önlemleri alarak yangına hazırlıklı olması, yangınların vereceği zararların en aza indirilmesi açısından önem arz etmektedir (Avcı & Korkmaz, 2021).

Yangın savaş organizasyonu; yangın öncesinde alınacak önleyici ve koruyucu tedbirlerin belirlendiği, yangın sırasında kullanılacak araç, gereç ve ekipmanların hazırlandığı ve genel olarak orman yangınlarıyla mücadele sürecine ilişkin planlamaların yapıldığı süreci ifade etmektedir. Her aşaması kritik öneme sahip olan bu organizasyon, büyük bir titizlikle yürütülmelidir (Avcı & Korkmaz, 2021). Zira yangın söndürme ekipmanlarının eksikliği veya personel yetersizliği gibi faktörler, yangınla mücadele sürecini aksatabilir. Bununla birlikte sadece araç ve gereçlerin bakımının yapılmamış olması bile, yangına müdahaleyi geciktirerek büyük orman alanlarının kaybına yol açabilir. Bu nedenle, etkili bir yangın savaş organizasyonu için dozer ve arazöz gibi kara araçlarının yanı sıra, uçak ve helikopter gibi arazi yapısına uygun hava araçlarının, belirli noktalarda eksiksiz bakımları yapılmış ve yeterli sayıda eğitimli personel ile hazır bulundurulması gerekmektedir.

Orman yangınlarıyla mücadelede yangın söndürme uçakları kritik rol oynamaktadır. Bu uçaklar, yangının büyümesini önlemek ve kontrol altına almak için hızlı şekilde müdahale edebilirler. Özellikle ulaşılması güç arazilerde, yer ekiplerinden önce yangın mahalline ulaşarak yangının yayılma hızını azaltırlar. Ayrıca, diğer hava platformlarına kıyasla, yangın bölgesine tek seferde daha fazla su ve/veya yangın söndürme kimyasalları ulaştırabilmeleri, yangının büyümesini önlemede hayati avantaj sağlamaktadır. Yangın söndürme uçaklarının etkin kullanımı, kara unsurlarıyla koordineli çalışılması halinde operasyonel başarıyı artırır. Bu sayede, doğal yaşam alanlarının korunması, insanların güvenliği ve maddi kayıpların en aza indirilmesi sağlanır. Dolayısıyla, orman yangınlarıyla mücadelede uçakların önemi her geçen gün daha da artmaktadır.

Karar verme süreci, bireyin karşısında birden fazla alternatifin bulunmasını ve bu seçenekler arasında en uygun olanını seçmek için değerlendirme yapılmasını gerektirir. Bu bağlamda karar verme, alternatifler arasında matematiksel ve mantıksal süreçle optimum seçeneğin belirlenmesi olarak tanımlanabilir. Ancak, gerçek hayatta karşılaşılan karar verme problemleri çoğu zaman tek bir kriter ile sınırlı kalmaz; birden fazla kriterin dikkate alınması gerekir. Bu tür çoklu kriterlere dayalı karar problemleri, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) veya İngilizce kısaltmasıyla MCDM (Multi-Criteria Decision Making) olarak adlandırılmaktadır. ÇKKV yöntemleri, alternatiflerin göreceli sıralamalarını yapmanın yanı sıra, alternatifler arasında sınıflama yaparak, en avantajlı seçeneği belirlemek için de kullanılabilir. Bu yöntemler, karar verme sürecinde kapsamlı bir değerlendirme yaparak daha etkili sonuçlar elde edilmesine olanak tanır (Tezcan, 2022).

SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis/Aşamalı Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi) yöntemi, 2010 yılında Kersulienė, Zavadskas ve Turskis tarafından geliştirilmiş çok kriterli karar verme yaklaşımıdır. Bu yöntem, karar vericilerin kendi önceliklerine göre en uygun alternatifini seçmelerine olanak tanıırken, kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesinde uzman görüşlerini dikkate alır (Kersulienė, Zavadskas, & Turskis, 2010). Başlangıçta, özellikle anlaşmazlıkların çözümüne yönelik araç olarak tasarlanmış olsa da, günümüzde farklı alanlarda karar destek aracı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. SWARA yöntemi, diğer çok kriterli karar verme yöntemleriyle birlikte kullanıldığında, genellikle kriterlerin ağırlıklandırılması için tercih edilmektedir. Bunun temel nedeni, SWARA'nın kolay anlaşılır bir matematiksel yapıya sahip olması ve farklı uzmanların ortak amaç doğrultusunda eş zamanlı çalışabilmesine olanak tanımasıdır. Bu özellik, zaman tasarrufu sağlamak ve karar verme süreçlerini

hızlandırmaktadır. Ayrıca, yöntemin uygulama kolaylığı, işlem sürelerini ve maliyetlerini azaltarak karar vericilerin önceliklerini belirlemelerine yardımcı olmaktadır (Kartal, 2022). Bir diğer çok kriterli karar verme yöntemi olan TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution/İdeal Çözümüne Benzerlik Yoluyla Tercih Sıralaması), 1981 yılında Yoon ve Hwang tarafından geliştirilmiş, 1993 yılında ise Hwang, Lai ve Lui tarafından daha da ayrıntılandırılmıştır. TOPSIS yöntemi, doğrudan veri üzerinde uygulanabilmesi sayesinde nitel bir çevrim gerektirmeden işlem yapılabilmesini sağlar. Bu yöntem, karar vericilerin ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözüme en uzak alternatifleri belirlemesine olanak tanır. Ancak, bu mesafelerin göreceli önemini göz önünde bulundurmaz. Nihai çözüm, pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözüme en uzak olan alternatif olarak tanımlanabilir. TOPSIS, sunduğu rasyonel yaklaşım, kolay anlaşılabilirlik ve basit hesaplama süreçleri gibi özellikleri sayesinde literatürde en çok tercih edilen tekniklerden biridir (Chen, 2000).

Bu çalışmada, birden fazla kriter ve alternatifin mevcut olduğu durumlarda analitik ve bilimsel bir çerçevede optimum çözümleri bulmayı amaçlayan çok kriterli karar analizi yaklaşımıyla uçak seçim problemi üzerinde durulmuş orman ve orman dışı yangınlara müdahalede stratejik öneme sahip olan yangın söndürme uçak tipi seçimi üzerine bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda araştırma makalesinin amacı; yangın söndürme uçağı seçimi için kritik kriterleri belirlemek ve karar alternatifleri içerisinde en iyi çözümü elde etmek şeklinde belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda Orman Genel Müdürlüğü (OGM) için en uygun yangın söndürme uçak modelinin belirlenmesi amacıyla ÇKKV yaklaşımına dayalı bir karar modeli önerilmiştir. Önerilen bu yaklaşım, Fermatean bulanık küme tabanlı SWARA ve TOPSIS yöntemlerinin entegrasyonu ile oluşturulmuştur.

Bu çalışmanın izleyen bölümlerinin içeriği; 2. bölümde yerli ve yabancı literatürdeki uçak seçim çalışmaları özet bir şekilde açıklanırken, araştırmanın modeli tanıtılarak problemin çözümünde kullanılan yöntemler hakkında temel bilgilere 3. bölümde ve mevcut problemin adım adım çözümü ile problem kapsamında oluşturulan uygulamanın anlatımı ise 4. bölümde değinilmiştir. Ardından sonuç ve öneriler kısmına yer verilmiştir. Son bölümünde ise çalışmanın kapsamında referans alınan kaynakların listesi sunulmuştur.

Bu çalışmada yapılan değerlendirmeler ve elde edilen sonuçlar Orman Genel Müdürlüğü'nün kurumsal görüşlerini içermemektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Havacılık endüstrisinin karmaşıklığı ve sürekli değişen doğası nedeniyle uçak seçim süreci çok sayıda faktörün dikkate alınmasını gerektirir. Bu faktörler, uçakların teknik özelliklerinden ekonomik koşullara kadar uzanır ve seçim sürecini etkileyen önemli değişkenleri içerir. Bu nedenle uçak seçimi ÇKKV süreci olarak nitelendirilebilir. Literatürde ÇKKV metotları kullanılarak yapılmış uçak seçimi çalışmalarından bazıları şunlardır:

(Wang & Chang, 2007) Tayvan Hava Kuvvetleri Uçuş Akademisi'nde kullanılması planlanan eğitim uçaklarını belirlemek amacıyla TOPSIS yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada, pervaneli yedi alternatif uçak modeli 16 farklı kriterle göre değerlendirilmiş ve KT-1 tipi uçağın en iyi özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir. Özdemir vd. yapmış oldukları çalışmada, Türk Hava Yolları'nın satın alacağı uçakları değerlendirmek için ANP (Analitik Ağ Süreci) yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada maliyet, zaman ve fiziki özellikler ana kriterleri göz önünde bulundurularak orta menzilli 3 farklı uçak tipi içerisinde en uygun modelin B737 olduğu belirlenmiştir (Özdemir, Basligil, & Karaca, 2011). (Dozic & Kalic, 2014) belirli uçuş ağlarında ve öngörülebilir talep olan hatlarda havayolu işletmelerinin uçak seçim problemini AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) yöntemiyle çözmeyi amaçlamışlardır. Güneydoğu Avrupa'da faaliyet gösteren varsayımsal bir havayolu işletmesi açısından yapılan çalışmada, 7 alternatif uçak modeli kapasite, fiyat, bagaj hacmi, maksimum kalkış ağırlığı (MTOW), ödeme koşulları ve c/ASM (koltuk/mil toplam operasyon maliyeti) gibi özelliklere göre değerlendirilmiş ve turboprop motorlu ATR 72-600 uçağının en uygun seçim olduğu sonucuna varılmıştır.

Bruno vd. yapmış oldukları çalışmada, havayollarının uçak gereksinimlerine yönelik bir karar verme modeli geliştirmişlerdir. Bu model uçakların ekonomik performansı, teknik performansı ve çevresel etkisi gibi ana kriterler ile bunlara bağlı alt kriterler üzerine kuruludur. AHP ve Bulanık Küme Teorisinin kullanıldığı çalışmada, üç alternatif uçak değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre en yüksek puanı alan uçak tipi Sukhoi SSJ-100 olmuştur (Bruno, Esposito, & Genovese, 2015). (Dozić & Kalić, 2015) kısa ve orta mesafeli uçuşlar gerçekleştiren havayolu şirketleri için filo büyüklüğü ve yapısı üzerine bir model oluşturmuşlardır. Belgrad Havalimanı merkez alınarak yapılan bu çalışmada, kısa ve orta menzilli uçuşlar için uçak ve filo seçimi incelenmiştir. Kapasite, maliyet, yolcu başına bagaj

hacmi, MTOW ve birim maliyet kriterleri baz alınarak AHP yöntemi ile yapılan analiz sonucunda; kısa menzilli uçuşlar için ATR 72-600, orta menzilli uçuşlar açısından ise A-319neo tipi uçakların en uygun seçenekler olduğu bulunmuştur. (Kiracı & Bakır, 2018) yaptıkları çalışmada, kısa ve orta mesafeli uçuş hatlarına uygun dar gövdeli uçak modelini belirlemeyi amaçlamışlardır. TOPSIS yöntemi uygulanarak yapılan bu çalışmada, yakıt tüketimi en önemli kriter olarak belirlenirken, B737-800 tipi uçağın en avantajlı seçim olduğu vurgulanmıştır. (Akyurt & Kabadayı, 2020), İstanbul merkezli bir Türk havayolu firmasının kargo uçağı seçim kararını, bulanık kümeler ile bütünleşik AHP ve GİA (Gri İlişkisel Analiz) metodlarını kullanarak analiz etmiştir. Maliyet, zaman ve operasyonel uyumluluk ana kriterleri altında 16 kriter baz alınarak, dört alternatif uçak arasından B777F tipi uçağın öne çıktığı görülmüştür.

(Durmaz & Gencer, 2020) ortaya koydukları çalışmada, Türk Hava Kuvvetleri 134'üncü Akrotim Filo (Türk Yıldızları) tarafından kullanılan NF-5/2000 tipi uçakların envanterden çıkartılması halinde en uygun akrobasi uçağı seçimi problemini ele almışlardır. Çalışmada, java tabanlı yeni bir yazılım ÇKKV yöntemlerine entegre edilerek alternatif uçaklar değerlendirilmiştir. Çalışmanın bulgularına göre en yüksek skoru F-16 tipi uçak almıştır. Kocaoğlu vd. yapmış oldukları çalışmada, ÇKKV yöntemleri ile pistonlu tek motorlu uçak seçimini konu almışlardır. Uygulamada, AHP yöntemi ile kriterlerin öncelik değerleri belirlendikten sonra, TOPSIS yönteminin adımlarını uygulayarak alternatiflerin sıralamasını elde etmişlerdir (Kocaoğlu, Odabaşoğlu, & Özasan, 2021). Kocakaya vd. yapmış oldukları çalışmada, küresel bulanık kümeler ile AHP ve TOPSIS yöntemlerini birleştirerek uçak seçim süreci gerçekleştirmişlerdir. Kriterlerin ağırlıklandırılmasında küresel bulanık AHP, alternatiflerin değerlendirilmesinde ise küresel bulanık TOPSIS yöntemini kullanmışlardır. Çalışmanın bulguları, küresel bulanık aritmetik ortalama ile en iyi uçağın CRJ-100/200, küresel bulanık geometrik ortalama ile ERJ-135'in en uygun seçim olabileceğini ortaya koymaktadır (Kocakaya, Engin, Tektaş, & Aydın, 2021). (Tezcan M. C., Pisagor bulanık kümelerle entegre AHP ve TOPSIS yöntemleri ile uçak tipi seçiminin optimizasyonu: Havayolu işlemleri için model önerisi, 2024) çalışmasında, Pisagor bulanık ÇKKV yöntemleri üzerine bir karar modeli oluşturarak havayolu işletmeleri için uçak seçim sürecini optimize etmeyi amaçlamıştır. Kriterlerin ağırlık değerleri Pisagor bulanık AHP yöntemi ile belirlenmiş olup alternatiflerin tercih sıralamasında Pisagor bulanık TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. 6 kriter çerçevesinde yapılan değerlendirme ile A350-1000 tipi uçak en iyi seçenek olarak belirlenmiştir. Tezcan (Düşük maliyetli bir Türk havayolu işletmesi için uçak tipi seçimi: Sezgisel bulanık SWARA-TOPSIS yaklaşımı, 2024) isimli çalışmasında, düşük maliyetli bir Türk Havayolu şirketinin uçak seçim problemini ele almış ve yöntem olarak sezgisel bulanık kümelerle genişletilmiş SWARA-TOPSIS hibrid yaklaşımını kullanmıştır. Çalışmada maliyet, teknik özellikler ve zaman olmak üzere 3 ana kriter altında yer alan 13 alt kritere göre, dar gövdeli standart kabin konfigürasyonuna sahip 4 alternatif uçak değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda havayolu firması için en uygun uçak modelinin B737 Max10 olduğu saptanmıştır. Çok kriterli karar verme yöntemleri ile gerçekleştirilen uçak seçim çalışmaları özet halinde Tablo 1'de sunulmuştur.

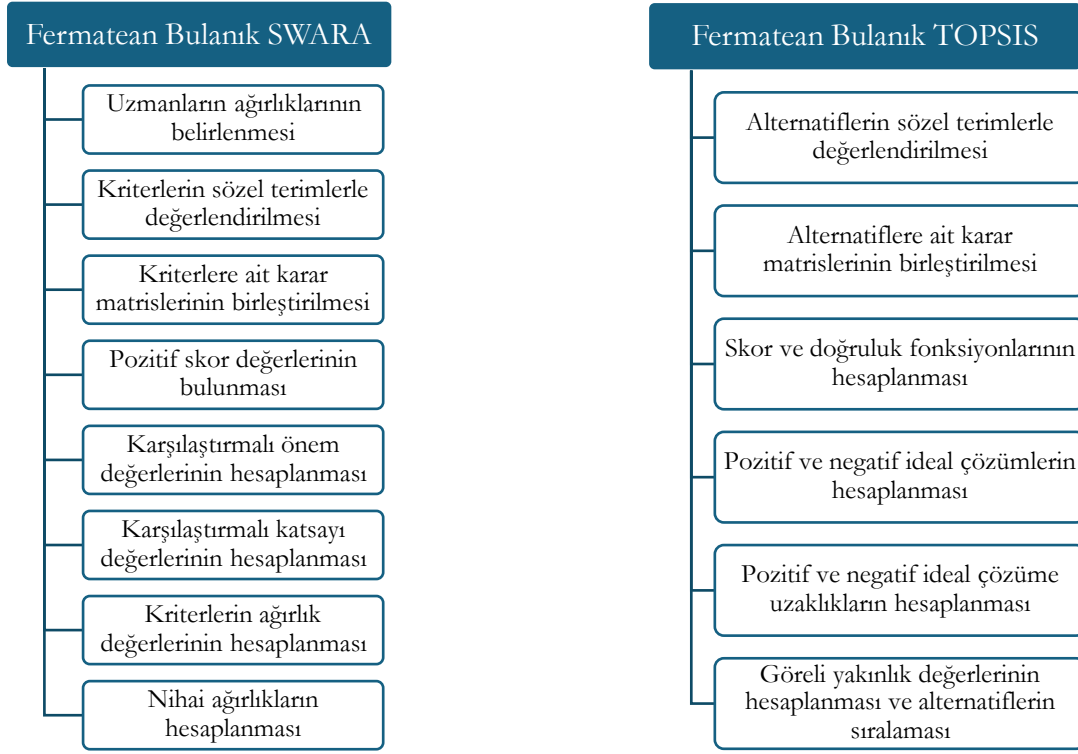
Tablo 1. ÇKKV Yöntemleri ile Yapılan Uçak Seçimi Çalışmalarının Özeti

Referans	Yöntem	Amaç
(Wang & Chang, 2007)	TOPSIS	Askeri eğitim uçağı seçimi
(Özdemir, Basligil, & Karaca, 2011)	ANP	Yolcu uçağı seçimi
(Dozic & Kalic, 2014)	AHP	Yolcu uçağı seçimi
(Dožić & Kalić, 2015)	AHP ve ESM	Yolcu uçağı seçimi
(Kiracı & Bakır, 2018)	TOPSIS	Yolcu uçağı seçimi
(Akyurt & Kabadayı, 2020)	Bulanık AHP ve Bulanık GİA	Kargo uçağı seçimi
(Durmaz & Gencer, 2020)	SWARA ve SMAA-2	Akrobasi uçağı seçimi
(Ardil, 2020)	PARIS	Eğitim uçağı seçimi
(Kocaoğlu, Odabaşoğlu, & Özasan, 2021)	AHP ve TOPSIS	Pistonlu tek motorlu uçak seçimi
(Bakır, Akan, & Özdemir, 2021)	Bulanık PIPRECIA ve Bulanık MARCOS	Bölgesel uçak seçimi
(Kartal, 2022)	SWARA tabanlı EDAS ve COPRAS	Yolcu uçağı seçimi

3. YÖNTEM

3.1. Araştırma Modeli

Bu çalışmada nicel ve nitel kriterlere göre seçenekler içerisinde optimum alternatifin belirlenmesini sağlayan bulanık ÇKKV teknikleri kullanılarak yangın söndürme uçağı seçim problemi ele alınmıştır. Problemin çözümünde kullanılan matematiksel model, Fermatean bulanık SWARA yöntemi kullanılarak kriterlerin önem düzeylerinin tespit edilmesi ve Fermatean bulanık TOPSIS yöntemi kullanılarak alternatif uçak modellerinin değerlendirilmesi şeklinde iki aşamadan meydana gelmektedir. Sistematik şekilde izlendiğinde çözüme götürecek modelin uygulama süreci Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Araştırma Modeli

3.2. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Ormanlar, taşıdıkları stratejik ve ekolojik önem nedeniyle Anayasa’nın amir hükümleri doğrultusunda, izinsiz müdahalelere ve zarara yol açabilecek çeşitli tehditlere karşı korunmaktadır. Bu bağlamda, Anayasa’nın 169. maddesi uyarınca, gözetimi ve denetimi kamusal nitelik taşıyan ormanların yangınlardan korunmasına ilişkin sorumluluk, 6831 sayılı Orman Kanunu ile 285 sayılı Orman Yangınlarının Önlenmesi ve Söndürülmesinde Uygulama Esasları Tebliği’nde ayrıntılı şekilde düzenlenmiştir. Bu mevzuat hükümleri çerçevesinde, orman yangınlarıyla mücadelede asli görevli idare Orman Genel Müdürlüğü olup; Nisan 2025 itibarıyla Orman Genel Müdürlüğü envanterinde 8 adet Air Tractor AT-802F tipi yangın söndürme uçağı, 3 adet Sikorsky T-70 ve 2 adet Sikorsky S-64 tipi yangın söndürme helikopteri bulunmaktadır. Ayrıca, komuta ve gözlem faaliyetlerinde kullanılmak üzere 1 adet Cessna Citation 650 ve 1 adet Beechcraft King Air 360 tipi yangın yönetim uçağı ile 6 adet Global Ranger Bell 429 tipi yangın yönetim helikopteri görev yapmaktadır. Bununla birlikte, her yıl ihtiyaç duyulan sayıda çeşitli nitelik ve su atma kapasitesine sahip uçak ve helikopter kiralama yolu ile temin edilerek havadan müdahale kapasitesi artırılmaktadır.

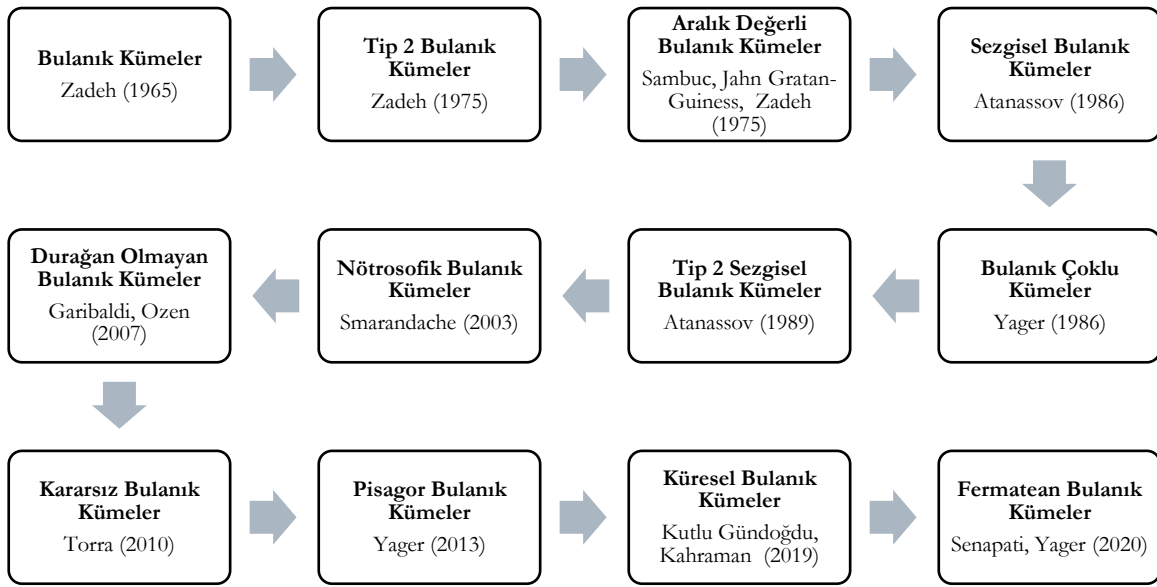
Bu çalışmada, mevcut filosunu genişletme kararı alması halinde Orman Genel Müdürlüğü için en uygun yangın söndürme uçak tipinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Literatürde uçak seçimi konusuna ilişkin yapılan incelemelerde; yolcu ve kargo uçağı, eğitim uçağı, bölgesel jet, iş jeti ve muharip uçakların seçimine yönelik çok sayıda araştırmanın önemli katkılar sağladığı ve karar verme süreçlerine farklı bakış açıları kazandırdığı görülmektedir. Söz konusu çalışmalar, çeşitli yöntemlerin uygulanması yoluyla uçak seçim süreçlerinin etkinliği ve doğruluğu hakkında kapsamlı bir perspektif sunmaktadır. Ayrıca, bu araştırmaların, gelecekteki uçak seçim yöntemlerinin geliştirilmesi ve mevcut modellerin iyileştirilmesi açısından önemli bir temel oluşturduğunu vurgulamak gerekir. Bununla birlikte, ulusal ve uluslararası farklı veri tabanlarında yapılan kapsamlı araştırmalar sonucunda, hem yangın söndürme uçağı seçim

problemini ele alan hem de Fermatean bulanık çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak uçak seçimi gerçekleştirilen herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu gerçeklerden hareketle, araştırmanın gerek yönetsel yaklaşımı gerek yangın söndürme uçak tipi seçimine odaklanması açısından literatürdeki önemli bir boşluğu doldurarak alana hatırı sayılır katkılar sunacağı ve sonraki araştırmalara öncülük edeceği değerlendirilmektedir.

3.3. Bulanık Küme Teorisi

Lotfi Aliasker Zadeh tarafından ortaya atılan bulanık küme teorisi, bulanıklık veya belirsizlik içeren verilerle çalışmak için matematiksel çerçeve sağlayan bir disiplindir. Bulanık kümeler, klasik kümelerin ötesinde, elemanların küme üyeliği konusunda esnek bir yaklaşım sunar (Kabak & Erdebili, 2021). Bu esneklik, her bir elemanın kümeye ait olma derecesinin 0 ile 1 arasında bir değer almasıyla sağlanır. Klasik kümelerde, bir elemanın kümeye aitliği ya tamdır (1) ya da yoktur (0). Oysa bulanık kümelerde elemanın üyelik derecesi, belirsizliğin daha doğru bir şekilde modellenmesine olanak tanır. Bulanık mantık bu özelliğiyle, çok kriterli karar verme süreçlerinde belirsizlikleri yönetmek için etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır (Şimşek, Özasan, & Eryılmaz, 2022).

Bulanık ÇKKV yöntemleri, örneğin Bulanık SWARA ve Bulanık TOPSIS, uzman görüşlerini ve sözel değerlendirmeleri kullanarak alternatifler arasında ağırlık hesaplamalarını ve sıralamaları daha doğru bir şekilde yapabilmektedir. Bu yöntemler, kesin sayılar yerine belirsiz terimler kullanarak insan zihninin karar verme süreçlerine daha yakın çözümler sunar. Bu nedenle, bulanık kümelerin çok ölçütlü karar verme problemlerinde tercih edilmesi, giderek daha yaygın hale gelmiştir. Ancak, bulanık kümelerin karmaşık belirsizliklerle başa çıkma konusunda bazı sınırlamaları bulunmakta olup bu eksiklikleri gidermek amacıyla Şekil 2’de sunulan farklı bulanık küme uzantıları geliştirilmiştir.



Şekil 2. Bulanık Küme Uzantıları

3.4. Fermatean Bulanık Kümeler

Senapati ve Yager (2020) tarafından önerilen Fermatean Bulanık Kümeler (Fermatean Fuzzy Sets/FFS), üyelik ve üyelik dışı derecelerin toplamının 1’den büyük olduğu durumlar için geliştirilmiş bir yapıdır. Diğer bulanık kümelere kıyasla, üyelik fonksiyonları daha geniş bir parametre kümesi üzerinden değişebilen Fermatean bulanık kümeler, karar verme süreçlerinde daha fazla hassasiyet ve doğruluk sunarken, karmaşık ve belirsiz verilerin modellenmesinde önemli avantaj sağlamaktadır. Fermatean bulanık kümelere ilişkin tanımlar ve aritmetik operatörler aşağıda sunulmuştur (Senapati & Yager, 2020).

Tanım 1. X evrensel uzayında tanımlı bir FFS aşağıdaki gibi belirtilir:

$$FFS = \{[x, \mu_F(x), \nu_F(x)] : x \in X\}. \quad (1)$$

Fermatean bulanık kümeler $\mu_F(x) : X \in [0,1]$ ve $\nu_F(x) : X \in [2]$ olmak üzere, eşitlik (2)'de belirtilen kuralı yerine getirmelidir.

$$0 \leq (\mu_F(x))^3 + (\nu_F(x))^3 \leq 1. \quad (2)$$

Fermatean bulanık kümelerin belirsizlik derecesi eşitlik (3) vasıtasıyla belirlenir.

$$\pi_F(x) = \sqrt[3]{1 - (\mu_F(x))^3 - (\nu_F(x))^3}. \quad (3)$$

Tanım 2. (μ_F, ν_F) Fermatean bulanık bir küme olup $F_1 = (\mu_{F_1}, \nu_{F_1})$ ve $F_2 = (\mu_{F_2}, \nu_{F_2})$ iki farklı FFS üzerinde eşitlik (4)-(12)'de belirtilen operatörler tanımlıdır.

$$F_1 \cap F_2 = (\min\{\mu_{F_1}, \mu_{F_2}\}, \max\{\nu_{F_1}, \nu_{F_2}\}), \quad (4)$$

$$F_1 \cup F_2 = (\max\{\mu_{F_1}, \mu_{F_2}\}, \min\{\nu_{F_1}, \nu_{F_2}\}), \quad (5)$$

$$F^c = (\nu_F, \mu_F), \quad (6)$$

$$F_1 \boxplus F_2 = \left(\sqrt[3]{\mu_{F_1}^3 + \mu_{F_2}^3 - \mu_{F_1}^3 \mu_{F_2}^3}, \nu_{F_1}, \nu_{F_2} \right), \quad (7)$$

$$F_1 \boxtimes F_2 = \left(\sqrt[3]{\nu_{F_1}^3 + \nu_{F_2}^3 - \nu_{F_1}^3 \nu_{F_2}^3}, \mu_{F_1}, \mu_{F_2} \right), \quad (8)$$

$$\lambda F = \left(\sqrt[3]{1 - (1 - \mu_F^3)^\lambda}, \nu_F^\lambda \right), \quad (9)$$

$$F^\lambda = \left(\mu_F^\lambda, \sqrt[3]{1 - (1 - \mu_F^3)^\lambda} \right), \quad (10)$$

$$Sc(F) = \mu_{ij}^3 - \nu_{ij}^3, \quad (11)$$

$$Acc(F) = \mu_{ij}^3 + \nu_{ij}^3. \quad (12)$$

3.5. Fermatean Bulanık SWARA-TOPSIS Metodolojisi

Fermatean bulanık kümelere entegrasyonu yapılan SWARA-TOPSIS metodolojisine ait algoritma adımları aşağıda sunulmuştur (Yang, Pan, & Shouzheng, 2022), (Aydoğan, 2023).

Adım 1: Karar vericilerin uzmanlık derecesinin belirlenmesinde kullanılan dilsel skala ve söz konusu değişkenlerin bulanık sayı olarak ifadeleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Karar Vericilerin Değerlendirilmesinde Kullanılan Dilsel Skala

Sözel İfadeler	μ	ν
Kesinlikle Uzman (AS)	0,95	0,10
Yeterince Uzman (VS)	0,75	0,30
Ortalama Uzman (S)	0,55	0,55
Neredeyse Uzman (LS)	0,30	0,75
Uzman Değil (NS)	0,10	0,95

(P), araştırmada yer alan karar vericilerin sayısını ifade etmektedir ve her bir karar verici için $\psi_p = (\mu_p, \nu_p)$ şeklinde tanımlanan uzmanlık derecesi eşitlik (13) vasıtasıyla hesaplanır.

$$\psi_p = \frac{1 + \mu_p^3 - \nu_p^3}{\sum_{p=1}^{|P|} (1 + \mu_p^3 - \nu_p^3)}. \quad (13)$$

Adım 2: Karar vericilerden Tablo 3'teki dilsel skala yardımıyla kriterlerin önemini değerlendirmesi istenir. P numaralı karar vericinin (i) kriterine ilişkin yaptığı değerlendirme $C_{ip} = (\mu_{ip}, \nu_{ip})$ şeklinde ifade edilir.

Tablo 3. Kriterlerin ve Alternatiflerin Değerlendirilmesinde Kullanılan Dilsel Skala

Dilsel Terimler (Kriter/Alternatif)	μ	ν
Kesinlikle Önemli (AI) / Kesinlikle İyi (AG)	0,99	0,10
Çok Güçlü Önemli (VSI) / Çok İyi (VG)	0,90	0,20
Güçlü Önemli (SI) / İyi (G)	0,80	0,30
Önemli (I) / Biraz İyi (LG)	0,65	0,40
Eşit Önemli (EI) / Orta (M)	0,50	0,50
Önemsiz (U) / Biraz Kötü (LB)	0,35	0,70
Güçlü Önemsiz (SU) / Kötü (B)	0,20	0,80
Çok Güçlü Önemsiz (VSU) / Çok Kötü (VB)	0,10	0,90
Kesinlikle Önemsiz (AU) / Kesinlikle Kötü (AB)	0,01	0,99

Adım 3: Fermatean bulanık karar matrisi, karar vericilerin uzmanlık dereceleri göz önünde bulundurularak eşitlik (14) yardımıyla oluşturulur. n , kriterler setinin kardinalitesi $z = (z_1, \dots, z_n)$ olmak üzere: Z_i karar vericilerin müşterek değerlendirmelerinin vektörünü ifade etmektedir.

$$Z_i = \left(\prod_{p=1}^k (\mu_{ip})^{\psi_p}, \sqrt[3]{1 - \prod_{p=1}^k (1 - (\nu_{ip})^3)^{\psi_p}} \right) i = 1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

Adım 4: (i) kriterine ait pozitif skor değeri (PS_i) eşitlik (15) yardımıyla elde edilir ve tüm kriterler PS_i değeri büyükten küçüğe doğru sıralanır.

$$PS_i = 1 + \mu_i^3 - \nu_i^3. \quad (15)$$

Adım 5: PS_i değeri büyükten küçüğe doğru sıralanan kriterlerin karşılaştırmalı önem değeri (CS_i) eşitlik (16)'da belirtilen formülle hesaplanır.

$$CS_i = \begin{cases} 0, & i = 1, \\ PS_i - PS_{i-1}, & i > 1. \end{cases} \quad (16)$$

Adım 6: Kriterlerin karşılaştırmalı katsayı değerleri (CC_i) eşitlik (17)'deki gibi belirlenir.

$$CC_i = \begin{cases} 1, & i = 1, \\ CS_i + 1, & i > 1. \end{cases} \quad (17)$$

Adım 7: Her bir kriterle ait ağırlık değeri (q_i) hesaplanır. Bu değer eşitlik (18) yardımı ile elde edilir.

$$q_i = \begin{cases} 1, & i = 1, \\ \frac{q_{i-1}}{CC_i}, & i > 1. \end{cases} \quad (18)$$

Adım 8: Kriterlerin nihai ağırlık değerleri (ω_i) eşitlik (19)'da formülize edildiği gibi hesaplanır.

$$\omega_i = \frac{q_i}{\sum_{i=1}^n q_i}. \quad (19)$$

Adım 9: Karar vericilerden Tablo 3'teki dilsel skala yardımıyla alternatiflerin kriterlere göre değerlendirmesi istenir. Fermatean bulanık karar matrisi $F_p = [f_{ij}^p]$ şeklinde ifade edilir.

Adım 10: Adım 9'a göre oluşturulan karar matrisleri, her bir karar vericinin uzmanlık ağırlıkları kullanılarak eşitlik (20)'deki gibi birleştirilir.

$$F = \left(\prod_{i=1}^k (F_{\mu_{ij}})^{\psi_p}, \prod_{i=1}^k (F_{\nu_{ij}})^{\psi_p} \right). \quad (20)$$

Adım 11: Eşitlik (11) ve (12) vasıtasıyla skor fonksiyonu ($Sc(F)$) ve doğruluk fonksiyonu ($Acc(F)$) elde edilir.

Adım 12: Alternatifleri değerlendiren kriterlerin amacına göre pozitif ve negatif ideal çözüm setleri oluşturulur. $\mathfrak{B}$ fayda/maksimizasyon yönlü kriterleri, $\mathcal{C}$ ise maliyet/minimizasyon yönlü kriterleri temsil etmekte olup, $\mathfrak{B} + \mathcal{C} = n$ olmak üzere; Fermatean bulanık pozitif (S^*) ve negatif (S^-) ideal çözüm noktalarına eşitlik (21) ve (22) ile ulaşılmaktadır.

$$S^* = \{(\mu_{1*}, v_{1*}), \dots, (\mu_{n*}, v_{n*})\}$$

$$= \left\{ \max_i \left\langle Sc(f_{ij}) \mid j \in \mathfrak{B} \right\rangle, \min_i \left\langle Sc(f_{ij}) \mid j \in \mathcal{C} \right\rangle \mid i = 1, \dots, m \right\}, \quad (21)$$

$$S^- = \{(\mu_{1-}, v_{1-}), \dots, (\mu_{n-}, v_{n-})\}$$

$$= \left\{ \min_i \left\langle Sc(f_{ij}) \mid j \in \mathfrak{B} \right\rangle, \max_i \left\langle Sc(f_{ij}) \mid j \in \mathcal{C} \right\rangle \mid i = 1, \dots, m \right\}. \quad (22)$$

Adım 13: Alternatiflerin Fermatean bulanık ortamda pozitif ve negatif ideal çözüm noktalarına uzaklıklarını temsil eden ($d_{i,s*}$) ve ($d_{i,s-}$) değerleri eşitlik (23) ve (24)'e göre hesaplanır.

$$d_{i,s*} = \sum_{j=1}^n \omega_j d(F, S^*) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \omega_j \sqrt{\frac{1}{2} [(\mu_{ij}^3 - \mu_{j*}^3)^2 + (v_{ij}^3 - v_{j*}^3)^2 + (\pi_{ij}^3 - \pi_{j*}^3)^2]}, \quad (23)$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

$$d_{i,s-} = \sum_{j=1}^n \omega_j d(F, S^-) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \omega_j \sqrt{\frac{1}{2} [(\mu_{ij}^3 - \mu_{j-}^3)^2 + (v_{ij}^3 - v_{j-}^3)^2 + (\pi_{ij}^3 - \pi_{j-}^3)^2]}, \quad (24)$$

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

Adım 14: Pozitif ve negatif ideal çözüm noktalarına olan uzaklıklar esas alınarak alternatiflerin göreceli yakınlık değerleri (RC_i) hesaplanır. Bu değerler eşitlik (25) yardımı ile belirlenir ve RC_i değeri büyük olan alternatif tercih edilir.

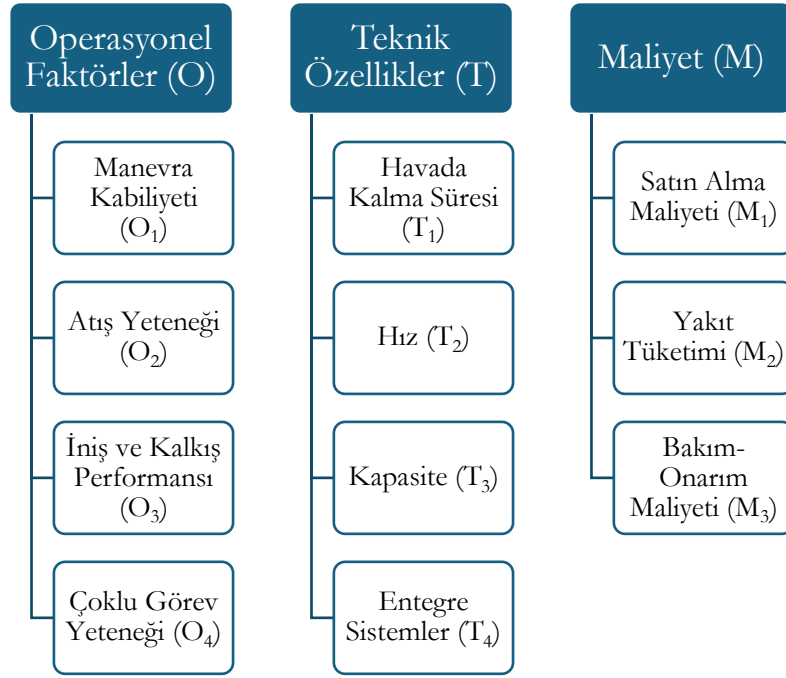
$$RC_i = \frac{d_{i,s-}}{d_{i,s*} + d_{i,s-}}. \quad (25)$$

4. BULGULAR

Bu çalışmada, alternatifler arasından en ideal yangın söndürme uçak tipinin belirlenmesi amacıyla Fermatean bulanık çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak örnek bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Yangın söndürme uçağı seçimi ve değerlendirmenin doğru ve eksiksiz bir şekilde yapılabilmesi için en önemli aşamalardan biri, probleme ilişkin uygun değerlendirme kriterlerinin belirlenmesidir. Kriterler belirlenirken, sezgisel ve/veya matematiksel olarak kolaylıkla değerlendirilebilir olmasının yanı sıra, tercih edilecek uçak tipinin belirlenmesine ne ölçüde katkı sağlayacağı da son derece önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, çalışmada kullanılan karar kriterleri, akademik veya sektörel deneyime sahip üç uzman karar vericinin görüşleri doğrultusunda oluşturulmuştur. Uzmanlardan ilki, bir devlet üniversitesinin orman mühendisliği anabilim dalında görev yapan ve orman yangınlarıyla mücadele konularında çeşitli çalışmaları bulunan bir akademisyendir. İkinci uzman, Türk Hava Kurumu envanterinde yer alan CL-215 tipi yangın söndürme uçaklarında 2500 saatin üzerinde uçuş tecrübesine sahip emekli bir pilottur. Üçüncü uzman ise Türk Hava Kuvvetleri bünyesinde C-130 tipi uçaklarla gerçekleştirilen orman yangını müdahale operasyonlarında da görev almış olup, hâlihazırda kargo taşıyıcı bir Türk havayolu işletmesinde kaptan pilot olarak görev yapmaktadır. Karar vericilerin mesleki birikimleri dikkate alındığında, yangın söndürme uçak tipi seçimi için yeterli kriterleri belirleyebileceği değerlendirilmektedir.

Uygulama sürecine geçilmeden önce, araştırma problemine ait hiyerarşik yapının oluşturulması için karar vericiler ile mülakatlar yapılarak “yangın söndürme uçağı seçim kriterleri neler olmalıdır?” sorusu uzmanlara yöneltilmiştir. Uzman 1 “Yangın söndürme uçağı seçim stratejisi, öncelikle operasyonel ihtiyaçlara ve bölgenin özel koşullarına göre belirlenmelidir. Uçakların taşıma kapasitesi, menzil, hız ve yakıt tüketimi gibi teknik özellikleri analiz

edilmelidir. Ayrıca, yangın söndürme uçağının operasyona uygunluğu ve maliyet gibi unsurlar da stratejiye dahil edilmelidir. Bu kapsamda, bölgesel yangın mevsimi, yerel iklim koşulları ve yangın söndürme teknikleri de dikkate alınarak uçak tipi seçimi yapılmalıdır.” şeklinde değerlendirmede bulunmuştur. Uzman 2 “İlk olarak uçakların su ve kimyasal madde taşıma kapasitesi ve bunları atış yeteneği büyük önem taşır, çünkü bu yangının büyüklüğüne ve hızına karşı etkili müdahale için gereklidir. Uçakların menzili, yangın bölgesine hızlı erişim sağlayabilmek adına uzun olmalı, aynı zamanda operasyonel verimliliği sağlamak için yakıt tüketimi göz önünde bulundurulmalıdır. Uçakların bakım onarım maliyetleri uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından kritik bir rol oynar, daha düşük maliyetli ve kolay bakım yapılabilen uçaklar avantaj sağlayabilir. Ayrıca, uçakların hava koşullarına dayanıklılığı, hızları, manevra kabiliyetleri ve iniş-kalkış performansları, özellikle zorlu ve engebeli arazilerde operasyonları kolaylaştıracak faktörlerdir. Son olarak, uçakların modern teknolojiye sahip olması, yangınla mücadelede etkinliği artırmak ve ekiplerin güvenliğini sağlamak adına önemli bir gerekliliktir.” yanıtını vermiştir. Uzman 3 ise “Yangın söndürme uçağı, performansını değerlendirmek için kapsamlı bir analiz sürecine tabi tutulmalıdır. Bu analiz, uçağın yangın söndürme kapasitesini incelemelidir. Uçakların operasyonel verimliliği, hız, yakıt tüketimi, havada kalma süresi ve manevra yeteneği gibi faktörler üzerinden değerlendirilmelidir. Bakım gereksinimleri, yedek parça temini ve üretici destekleri de analiz edilmesi gereken önemli faktörlerdir. Tüm bu faktörler, uçağın yangına müdahale kapasitesini belirleyen parametreler olarak analiz edilmelidir.” şeklinde görüş bildirmiştir. Uzman görüşleri doğrultusunda, yangın söndürme uçaklarının seçiminde belirleyici olan kriterlerin Şekil 3’te sunulan hiyerarşik yapı çerçevesinde ele alınması konusunda genel konsensus ortaya çıkmıştır. Söz konusu kriterlerin kısa açıklamaları Tablo 4’te sunulmuştur.



Şekil 3. Kriterlerin Hiyerarşik Yapısı

Tablo 4. Yangın Söndürme Uçağı Değerlendirme Kriterleri ve Literatürde Kullanılan Önceki Çalışmalar

Kriter	Açıklama
Manevra Kabiliyeti (O ₁)	Yangın alanına yaklaşırken ve söndürme işlemi sırasında uçakların hızlı ve güvenli bir şekilde manevra yapabilme yeteneği, yangın söndürme operasyonlarının başarısını artırır. Yüksek manevra kabiliyeti, uçağın çevikliği ve zorlu arazi koşullarına uyum sağlaması için önemlidir.
Atış Yeteneği (O ₂)	Uçağın su veya yangın söndürme kimyasallarını hızlı ve hassas bir şekilde atma yeteneği söndürme işleminin etkinliği açısından dikkate alınması gereken bir kriterdir.
İniş ve Kalkış Performansı (O ₃)	Uçağın kısa mesafelerde iniş ve kalkış yapabilme yeteneği, söndürme görevlerinin başarısını etkiler. Bu özellik, uçakların daha fazla alanda operasyon yapabilmesini sağlar.

Çoklu Görev Yeteneği (O ₄)	Uçakların, yangınlara müdahale haricinde nakliye, ambulans hizmeti, su üzerinde arama kurtarma ve acil tahliye gibi diğer hava destekli görevlerde kullanılabilmesi operasyonel esneklik sağlar.
Havada Kalma Süresi (T ₁)	Yangınların genellikle geniş alanlarda yayıldığı düşünüldüğünde, uçağın yakıt ikmali yapılmadan verimli olarak havada kalabileceği süre önemli bir faktördür. Uzun uçuş süresine sahip uçaklar daha fazla sorti yaparak etkin müdahalede bulunabilir.
Hız (T ₂) (Kiracı & Bakır, 2018), (Akyurt & Kabadayı, 2020)	Yangınlara müdahalede zamanla yarışıldığından, uçağın yangın mahalline hızlı şekilde ulaşarak zamanında müdahale edebilmesi, etkili yangın söndürme operasyonları için kritik öneme sahiptir.
Kapasite (T ₃)	Yangın söndürme için taşıyabileceği su veya kimyasal madde miktarı uçakların bir seferde ne kadar etkili olabileceğini belirler. Uçağın yüksek taşıma kapasitesine sahip olması ilk müdahalede etkinliği artırır.
Entegre Sistemler (T ₄)	Uçağın, GPS tabanlı takip sistemleri, veri toplama ve analiz teknolojileri gibi modern sistemlere sahip olması, yangın söndürme görevlerinde güvenliği ve verimliliği artırır.
Satın Alma Maliyeti (M ₁) (Dožić & Kalić, 2015), (Kiracı & Bakır, 2018), (Akyurt & Kabadayı, 2020)	Uçağın ilk satın alma fiyatı, bütçeyi etkileyen önemli bir kriterdir. Orman idaresinin bütçesine uygun ve maliyet etkin bir seçim yapmak gerekir.
Yakıt Tüketimi (M ₂) (Kiracı & Bakır, 2018), (Akyurt & Kabadayı, 2020), (Tezcan M. C., Düşük maliyetli bir Türk havayolu işletmesi için uçak tipi seçimi: Sezgisel bulanık SWARA-TOPSIS yaklaşımı, 2024)	Düşük yakıt tüketimi, uzun süreli operasyonlar için önemli maliyet avantajları sunar. Ayrıca, daha az yakıt tüketen uçaklar, çevresel etkileri de azaltır.
Bakım-Onarım Maliyeti (M ₃) (Özdemir, Basligil, & Karaca, 2011), (Akyurt & Kabadayı, 2020)	Uçakların bakım ve onarım gereksinimlerinin düşük olması, operasyonların sürekliliği için önemlidir. Kolay erişilebilir yedek parçalar ve düşük bakım maliyetleri, uçakların operasyonel ömrünü uzatır ve maliyet etkinliği sağlar.

Araştırmada kullanılan 11 kriter ve alternatifler kümesini oluşturan amfibik uçak modelleri (Beriev Be-200, De Havilland Canadair 515 (DHC-515), AVIC AG600) için üretici firmalardan elde edilen teknik ve finansal veriler doğrultusunda U₁, U₂, U₃ olmak üzere üç uzman karar vericinin yapmış olduğu değerlendirmeler “3.5. Fermatean Bulanık SWARA-TOPSIS Metodolojisi” başlığı altında verilen algoritma takip edilerek analiz edilmiştir. Araştırma problemine özgü değerlendirme kriterleri Fermatean bulanık SWARA, alternatif uçak modelleri ise Fermatean bulanık TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmiştir. Karar vericilerin uzmanlık ağırlıkları eşitlik (13) yardımı ile elde edilmiş ve ulaşılan sonuçlar Tablo 5’te sunulmuştur.

Tablo 5. Karar Vericilerin Uzmanlık Derecesi

Karar Verici	Uzmanlık Derecesi
U ₁	0,44
U ₂	0,35
U ₃	0,35

Karar vericilerin Tablo 3’teki dilsel skala yardımıyla yaptığı değerlendirmeler ve uzmanlık ağırlıkları da hesaba katılarak eşitlik (14) vasıtasıyla Fermatean bulanık karar matrisleri (Z) oluşturulmuştur (Tablo 6).

Tablo 6. Kriter Setine Ait Birleştirilmiş Karar Matrisi

Kriter	Z Sonuçları	Kriter	Z Sonuçları
O	(0,89,0,06)	T ₁	(0,93,0,04)
T	(0,95,0,04)	T ₂	(0,88,0,08)
M	(0,70,0,17)	T ₃	(0,99,0,02)
O ₁	(0,97,0,03)	T ₄	(0,80,0,11)

O ₂	(0,90,0,06)	M ₁	(0,92,0,06)
O ₃	(0,83,0,08)	M ₂	(0,81,0,10)
O ₄	(0,76,0,12)	M ₃	(0,69,0,19)

Fermatean bulanık karar matrisleri üzerinden değerlendirme kriterlerinin ana ve alt boyutları için pozitif skor değerleri (PS_i) eşitlik (15)'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Kriter setine ait PS_i değerleri Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Kriter Seti Pozitif Skor Değerleri

Kriter	PS_i	Kriter	PS_i	Kriter	PS_i	Kriter	PS_i
O	1,70	O ₁	1,94	T ₁	1,81	M ₁	1,76
T	1,77	O ₂	1,79	T ₂	1,74	M ₂	1,64
M	1,46	O ₃	1,65	T ₃	1,98	M ₃	1,31
		O ₄	1,58	T ₄	1,57		

Pozitif skor değeri büyük olandan küçüğe doğru sıralaması yapılan kriterlerin ana ve alt boyutları için karşılaştırmalı önem ağırlıkları (CS_i), karşılaştırmalı katsayı oranları (CC_i), yeniden hesaplanan ağırlık değerleri (q_i) ve kriter ağırlıkları (ω_i) eşitlik (16-19)'da belirtilen matematiksel ifadeler ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Kriterlerin Ağırlık Değerleri

Kriter	PS_i	CS_i	CC_i	q_i	ω_i
T	1,77	0	1,00	1,00	0,37
O	1,70	0,07	1,07	0,94	0,34
M	1,46	0,24	1,24	0,70	0,29
O ₁	1,94	0	1,00	1,00	0,31
O ₂	1,79	0,15	1,15	0,82	0,24
O ₃	1,65	0,14	1,14	0,74	0,23
O ₄	1,58	0,08	1,08	0,69	0,22
T ₃	1,98	0	1,00	1,00	0,28
T ₁	1,81	0,17	1,17	0,84	0,26
T ₂	1,74	0,06	1,06	0,81	0,25
T ₄	1,57	0,23	1,23	0,71	0,21
M ₁	1,76	0	1,00	1,00	0,40
M ₂	1,64	0,16	1,16	0,83	0,35
M ₃	1,31	0,19	1,19	0,64	0,25

Fermatean bulanık SWARA yönteminin son adımında ana boyutların ağırlıkları hiyerarşik düzende alt boyutlarına sentezlenerek alt kriterlere ait nihai ağırlık değerleri (ω_i) belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9. Alt Kriterlerin Nihai Ağırlık Değerleri

Kriter	ω_i	Kriter	ω_i	Kriter	ω_i
O ₁	0,10	T ₁	0,10	M ₁	0,11
O ₂	0,09	T ₂	0,09	M ₂	0,10
O ₃	0,08	T ₃	0,11	M ₃	0,08
O ₄	0,07	T ₄	0,07		

Karar vericilerden alınan değerlendirmeler doğrultusunda alternatifler için birleştirilmiş karar matrisleri eşitlik (20) yardımı ile hesaplanmıştır. Söz konusu matrislerde eşitlik (11)'de belirtilen skor fonksiyon değerleri ($Sc(F)$) yer almaktadır. Bu değerlerin eşit olması durumunda alternatifler eşitlik (12)'de belirtilen doğruluk fonksiyonu değerlerine ($Acc(F)$) göre sıralanır. En yüksek ($Sc(F)$) değerine sahip alternatif esas alınarak eşitlik (21) yardımı ile pozitif ideal

çözüm (S^*) noktaları hesaplanırken, en düşük ($Sc(F)$) değerine sahip alternatif esas alınarak eşitlik (22) yardımıyla negatif ideal çözüm (S^-) noktaları belirlenmiştir. Alternatiflerin operasyonel faktörler, teknik özellikler ve maliyet ana boyutları alt boyutlarına göre S^* ve S^- noktalarını gösteren birleştirilmiş karar matrisleri Tablo 10-12 ile aşağıda sunulmuştur.

Tablo 10. Alternatiflerin Operasyonel Faktörler Ana Boyutu Alt Kriterlerine Ait Birleştirilmiş Karar Matrisi

Alternatifler	$O_1:Sc(F)$	$O_2:Sc(F)$	$O_3:Sc(F)$	$O_4:Sc(F)$
Be-200	(0,90,0,18):0,74	(0,90,0,18):0,74	(0,75,0,33):0,39	(0,91,0,17):0,76
DHC-515	(0,91,0,17):0,76	(0,81,0,28):0,53	(0,76,0,31):0,40	(0,76,0,31):0,40
AVIC AG600	(0,83,0,25):0,58	(0,73,0,32):0,37	(0,70,0,37):0,29	(0,81,0,28):0,53
S^*	(0,91,0,17):0,76	(0,90,0,18):0,74	(0,76,0,31):0,40	(0,91,0,17):0,76
S^-	(0,83,0,25):0,58	(0,73,0,32):0,37	(0,70,0,37):0,29	(0,76,0,31):0,40

Tablo 11. Alternatiflerin Teknik Özellikler Ana Boyutu Alt Kriterlerine Ait Birleştirilmiş Karar Matrisi

Alternatifler	$T_1:Sc(F)$	$T_2:Sc(F)$	$T_3:Sc(F)$	$T_4:Sc(F)$
Be-200	(0,90,0,18):0,74	(0,94,0,14):0,88	(0,95,0,13):0,90	(0,88,0,19):0,72
DHC-515	(0,91,0,17):0,76	(0,80,0,29):0,53	(0,76,0,31):0,40	(0,80,0,29):0,53
AVIC AG600	(0,83,0,25):0,58	(0,90,0,18):0,74	(0,95,0,13):0,90	(0,83,0,25):0,58
S^*	(0,91,0,17):0,76	(0,94,0,14):0,88	(0,95,0,13):0,90	(0,88,0,19):0,72
S^-	(0,83,0,25):0,58	(0,80,0,29):0,53	(0,76,0,31):0,40	(0,80,0,29):0,53

Tablo 12. Alternatiflerin Maliyet Ana Boyutu Alt Kriterlerine Ait Birleştirilmiş Karar Matrisi

Alternatifler	$M_1:Sc(F)$	$M_2:Sc(F)$	$M_3:Sc(F)$
Be-200	(0,76,0,31):0,40	(0,83,0,25):0,58	(0,81,0,28):0,53
DHC-515	(0,80,0,29):0,53	(0,89,0,19):0,72	(0,83,0,25):0,58
AVIC AG600	(0,70,0,37):0,29	(0,76,0,31):0,40	(0,75,0,33):0,39
S^*	(0,80,0,29):0,53	(0,89,0,19):0,72	(0,83,0,25):0,58
S^-	(0,70,0,37):0,29	(0,76,0,31):0,40	(0,75,0,33):0,39

Alternatiflerin Fermatean bulanık ortamda pozitif ve negatif ideal çözüm noktalarına uzaklıklarını temsil eden (d_{i,s^*}) ve (d_{i,s^-}) değerleri eşitlik (23) ve (24)'e göre hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 13'te sunulmuştur.

Tablo 13. Alternatiflerin Pozitif ve Negatif İdeal Çözüm Noktalarına Uzaklık Değerleri

Alternatifler	d_{i,s^*}	d_{i,s^-}
Be-200	0,08	0,57
DHC-515	0,19	0,53
AVIC AG600	0,22	0,49

Alternatifler kümesinden her bir alternatifin optimal sıralama değeri olan göreceli yakınlık değerleri (RC_i) eşitlik (25)'te belirtilen formülle hesaplanmıştır. Maksimum fayda analizine göre yapılması gereken tercih sıralaması Tablo 14'te sunulmuştur.

Tablo 14. Alternatiflerin Göreceli Yakınlık Değerleri ve Tercih Edilebilirlik Sıralaması

Alternatifler	RC_i	Sıra
Be-200	0,896	1
DHC-515	0,767	2
AVIC AG600	0,692	3

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Küresel iklim değişikliği nedeniyle dünya genelinde sıcaklıklar artmakta ve bu durum ormanlar için büyük tehdit oluşturmaktadır. Bu tehdit orman yangınlarının sıklığı ve şiddetinin artmasına yol açarken, etkin yangın önleme stratejisi ve modern teknolojilerle desteklenen erken müdahale mekanizmalarının oluşturulmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, havacılık teknolojileri ve hava araçları, yangınlara karşı alınacak tedbirlerde önemli avantaj sağlamaktadır. Havacılık sektöründe geliştirilen teknolojiler, yangınların erken tespit edilmesi, hızlı ve etkili müdahale gerçekleştirilmesi ve yangın söndürme sürecinin daha verimli yürütülmesine katkı sunmaktadır.

Orman yangınlarıyla mücadelede hava filosunun başarısı; yangının şiddeti, coğrafi özellikler ve yangının niteliği gibi çok sayıda değişkene bağlıdır. Orman Genel Müdürlüğü envanterinde bulunan AT-802F tipi uçaklar 3100 litre su taşıma kapasitesine sahip hafif sınıf yangın söndürme uçağı olup, yüksek manevra kabiliyeti sayesinde dar ve engebeli alanlarda etkili şekilde görev yapabilmektedir. Bu uçaklar küçük ve orta ölçekli yangınlarda başarılı performans sergilese de geniş çaplı yangınlarda daha fazla su taşıma kapasitesine sahip ve daha uzun süre havada kalabilen uçaklara gereksinim duyulmaktadır. Bu nedenle filo diversifikasyonu (çeşitlendirme) stratejisi, yangınların ölçeği, türü ve coğrafi koşullara göre optimize edilmiş bir müdahale imkanı sunarak hem yangın söndürme kapasitesini artıracak hem de uzun vadede daha sürdürülebilir yangın yönetim modeli oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada, orman ve orman dışı yangınlara müdahale konusunda stratejik öneme sahip olan yangın söndürme uçak tipi seçimi üzerine bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Orman Genel Müdürlüğü'nün mevcut filosunu genişletme kararı alması söz konusu olduğunda en uygun yangın söndürme uçak modelini belirlemek amacıyla örnek bir uygulama yapılmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan karar verme modelinde kullanılmak üzere; literatürde sıklıkla kullanılan ve ÇKKV problemlerinde başarılı performans gösteren SWARA ve TOPSIS yöntemleri ile karar vericiler açısından belirsizliğin yüksek olduğu karmaşık yapı problemlerde sezgisel bulanık kümelerle göre daha iyi sonuçlar verdiği düşünülen Fermatean bulanık kümeler tercih edilmiştir. Yapılan araştırmada, öncelikle uzman karar vericiler ile görüşülerek probleme özgü değerlendirme kriterleri belirlenmiştir. Operasyonel faktörler, teknik özellikler ve maliyet ana boyutları altında toplam 11 adet alt kriter ele alınmış ve araştırmanın amacı doğrultusunda problemin hiyerarşik yapısı oluşturulmuştur. Ardından bu hiyerarşik yapı çerçevesinde çözüm algoritması sistematik bir şekilde izlenerek her bir kriterin ağırlık değerleri elde edilmiştir. SWARA yöntemi ile bulunan ağırlık değerleri, ideal çözüme göreli yakınlık değerlerin hesaplanması ile tercih edilebilir alternatifler kümesinden en iyi seçeneğin belirlenmesini sağlayan TOPSIS yöntemine girdi olarak kullanılmıştır. Böylelikle, Fermatean bulanık kümelerle entegre edilen SWARA ve TOPSIS yöntemleri birbirini besleyecek bir algoritmanın parçaları olarak kullanılmış ve araştırmanın amacı doğrultusunda maksimum faydayı sağlayacak sonuca ulaşılmıştır.

Araştırmada, yangın söndürme uçaklarından turbofan motorlu Beriev Be-200, turboprop motorlu uçaklardan ise DHC-515 ve AVIC AG600 tipi uçaklar karar alternatifleri olarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda alternatif uçak modellerinin tercih edilebilirlik sıralaması; Beriev Be-200, DHC-515 ve AVIC AG600 olarak saptanmıştır. Bu sonuç, Be-200'ün operasyonel, teknik ve finansal kriterler bakımından diğer alternatiflere kıyasla daha dengeli performans sunduğunu göstermektedir. Bu kapsamda, Orman Genel Müdürlüğü tarafından filo diversifikasyonu (çeşitlendirme) kararı alındığında, Beriev Be-200 tipi uçağın tercih edilmesinin sağlayacak faydayı artıracak değerlendirilmektedir.

Kriterlerin problem içerisindeki önem düzeyine bakılacak olursa; yangın söndürme uçak tipi seçiminde etki düzeyi en yüksek ana kriterin %37 ağırlık değeri ile “teknik özellikler” olduğu belirlenirken, “operasyonel faktörler” ana boyutu %34 ağırlık değeri olarak teknik özellikler ana kriterinden sonra etki düzeyi en yüksek ikinci ana kriter olarak belirlenmiştir. Alt kriterler açısından yapılan değerlendirmede; teknik özellikler ana boyutu alt kriteri olan taşıma kapasitesi (T_3) ve maliyet ana boyutu alt kriteri olan satın alma maliyeti (M_1) %11 ağırlık değeri ile yangın söndürme uçağı seçiminde en önemli alt kriterler olarak belirlenmiştir. Bunu sırasıyla; %10 ağırlık değeri ile havada kalma süresi (T_1), manevra kabiliyeti (O_1) ve yakıt tüketimi (M_2), %9 ağırlık değeri ile atış yeteneği (O_2) ve hız (T_2), %8 ağırlık değeri ile iniş-kalkış performansı (O_3) ve bakım onarım maliyeti (M_3), son olarak %7 ağırlık değeri ile entegre sistemler (T_4) ve çoklu görev yeteneği (O_4) kriterleri takip etmiştir.

Bu araştırmada, uçak tipi seçiminde literatürde henüz uygulanmamış bir yöntem çerçevesinde Fermatean bulanık kümeler ile SWARA ve TOPSIS yöntemleri entegre şekilde kullanılmıştır. Gelecek çalışmalar, alternatif uçak sayısının artırılmasıyla bu modeli daha etkin kılacaktır. Ayrıca, karar verme sürecinde danışılan uzman sayısının artırılması, kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesinde önemli katkılar sağlayacaktır. Kolaylıkla güncellenebilir bir

yapıya sahip olan bu model karar alma süreçlerinin sistematik bir şekilde yürütülmesi ve optimal çözümler geliştirilmesi noktasında uygulanabilir bir çerçeve sunmaktadır. İlerleyen araştırmalarda, alternatif ÇKKV yöntemlerinin Fermatean bulanık kümeler ile birleştirilmesi ya da mevcut yöntemlerin aralık değerli Fermatean bulanık kümelere entegrasyonu kararın daha sorgulanabilir olmasını ve daha geniş bir perspektiften ele alınmasını sağlayabilir. Ayrıca, kriterler arasındaki karşılıklı ilişkileri gösterebilen CRITIC ve DEMATEL gibi farklı ÇKKV yöntemleri kullanılarak, daha kapsamlı bir kriter seti ile araştırma derinleştirilebilir. Son olarak, elde edilen sonuçların deterministik ve/veya stokastik yaklaşımlarla karşılaştırılmalı olarak değerlendirilerek yöntemin doğruluğu, etkinliği ve karar desteği açısından performans analizi yapılabilir. Bu tür karşılaştırmalar, uçak seçimi gibi stratejik kararların alındığı alanlarda karar süreçlerinin güvenilirliğini artıracaktır.

TEŞEKKÜR

Yazar makaleyi önemli ölçüde geliştiren yorum ve önerileri için Sayın Editör ve iki anonim hakeme; ayrıca, araştırmanın anket uygulaması aşamasında katkılarını sunan uzman karar vericilere teşekkür etmektedir.

ETİK BEYAN & GENEL AÇIKLAMALAR

Bu araştırma için Bahçeşehir Üniversitesi Etik Kurul Başkanlığı'ndan 14.11.2024 tarih ve 2024/11-3(2) sayılı kararı ile Etik Kurul izni alınmıştır. Bu makale araştırma ve yayın etiği standartlarını karşılamaktadır. Bu çalışmada yapılan değerlendirmeler ve elde edilen sonuçlar Orman Genel Müdürlüğü'nün kurumsal görüşlerini içermemektedir.

FON

Söz konusu değildir.

VERİ VE MALZEME MÜSAİTLİĞİ

Söz konusu değildir.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışmalarının bulunmadığını belirtmektedir.

KAYNAKÇA

- Akyurt, İ. Z., & Kabadayı, N. (2020). Bulanık AHP ve bulanık gri ilişkisel analizi yöntemleri ile kargo uçak tipi seçimi: Bir Türk havayolu firmasında uygulama. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 15(57), s. 38-55. <https://doi.org/10.19168/jyasar.609416>
- Ardil, C. (2020). Trainer aircraft selection using preference analysis for reference ideal solution (PARIS). *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, 14(5), s. 193-204.
- Avcı, M., & Korkmaz, M. (2021). Türkiye'de orman yangını sorunu: Güncel bazı konular üzerine değerlendirmeler. *Turkish Journal of Forestry*, 22(3), s. 229-240. <https://doi.org/10.18182/tjf.942706>
- Aydoğan, H. (2023). Çok kriterli sıralama ve seçim problemleri için Fermatean bulanık SWARA-TOPSIS metodoloji önerisi. *Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Bakır, M., Akan, Ş., & Özdemir, E. (2021). Regional aircraft selection with fuzzy PIPRECIA and fuzzy MARCOS: A case study of the Turkish airline industry. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 19(3), s. 423-445.
- Bruno, G., Esposito, E., & Genovese, A. (2015). A model for aircraft evaluation to support strategic decisions. *Expert Systems with Applications*, 42(13), s. 5580-5590.
- Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for Group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114, s. 1-9.
- Dozic, S., & Kalic, M. (2014). An AHP approach to aircraft selection process. *Transportation Research Procedia*, 3, s. 165-174.
- Dožić, S., & Kalić, M. (2015). Comparison of two MCDM methodologies in aircraft type selection problem. *Transportation Research Procedia*, 5(1), s. 910-919.
- 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), s. 1487-1498.

- Kabak, M., & Erdebili, B. (2021). *Bulanık çok kriterli karar verme yöntemleri MS Excel ve software çözümlü uygulamalar*. Ankara: Nobel Yayın.
- Kartal, M. (2022). Havayolu İşletmeleri için uçak seçim stratejisinde SWARA tabanlı EDAS ve COPRAS yöntemlerinin kullanımı. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Keršulienė, V., Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2010). Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). *Journal of Business Economics and Management*, 11(2), s. 243–258. <https://doi.org/10.3846/jbem.2010.12>
- Kiracı, K., & Bakır, M. (2018). Hava aracı seçim problemlerinde çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanılması ve bir uygulama. *Journal of Transportation and Logistics*, 3(1), s. 13-24.
- 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), s. 27-58.
- Kocaoğlu, B., Odabaşoğlu, Ş., & Özasan, 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), s. 243-263.
- Küçük, M., Tiryaki Güngör, A. G., & Küçük, Ö. (2024). Doğal örtü yangını ve kontrollü anız yakmanın bazı toprak özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 9(1), 13-22.
- 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*, s. 9-13.
- Senapati, T., & Yager, R. R. (2020). Fermatean fuzzy sets. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11, s. 663-674. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01377-0>
- Şimşek, H., Özasan, İ. H., & Eryılmaz, İ. (2022). Pilot selection in airline organizations with the analytical hierarchy process. *Journal of Aviation*, 6(2), s. 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), s. 76-104. <https://doi.org/10.51785/jar.969614>
- Tezcan, M. C. (2024). Düşük maliyetli bir Türk havayolu işletmesi için uçak tipi seçimi: Sezgisel bulanık SWARA-TOPSIS yaklaşımı. *Journal of Aerospace Science and Management*, 2(2), s. 1-22.
- Tezcan, M. C. (2024). Pisagor bulanık kümelerle entegre AHP ve TOPSIS yöntemleri ile uçak tipi seçiminin optimizasyonu: Havayolu işlemleri için model önerisi. *Journal of Aviation Research*, 6(1), 1-24. <https://doi.org/10.51785/jar.1371387>
- Wang, T., & Chang, T. (2007). Application of TOPSIS in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 33(4), s. 870-880.
- Yang, S., Pan, Y., & Shouzheng, Z. (2022). Decision making framework based Fermatean fuzzy integrated weighted distance and TOPSIS for green low-carbon port evaluation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 114(C), Makale 105048. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105048>