Journal of Aviation and Space Studies
Havacılık ve Uzay Çalışmaları Dergisi

E-ISSN: 2757-7317 & URL: https://dergipark.org.tr/pub/jass

Araştırma Makalesi

KBRN olaylarında İHA seçimine yönelik çok kriterli karar verme yaklaşımı

Melike Özdemir[1], Arda Umut Uzunköprü[2], Zeynep Akbaş[3], Yusuf Bera Sanlı[4], Emel Güven[5] ve Tamer Eren[6]

Öz. Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik ve Nükleer (KBRN) olaylar; insan sağlığı ve çevre güvenliği için büyük tehlike oluşturan, yönetilmesi zor kriz durumlarıdır. Bu gibi riskli alanlarda müdahale gücünü artırmak ve tehlikeyi uzaktan takip edebilmek için İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanımı artık bir zorunluluktur. Ancak KBRN şartlarına en uygun İHA modelini seçmek, birçok teknik özelliği aynı anda değerlendirmeyi gerektiren karmaşık bir iştir. Bu çalışmada, belirlenen on farklı kriter üzerinden altı İHA modeli incelenmiştir. Seçim yaparken kişisel yorumların etkisini azaltmak ve en doğru sonucu bulmak için Pisagor Bulanık AHP ve TOPSIS yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, bir İHA'nın KBRN müdahalesinde başarılı olmasını sağlayan en önemli özelliğin "Termal Kamera" olduğu ve bu kriterin diğerlerine göre en yüksek ağırlığa sahip olduğu görülmüştür. Bu temel sonuca dayanarak, dikey iniş-kalkış yapabilen "VTOL" tipi İHA'ların kullanım uygunluğu açısından en iyi seçenek olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, karar vericilere doğru ekipman seçimi için güvenilir bir yol gösterirken, kullanılan hesaplama yöntemlerinin afet yönetimindeki etkinliğini ispatlayarak literatüre katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: KBRN, insansız hava aracı, İHA seçimi, Pisagor bulanık AHP, Pisagor bulanık TOPSIS.

Research Paper

Multi-criteria decision-making approach for UAV selection in CBRN incidents

Abstract. Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear (CBRN) incidents are crisis situations that pose a significant threat to human health and environmental safety and are difficult to manage. The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) is now essential for enhancing response capabilities and monitoring hazards remotely in such high-risk areas. However, selecting the UAV model best suited for CBRN conditions is a complex task requiring the simultaneous evaluation of numerous technical features. In this study, six UAV models were analyzed based on ten defined criteria. To minimize the influence of personal judgment and arrive at the most accurate result, the Pythagorean Fuzzy AHP and TOPSIS methods were used in conjunction. The results of the analysis revealed that the most critical feature enabling a UAV to succeed in CBRN operations is the "Thermal Camera," and this criterion holds the highest weight compared to the others. Based on this key finding, it was determined that "VTOL" (Vertical Take-Off and Landing) UAV s are the best option in terms of suitability for use. This study provides decision-makers with a reliable guide for selecting the appropriate equipment while contributing to the literature by demonstrating the effectiveness of the computational methods used in disaster management.

Keywords: CBRN, unmanned aerial vehicle, UAV selection, Pythagorean fuzzy AHP, Pythagorean fuzzy TOPSIS.

1 Endüstri Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi, 71450, Kırıkkale, Türkiye; melikke294@gmail.com
2 Endüstri Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi, 71450, Kırıkkale, Türkiye; umut_0665@hotmail.com
3 Endüstri Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi, 71450, Kırıkkale, Türkiye; akbaszeynep464@gmail.com
4 Endüstri Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi, 71450, Kırıkkale, Türkiye; beraasanli@gmail.com
5 Endüstri Mühendisliği, OSTİM Teknik Üniversitesi, 06374, Ankara, Türkiye; emel-gvn@hotmail.com
6 Endüstri Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi, 71450, Kırıkkale, Türkiye; tamereren@gmail.com (Sorumlu Yazar)
https://doi.org/10.52995/jass.1883740
Geliş Tarihi: 6 Şubat 2026; Kabul Tarihi: 11 Mayıs 2026; Yayımlanma Tarihi: 31 Ağustos 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

Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik ve Nükleer (KBRN) olayları hem siviller hem de acil müdahale birimleri açısından son derece tehlikeli ve karmaşık kriz senaryoları arasında yer almaktadır. Bu tür olaylar; sanayi tesislerinde meydana gelen kimyasal sızıntılar, biyolojik ajanlarla yapılan saldırılar veya radyolojik/nükleer kazalar gibi çeşitli kaynaklardan ortaya çıkabilmektedir. KBRN olaylarının potansiyel etkileri; akut sağlık sorunlarından uzun vadeli çevresel bozulmalara ve ulusal güvenlik tehditlerine kadar geniş bir yelpazede yoğun riskler oluşturur (Baş & Karakurt, 2024).

Günümüzün karmaşık güvenlik tehditleri ve artan teknolojik bağımlılığı, afet yönetimi ve acil durum müdahalesinde daha esnek, hızlı ve entegre çözümlere duyulan ihtiyacı artırmaktadır. İnsansız Hava Araçları (İHA), bu noktada tehlikeli bölgelere hızlı erişim sağlama, havadan sürekli izleme yapma ve üzerine entegre edilen ölçüm cihazlarıyla veri toplama konularında benzersiz avantajlar sunmaktadır (Villi & Yakar, 2022). Ancak bir KBRN operasyonunda kullanılacak İHA modelinin; taşıma kapasitesi, uçuş süresi ve çevresel dayanıklılık gibi teknik özelliklerinin yanı sıra ekonomik sürdürülebilirliği de seçim aşamasında kritik birer faktördür (Yeşilay & Macit, 2020). Bu kriterlerin bir arada değerlendirilmesi, karar vericiler için oldukça karmaşık bir süreci beraberinde getirmektedir.

KBRN sahasında görev yapacak İHA'ların seçiminde en kritik husus, cihazın operasyonel kısıtlar altında sergileyeceği performanstır. Literatürde, acil durum yönetiminde kullanılan İHA'ların sadece görüntü alması değil, aynı zamanda otonom uçuş kabiliyeti ve sahadaki verileri (gaz, radyasyon vb.) anlık olarak komuta merkezine aktarabilme yeteneği üzerinde durulmaktadır; nitekim İHA tabanlı sistemlerin radyasyon verilerini gerçek zamanlı olarak toplayıp üç boyutlu çevresel verilerle entegre ederek kaynak lokalizasyonu yapabildiği gösterilmiştir (Schraml, 2022). Özellikle arama-kurtarma ve afet bölgelerinde İHA teknolojisinin sağladığı hız ve verimlilik, müdahale başarısını doğrudan etkilemektedir.

KBRN olaylarına müdahale süreçlerinde kullanılacak en uygun teknolojik platformun belirlenmesi, sadece teknik bir tercih değil, aynı zamanda operasyonel başarıyı ve can güvenliğini doğrudan etkileyen stratejik bir karar verme sürecidir. Bu süreçte; batarya ömrü, sinyal menzili, sensör hassasiyeti, veri şifreleme güvenliği ve birim maliyet gibi birbiriyle çelişen pek çok kriterin eş zamanlı olarak değerlendirilmesi zorunluluğu, meseleyi karmaşık bir Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) problemi haline getirmektedir. Geleneksel karar verme yöntemleri, genellikle kesin ve net verilerle çalışma eğiliminde olduklarından, KBRN sahasının doğasında bulunan yüksek belirsizlik, eksik bilgi ve uzman görüşlerindeki subjektif yargıları modellemede yetersiz kalmaktadır. Bu noktada, insan zihnindeki muğlaklığı ve tereddütleri matematiksel bir çerçeveye oturtmak amacıyla geliştirilen bulanık mantık yaklaşımları kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle Pisagor Bulanık Kümeler (PFS), üyelik ve üyelik dışı derecelerinin kareleri toplamının 1'e eşit veya küçük olması kuralına dayanarak, karar vericilere Sezgisel Bulanık Kümelere (IFS) oranla çok daha geniş bir hareket alanı ve esneklik tanımaktadır. Bu genişletilmiş düzlem, uzmanların bir İHA modelinin uygunluğu konusundaki "belirsizlik" veya "kararsızlık" payını daha hassas bir şekilde puanlamasına imkân vermektedir. Sonuç olarak, KBRN gibi risk toleransının sıfıra yakın olduğu alanlarda, Pisagor Bulanık AHP ve TOPSIS tabanlı hibrit yaklaşımların kullanılması, hem kriter ağırlıklandırma sürecindeki sübjektif hataları minimize etmekte hem de en ideal alternatifin bilimsel bir tutarlılıkla sıralanmasını sağlayarak karar destek mekanizmalarının güvenilirliğini en üst düzeye çıkarmaktadır (Tezcan, 2024).

Bu çalışmada, KBRN olaylarında en uygun İHA modelinin belirlenmesi amacıyla ÇKKV yaklaşımlarından Pisagor Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve Pisagor Bulanık İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tekniği (TOPSIS) yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Pisagor Bulanık AHP yöntemi, uzman görüşlerindeki belirsizlikleri daha esnek ve geniş tanım aralıklarıyla ifade ederek, kriterlerin önem derecelerini Pisagor bulanık sayılar aracılığıyla belirlemekte ve karar vericilere daha fazla güven sunmaktadır. Pisagor Bulanık TOPSIS yöntemi ise, alternatiflerin ideal ve negatif-ideal çözümlere olan uzaklıklarını Pisagor bulanık mantık çerçevesinde analiz ederek, kararların bulanıklık içeren durumlar altında daha güvenilir bir şekilde verilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemlerin bir arada kullanımı, en uygun İHA modelinin daha gerçekçi, esnek ve güvenilir biçimde seçilmesine olanak tanımaktadır (Saaty, 2008).

Bu gelişmeler, İHA'ların yalnızca askeri operasyonlarda kullanılan taktik sistemler olmaktan çıkarak; afet yönetimi, sınır güvenliği, keşif-gözetleme faaliyetleri, kritik altyapıların izlenmesi ve riskli ortamların değerlendirilmesi gibi çok daha geniş bir alanda stratejik karar destek aracı haline gelmesine zemin hazırlamaktadır. Özellikle sensör teknolojilerinin, veri işleme algoritmalarının ve otonom uçuş kabiliyetlerinin gelişmesiyle birlikte İHA'ların menzil,

dayanıklılık, görüntüleme kapasitesi ve görev çeşitliliği kayda değer biçimde artmıştır. Bu sayede, tehlikeli bölgelerde insan unsurunu doğrudan riske atmadan bilgi toplanabilmekte, durum değerlendirmesi yapılabilmek de ve müdahale planları daha gerçekçi temellere oturtulabilmektedir. Bununla birlikte, İHA teknolojisinin bu denli yaygınlaşması; doğru platformun seçilmesi, görev türüne uygun sensör entegrasyonu, veri güvenliği, maliyet etkinliği ve sürdürülebilir bakım altyapısı gibi konuların sistematik biçimde ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Literatürde de vurgulandığı üzere, insansız hava araçları farklı güvenlik ve kriz senaryolarında yalnızca operasyonel üstünlük değil, aynı zamanda ulusal kapasite, savunma planlaması ve teknolojik bağımsızlık açısından önemli bir güç çarpanı olarak değerlendirilmektedir (Kıllıoğlu, 2023).

Literatürdeki bazı örnek çalışmalarda İHA seçimi problemine çözüm olarak ÇKKV yöntemlerinin uygulanmasına rastlanmaktadır. Ancak söz konusu bazı çalışmalarda karar verme süreçlerinin belirsizliği ve kararsızlık durumu göz önüne alınmadığı görülmektedir. Bu çalışma, KBRN senaryolarında görev alacak en uygun İHA alternatifini belirlemek amacıyla Pisagor Bulanık AHP ve Pisagor Bulanık TOPSIS yöntemlerini bütünleşik bir yapıda kullanmaktadır. Bu amaçla hem kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesi noktasındaki belirsizlikleri hem de alternatiflerin önem sıralaması noktasındaki belirsizliklerin dikkate alındığı görülmektedir. Belirsizlik altındaki karar verme süreçlerinde Pisagor Bulanık Kümeler, uzman görüşlerini daha geniş bir matematiksel düzlemde modelleyerek hatalı seçim riskini en aza indirmektedir (Yager, 2013). Yapılan bu araştırma, KBRN savunma envanterine eklenecek teknolojik araçların seçiminde bilimsel bir karar destek mekanizması oluşturmayı hedeflemektedir.

Bu çalışma beş ana bölümden oluşmaktadır ve her bölüm belirli bir amaca hizmet edecek şekilde yapılandırılmıştır. Birinci bölümde, araştırmanın genel çerçevesi çizilerek konuya giriş yapılmakta, çalışmanın amacı, önemi ve kapsamı hakkında temel bilgiler sunulmaktadır. İkinci bölümde, araştırmanın dayandığı kavramsal çerçeve ele alınmakta; ilgili literatür incelenerek temel kavramlar, kuramsal yaklaşımlar ve önceki çalışmalar detaylı biçimde açıklanmaktadır. Üçüncü bölümde, araştırmada kullanılan yöntemler açıklanmakta; araştırma modeli, veri toplama teknikleri ve analiz süreçleri hakkında bilgi verilmektedir. Dördüncü bölümde, elde edilen bulgular sistematik bir şekilde sunulmakta ve yorumlanmaktadır. Son olarak beşinci bölümde ise araştırmanın genel sonuçları ortaya konulmakta, bulgular doğrultusunda değerlendirmeler yapılmakta ve önerilere yer verilmektedir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

KBRN olaylar; taşıdıkları yüksek tehlike seviyesi ve öngörülemez doğaları nedeniyle, müdahalelerde insan unsurunun yerine insansız sistemlerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda, insansız hava araçları, insan hayatını riske atmadan keşif, görüntü aktarımı, tehlikeli madde algılama ve çevresel durum analizi gibi görevleri gerçekleştirme yetenekleriyle ön plana çıkmaktadır. Ancak, KBRN ortamlarında görev alacak İHA sistemlerinin belirlenmesi süreci, çeşitli teknik ve operasyonel faktörlerin (örneğin menzil, dayanıklılık, uçuş süresi, sensör özellikleri) eş zamanlı olarak değerlendirilmesini gerektiren karmaşık bir karar problemidir. Klasik karar verme yöntemleri bu çok boyutlu yapıyı ve uzman değerlendirmelerindeki belirsizliği yeterince yansıtmakta yetersiz kalabilmektedir; bu nedenle bulanık mantık ve çok kriterli karar verme yöntemleri, belirsizlik ve öznel yargıların modele dahil edilmesinde daha etkili yaklaşımlar olarak önerilmektedir (Kahraman, 2018). Söz konusu çalışmada kriterlerin ağırlıkları Pisagor Bulanık AHP ile belirlenmiş, ardından Pisagor Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılarak farklı İHA alternatifleri karşılaştırmalı olarak sıralanmıştır. Böylece, KBRN müdahalelerinde en uygun İHA modelinin seçimi, belirsizlikleri dikkate alan sistematik ve nesnel bir yaklaşımla gerçekleştirilmiştir.

2.1. Literatür Taraması

Ghorbani ve Ramezanian (2020) çalışmalarında insani yardım lojistiğinde taşıyıcı ve tedarikçi seçim problemini ele almışlardır ve problemin çözümüne iki aşamalı stokastik programlama yaklaşımı uygulamışlardır. Polat (2022) gerçekleştirdiği çalışmada afet lojistiği konusunu ele almış ve Türkiye'de il düzeyinde afet dağıtım merkezlerinin alternatif yerlerinin belirlenmesinde AHP, TOPSIS ve hedef programlama yöntemleri entegrasyonunu kullanmıştır. Salam ve Khan (2020) çalışmalarında Haiti depreminde yaşanan lojistik müdahalesindeki sorunları ele almış ve yaşanan insani lojistik zorluklarını araştırmışlardır.

Park ve diğerleri (2026) gerçekleştirdikleri çalışmada endüstriyel tesislerdeki tehlikeli kimyasal sızıntılara ilk müdahalenin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesini sağladığı avantajlara yer vermiş ve kimyasal sensörlerle donatılmış İHA'ların kullanılmasının etkin bir müdahale sunacağını tespit etmişlerdir. Nemeth ve diğerleri (2024) gerçekleştirdikleri çalışmada KBRN operasyonlarında karar verme ve karar uygulama arasındaki sürenin çok uzun

olduğu üzerinde durmuş ve süreyi iyileştirmek için KBRN karar destek sistemi oluşturmuşlardır. Taşcıoğlu, Konukbay, Karabacak, ve Koluman (2026) gerçekleştirdikleri çalışmada KBRN olaylarının dekontaminasyonunda mevcut kontrol metodolojisini durumunu incelemiş ve etkinliği arttırmak için yeni teknolojilerin entegrasyon potansiyelini ele almıştır.

Wu, Mjörnell, Claes, ve Mikael (2021) çalışmalarında binalardaki tehlikeli maddelerin varlığının değerlendirilmesinin öneminden bahsetmişler ve tespit için makine öğrenmesi yaklaşımı sunmuşlardır. Mert ve Çetinyokuş (2020) gerçekleştirdikleri çalışmada Türkiye'deki denizyolu taşımacılığında tehlikeli madde kaynaklı kazaların nedenini araştırmışlardır. Çalışma sonuçlarının acil durum planlarına katkı sağlayacağı sonucuna varmışlardır. Sanlı ve diğerleri (2025) çalışmalarında tehlikeli madde lojistiğinde Adıyaman ve Ankara güzergahının belirlenmesi problemini ele almış ve çözüm yöntemi olarak bulanık çok ölçütlü karar verme yöntemlerini kullanmışlardır.

Koca ve Yıldırım (2020) makalesinde Web of Science (WOS) tabanında bulunan 2005-2019 yılları arasındaki Bulanık ÇKKV konulu çalışmaları incelemiş ve Çin, Tayvan, Türkiye, Hindistan ve İran'ın bu konuda aktif olduğu sonucuna varmışlardır. Dehshiri (2026) çalışmasında sürdürülebilir tedarikçi seçimi problemini ele almış ve bulanık yöntemlerden Delphi, SWARA ve F-WASPAS yöntemlerinin karşılaştırma analizini kullanarak en yüksek önceliğe sahip tedarikçiyi saptamıştır. Çalık (2021) gerçekleştirdiği çalışmasında yeşil tedarik zincirndeki riskleri ele almış ve Türkiye'deki mobilya sektöründe bulunan bir işletme üzerinden AHP, TOPSIS, WIKOR ve ARAS yöntemlerinin entegrasyonundan oluşan bir çözüm yöntemi sunmuştur.

Yeşilay ve Macit (2020) gerçekleştirdikleri çalışmada İHA'ların dünya ve Türkiye ekonomisine etkilerini araştırmışlar, İHA'larda gelecekte ne beklendiği sorusuna cevap aramışlardır. Bir diğer çalışmada Küçükçelebi ve Yaldız (2020), kablolu İHA sistemlerini incelemiş ve bunların uygulamalarına detaylı yer vermiştir. Güngör (2023) yaptığı çalışmada İHA'ların arkeolojik alanlarda kullanımını incelemiş ve bu alanlarda İHA kullanmanın zaman ve maliyet açısından kazanç sağladığı sonucuna varmıştır. Kara, Yumuşak, ve Eren (2023) gerçekleştirdikleri çalışmada dünya genelinde bilinçsizce oluşturulan anız yangınlarına müdahale sırasında kara yolu ulaşımının olmaması gibi durumlarda İHA kullanımının yangın sürecine etkisini Giresun ili örneği ile incelemiştir. Kaşlı (2021) yaptığı çalışmada İHA'ların hangi durumlarda suç unsuru oluşturduğunu ve polisin müdahale durumlarını incelemiştir. Kara, Yumuşak, ve Eren (2022) acil yardım müdahalesinde kullanılacak İHA'ların seçiminde ÇKKV yöntemlerini (AHP, TOPSIS, PROMETHEE) kullanmışlardır. Metin ve Şentürk (2024) gerçekleştirdiği çalışmada İHA çeşitlerinden biri olan hexakopteri ele almış ve hexakopterin ana gövde parçalarının statik analizini yapmıştır.

Mevcut durumda üzerinde çalışılan KBRN olaylarında İHA seçimi konusunda da literatürde sınırlı sayıda araştırma örneğine rastlanmaktadır. Sarıaslan (2024) makalesinde KBRN tehditlerinin havadan izlenmesi ve İHA'ların kimyasal kontaminasyon durumlarında zehirli gaz ve tozların yayılmasını izleme performansı üzerinde durmuş ve havayolu endüstrisi hakkında geniş bilgilere yer vermiştir. Bu çalışmada ise, önceki araştırmadan farklı olarak ÇKKV yöntemlerinden Pisagor Bulanık AHP ve Pisagor Bulanık TOPSIS yöntemleri tercih edilmiştir. Belirlenen kriterler göz önüne alınarak altı çeşit İHA'dan hangisinin KBRN olaylarında kullanımının en doğru olacağı sonucu araştırılmıştır. Literatürde KBRN alanında İHA seçiminde kararsızlık ve belirsizlik durumlarını değerlendiren bir çalışmaya rastlanmamaktadır. Gerçekleştirilen çalışmanın; karar verme süreçlerindeki belirsizlik ve kararsızlık problemlerine, söz konusu durumları da değerlendiren bulanık yöntemler tercih edilmesi yönüyle özgün olması ve literatüre kazandırılması amaçlanmaktadır.

3. YÖNTEM

3.1. Pisagor Bulanık AHP Yöntemi

Bu çalışmada kullanılan karar verme yöntemlerinden biri, dilsel ifadeleri daha geniş bir skala kullanarak değerlendirerek karar vericilere daha geniş bir değerlendirme imkânı sunan Pisagor Bulanık AHP yöntemidir (Erol, Özcan, & Eren, 2021). Karar vericilerin değerlendirmeleri çoğu zaman belirsizlik içerdiğinden, AHP yöntemi bulanık mantıkla genişletilmiştir. Bu bağlamda, bulanık kümelerin bir uzantısı olan Pisagor Bulanık Kümeler aitlik ve ait olmama derecelerini daha geniş bir değer aralığında ifade edebilmesine olanak tanımaktadır. Bu yöntemde bir elemana aitlik ve ait olmama derecelerinin karelerinin toplamı 1'i geçmeyecek şekilde tanımlanır ($\mu^2+\nu^2\leq1$); bu da klasik bulanık ve sezgisel bulanık kümelere göre daha fazla esneklik sunar (Yager, 2013). Pisagor Bulanık AHP yöntemi, PFS tabanlı değerlendirmelerle AHP'nin ikili karşılaştırma yapısını birleştirerek, kriter ağırlıklarını daha güvenilir biçimde

belirlemeyi amaçlamaktadır (Yıldız, Ayyıldız, Gümüş, & Özkan, 2019). Aşağıda Pisagor Bulanık AHP yönteminin adımlarına yer verilmiştir.

Adım 1. Dilsel değişkenlere dayalı ikili karşılaştırma matrisi $A = (r_{ik})_{m\times m}$ oluşturulur. Bu matris, karar vericilerin her bir kriteri diğerlerine göre ne derece önemli gördüğünü gösteren dilsel ifadelerle doldurulur. Bu ifadeler daha sonra Pisagor bulanık sayılara dönüştürülür.

Adım 2. Eşitlik 1 ve 2 kullanılarak farklar matrisi $D = (d_{ik})_{m\times m}$ oluşturulur. Bu adımda üyelik (μ) ve üye olmama (ν) dereceleri arasındaki farklara dayalı bir hesaplama yapılır. Bu farklar, karar vericiler arasındaki görüş ayrılıklarını sayısal biçimde ifade etmeye olanak tanır.

$$d_{ik_L} = {M_{ik_L}}^2 - {V_{ik_U}}^2, \tag{1}$$

$$d_{ik_U} = {M_{ik_U}}^2 - {V_{ik_L}}^2. \tag{2}$$

Adım 3. $S = (s_{ik})_{m\times m}$ çarpımsal matrisi Eşitlik 3 ve 4 kullanılarak hesaplanır. Bu matris, her kriter çiftinin göreli önemini temsil eder ve sistematik bir bütünlük sağlar.

$$S_{ik_L} = \sqrt{1000^{d_L}}, \tag{3}$$

$$S_{ik_U} = \sqrt{1000^{d_U}}. \tag{4}$$

Adım 4. Tereddüt dereceleri $H = (h_{ik})_{m\times m}$, Eşitlik 5 kullanılarak belirlenir.

$$h_{ik} = 1 - \left({M_{ik_U}}^2 - {V_{ik_L}}^2\right) - \left({V_{ik_U}}^2 - {V_{ik_L}}^2\right). \tag{5}$$

Adım 5. Eşitlik 6 ile normalize edilmemiş ağırlıklar $T = (t_{ik})_{m\times m}$ hesaplanır.

$$t_{ik} = \binom{S_{ik_L} + S_{ik_U}}{2} h_{ik}. \tag{6}$$

Adım 6. Kriter ağırlıkları $\mathrm{W_i}$ eşitlik 7 kullanılarak elde edilir. Bu değer, karar sürecindeki güven düzeyinin analizinde kritik öneme sahiptir.

$$\mathrm{W_i} = \frac{\sum_{k=1}^{m} t_{ik}}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m} t_{ik}}. \tag{7}$$

3.2. Pisagor Bulanık TOPSIS Yöntemi

Pisagor Bulanık TOPSIS yöntemi, klasik TOPSIS yönteminin belirsizlik içeren karar ortamlarına uyarlanmış bir versiyonudur. Bu yöntem, karar vericilerin değerlendirmelerini Pisagor Bulanık Kümeler ile ifade ederek, aitlik ve ait olmama derecelerinin karelerinin toplamının 1'i geçmemesi ($\mu^2+\nu^2\leq 1$) şartına dayanır (Yager, 2013). Böylece, karar vericilerin sübjektif yargıları daha esnek biçimde modellenebilir. Yöntemde, alternatiflerin pozitif ve negatif ideal çözümlere olan uzaklıkları bulanıklaştırılmış biçimde hesaplanarak sıralama yapılır (Tezcan, 2024). Özellikle çok kriterli ve belirsizlik içeren karar problemlerinde yöntemin etkili sonuçlar verdiği gösterilmiştir (Ölç & Göçer, 2024). Aşağıda Pisagor Bulanık TOPSIS yönteminin adımlarına yer verilmiştir.

Adım 1. Karar vericiler tarafından kriterlerin ve alternatiflerin değerlendirilir ve her alternatif, her bir kritere göre dilsel değişkenlerle ifade edilir ve bu ifadeler Pisagor bulanık sayılara dönüştürülür.

Adım 2. Eşitlik 8 ile standart karar matrisi elde edilir. Pisagor bulanık karar matrisi, alternatiflerin her bir kriter için sahip olduğu performansı sayısal hale getirir.

$$X = \left[X_{ij}\right]_{n\times m}. \tag{8}$$

Adım 3. Pisagor bulanık pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözümün hesaplanması eşitlik 9 ve 10 kullanılarak elde edilmektedir. Pozitif ideal çözüm, her kriter için en iyi performans değerini; negatif ideal çözüm ise en kötü performans değerini temsil eder.

$$\mathrm{A^+} = \left(\max(\mu_{ij}), \min(\nu_{ij})\right). \tag{9}$$

Adım 4. Alternatiflerin Pisagor bulanık pozitif ideal ve negatif ideal çözümden uzaklıklarının hesaplanması kısmı için; ideal çözümlere uzaklıklar eşitlik 11 ve 12 ile hesaplanmaktadır.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left[\left(\mu_{ij} - \mu_j^+\right)^2\right]} + \sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left[\left(\nu_{ij} - \nu_j^+\right)\right]^2}, \tag{10}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} [(\mu_{ij} - \mu_j^-)\ ]^2} + \sqrt{\sum_{j=1}^{m} [(\nu_{ij} - \nu_j^-)]^2}\ . \quad (11)$$

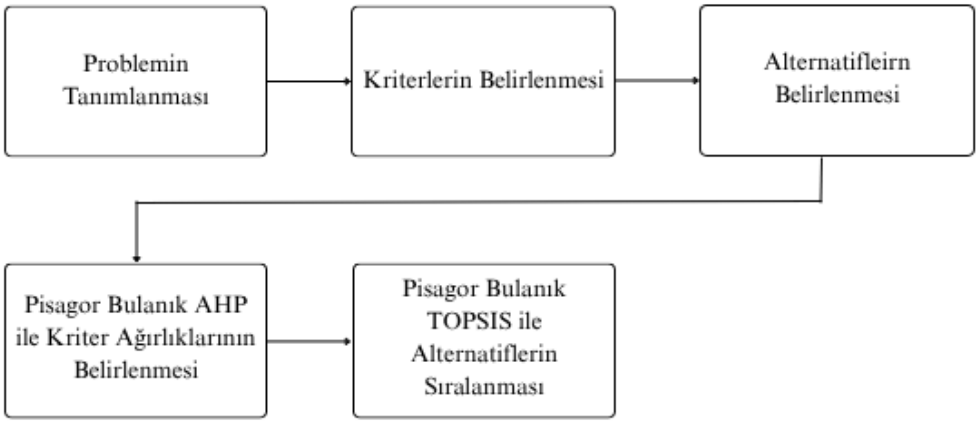
Adım 5. Göreli yakınlık indeksi (Ξ), eşitlik (13) kullanılarak belirlenir. Bu indeks, her bir alternatifin pozitif ideal çözüme ne kadar yakın olduğunu gösterir. İndeks değeri ne kadar büyükse, alternatif o kadar tercih edilebilir kabul edilir.

$$\xi_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}. \quad (12)$$

Adım 6. Algoritma, alternatiflerin en iyi sırasını belirleyerek sonlandırılır.

4. BULGULAR

Bu çalışmada karar verme süreci için Pisagor Bulanık AHP ve Pisagor Bulanık TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Bu bölümde her iki yöntemin uygulama adımları detaylı şekilde açıklanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Uygulama Akış Şeması

4.1. Problem Tanımı

KBRN tehditlerinin söz konusu olduğu sahalarda kullanılacak insansız hava araçlarının, çevresel koşulları uzaktan algılayabilme, sahada keşif yapabilme ve genel duruma ilişkin bilgi sağlayabilme yeteneklerine sahip olması kritik bir gerekliliktir. Bu bağlamda, farklı teknik ve operasyonel ölçütlerin bir arada değerlendirilmesini gerektiren sistem seçimi, çok ölçütlü ve belirsizlik içeren bir karar verme sorunu olarak ortaya çıkmaktadır. Değerlendirme sürecinde dikkate alınması gereken unsurlar arasında görev süresi, sistem taşınabilirliği, sensör donanımıyla uyumluluk ve çevresel dayanıklılık gibi çeşitli faktörler yer almaktadır. Karar süreci, değerlendirmeye katılan uzmanların öznel yargılarını da içerebilecek şekilde yapılandırılmıştır. Nihai amaç, KBRN koşullarında en etkin şekilde görev yapabilecek hava aracını çok ölçütlü bir değerlendirme yaklaşımıyla belirlemektir.

4.2. Kriterlerin Belirlenmesi

KBRN İHA seçim problemin de kullanılmak üzere literatür taramalarında 10 adet kriter elde edilmiştir. Belirlenen kriterler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. KBRN İHA Kriterleri

Yazar	Kriterler
(Sakalp, D., & Akçay, 2023)	Termal Kamera (K1)
	Menzil (K2)
	Uçuş Süresi (K3)
(Lafçı, Taş, & Cantürk, 2022)	Gece Görüşü (K4)
	Hız (K5)
	Engel Tanıma (K6)

(Tekinay & Bozoğlu Batı, 2022)	Su Geçirmezlik (K7)
	Dayanıklılık (K8)
	Maliyet (K9)
	Ağırlık (K10)

KBRN İHA seçimi için kriterlerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

• K1-Termal Kamera: KBRN sahalarında, özellikle duman, sis veya düşük ışık koşullarında, termal kameralar nesnelerin ısı yayılımını algılayarak görünürlüğü artırır. Bu sayede, insan gözünün algılayamadığı sıcaklık farkları tespit edilebilir.

• K2-Menzil: KBRN olaylarında, tehlikeli bölgelere insan müdahalesi olmadan ulaşmak için İHA'ların uzun menzilli olması hayati öneme sahiptir. Bu, operatörlerin güvenli mesafeden durumu değerlendirmesine olanak tanır.

• K3-Uçuş Süresi: Geniş alanların izlenmesi gereken KBRN olaylarında, uzun uçuş süresine sahip İHA'lar daha fazla veri toplayarak durumsal farkındalığı artırır.

• K4-Gece Görüşü: KBRN olaylarının gece saatlerinde de meydana gelebileceği düşünülerek, karanlık ortamlarda görüntü alabilme yeteneği görev başarısını artırır.

• K5-Hız: KBRN olaylarında zaman kritik olduğundan, olay yerine hızlı intikal edebilen İHA'lar olayın erken teşhisi ve müdahalesinde avantaj sağlar.

• K6-Engel Tanıma: Karmaşık ve tehlikeli yapılara sahip KBRN sahalarında, İHA'nın otomatik olarak engelleri tanıyıp çarpışmadan kaçınması güvenli operasyon için zorunludur.

• K7-Su Geçirmezlik: Kimyasal sıvılar, yağmur veya nemli ortamlar gibi koşullar altında çalışabilen su geçirmez İHA'lar, KBRN sahalarında daha güvenli kullanım sunar.

• K8-Dayanıklılık: KBRN ortamları genellikle zorlu çevresel koşullar içerdiğinden, İHA'ların fiziksel darbelere, titreşime ve çevresel zorluklara dayanıklı olması gerekir. Bu, cihazın görev sırasında güvenilirliğini artırır.

• K9-Maliyet: Sınırlı bütçelerle yürütülen acil müdahale operasyonlarında, maliyet etkin çözümler sunan İHA sistemlerinin tercih edilmesi sürdürülebilirlik açısından önemlidir.

• K10-Ağırlık**:** Hafif yapılı İHA'lar daha az enerji tüketerek daha uzun süre havada kalabilir, bu da KBRN ortamlarında görev süresini ve verimliliği artırır.

4.3. Alternatiflerin Belirlenmesi

KBRN İHA seçim problemin de kullanılmak üzere literatür taramalarında 6 adet alternatif elde edilmiştir. Tablo 2'de belirlenen alternatifler gösterilmiştir.

Tablo 2. KBRN İHA Alternatifleri

Kaynaklar	**Alternatifler**
(Mueller & Michels, 2019)	VTOL (A1)
(Ghirardelli, ve diğerleri, 2023)	Multikopter (A2)
(Ryll, Muscio, & Siegwart, 2018)	Hexakopter (A3)
(Hassanalian & Abdelkefi, 2017)	Sabit Kanat (A4)
(Şahin & Oktay, 2019)	Trikopter (A5)
(Altınörs & Kuzu, 2021)	Kuadkopter (A6)

KBRN İHA seçimi için alternatiflerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

• A1-VTOL: VTOL sistemleri hem sabit kanatlı hem de döner kanatlı platformların avantajlarını birleştiren hibrit yapılı araçlardır. Kalkış ve iniş için piste ihtiyaç duymamaları, dar alanlarda operasyon kabiliyeti sağlamaktadır. Uzun menzilli görevlerde tercih edilirler.

• A2-Multikopter: Dört veya daha fazla motora sahip olan bu İHA'lar, dikey kalkış ve iniş yapabilen, yüksek manevra kabiliyetine sahip sistemlerdir. Genellikle kısa mesafeli görevler için uygundur. Basit yapıları ve düşük maliyetleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

• A3-Hexakopter: Altı rotora sahip bu İHA'lar, multikopter yapısının gelişmiş bir versiyonudur. Daha yüksek taşıma kapasitesi, yedekli motor yapısı sayesinde artan güvenilirlik ve daha stabil uçuş özellikleri ile özellikle endüstriyel ve askeri uygulamalarda tercih edilirler.

• A4-Sabit Kanatlı: Sabit kanatlı İHA'lar, daha uzun süreli ve yüksek irtifada uçuş yapabilen, enerji verimliliği yüksek sistemlerdir. Ancak dikey kalkış ve iniş yapamadıkları için piste veya fırlatma sistemine ihtiyaç duyarlar. Geniş alan keşfi ve haritalama gibi görevlerde kullanılır.

• A5-Trikopter: Üç rotorlu sistemlerden oluşan trikopterler, hafif yapılarıyla dikkat çeker. Diğer multikopter türlerine kıyasla daha düşük enerji tüketimi sunabilirler; ancak denge ve stabilite açısından daha karmaşık kontrol sistemlerine ihtiyaç duyarlar.

• A6-Kuadkopter: Dört rotorlu döner kanatlı bir sistem olan kuadkopter, özellikle düşük irtifada hassas manevra gerektiren görevlerde yaygındır. Kolay kontrol edilebilirliği, düşük maliyeti ve modüler yapısı ile sivil ve askeri birçok alanda tercih edilmektedir.

4.4. Pisagor Bulanık AHP ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

KBRN olaylarında İHA seçiminde etkili olan kriterlerin her birinin önemi Pisagor Bulanık AHP yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Ana kriterler hakkında sözlü ifadeleri bulanık sayılarla belirtebilmek için Tablo 3'te belirtilen dilsel değişkenler kullanılmıştır.

Tablo 3. Dilsel Değişkenlerin Tanımı ve Pisagor Bulanık Ölçekleri

Dilsel Değişkenler	Aralıklı Pisagor Bulanık Sayılar			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U
Kesinlikle Düşük Önemli (KD)	0,0000	0,0000	0,9000	1,0000
Çok Düşük Önemli (ÇD)	0,1000	0,2000	0,8000	0,9000
Düşük Önemli (D)	0,2000	0,3500	0,6500	0,8000
Ortalamanın Altında Önemli (OA)	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500
Eşit (E)	0,1965	0,1965	0,1965	0,1965
Ortalama Önemli (O)	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500
Ortalamanın Üstünde Önemli (OÜ)	0,5500	0,6500	0,3500	0,4500
Yüksek Önemli (Y)	0,6500	0,8000	0,2000	0,3500
Çok Yüksek Önemli (ÇY)	0,8000	0,9000	0,1000	0,2000
Kesinlikle Yüksek Önemli (KY)	0,9000	1,0000	0,0000	0,0000

Bu adımda, karar kriterleri arasındaki göreceli önem derecelerinin belirlenmesi için ikili karşılaştırmalar yapılmıştır. Uzman görüşleri doğrultusunda her kriter çifti, üçgen bulanık sayılar kullanılarak karşılaştırılmıştır. Böylece, karar vericilerin belirsizlik ve sübjektif yargıları bulanık mantık çerçevesinde modele dahil edilmiştir. Tablo 4'te elde edilen bulanık ikili karşılaştırma matrisi sunulmaktadır.

Tablo 4. Kriterlerin İkili Kıyaslama Matrisi

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
K1	E	O	O	Y	OÜ	Y	Y	ÇY	ÇY	ÇY
K2	O	E	O	O	OÜ	OÜ	Y	Y	ÇY	ÇY
K3	O	O	E	O	O	OÜ	OÜ	Y	Y	ÇY
K4	D	O	O	E	O	O	OÜ	OÜ	Y	Y
K5	OA	OA	O	O	E	O	O	OÜ	OÜ	Y
K6	D	OA	OA	O	O	E	O	O	OÜ	OÜ
K7	D	D	OA	OA	O	O	E	O	O	OÜ
K8	ÇD	D	D	OA	OA	D	D	E	O	O
K9	ÇD	ÇD	D	D	OA	OA	O	O	E	O
K10	ÇD	ÇD	ÇD	D	D	OA	OA	O	O	E

Bulanık ikili karşılaştırma matrisi kullanılarak her kriter için bulanık ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Bu aşamada, karar kriterleri arasındaki öncelik sıralaması netleşmeye başlamıştır. Elde edilen bulanık ağırlıklar Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Kriter Ağırlıkları

Kriterler	Kriter Ağırlıkları
Termal Kamera	0,28462
Menzil	0,19339
Uçuş Süresi	0,15411
Gece Görüşü	0,09254
Hız	0,07960
Engel Tanıma	0,05805
Su Geçirmezlik	0,04660
Dayanıklılık	0,02961
Maliyet	0,03281
Ağırlık	0,02867

Tablo 5'te elde edilen ağırlıklar sonucunda en yüksek kriter ağırlığı 0,28462 ile "Termal Kamera" seçilmiştir. Bu faktör İHA çeşitleri için en önemli kriter olarak seçilmiştir. İkinci olarak 0,19339 ile "Menzil" ve üçüncü sırada 0,15411 ile "Uçuş süresi" seçilmiştir. Kullanılan yöntem sonucunda ise 0,02867 ile "Ağırlık" en düşük öneme sahip kriter seçilmiştir. KBRN olaylarında kullanılan İHA çeşitlerinde özellikle aranan kriterlerin önem sıralaması bu yöntemle gözlemlenmiştir.

4.5. Pisagor Bulanık TOPSIS ile Alternatiflerin Sıralanması

Alternatiflerin her bir kriter açısından değerlendirilmesi amacıyla bulanık karar matrisi oluşturulmuştur. Bu matriste her alternatifin, ilgili kritere göre performansı üçgen bulanık sayılarla ifade edilmiştir. Tablo 6'da bulanık sayıların dilsel değişkenleri verilmiştir (Güven, Pınarbaşı, Alakaş, & Eren, 2024).

Tablo 6. Alternatiflerin Değerlendirilmesi İçin Dilsel Ölçek

Dilsel Ölçekler	m	v
Aşırı Düşük (AD)	0,10	0,99
Çok Düşük (ÇD)	0,10	0,97
Düşük (D)	0,25	0,92
Ortalamadan Düşük (OD)	0,40	0,87
Ortalama (O)	0,50	0,80
Ortalamadan Yüksek (OY)	0,60	0,71
Yüksek (Y)	0,70	0,60
Çok Yüksek (ÇY)	0,80	0,44
Aşırı Yüksek (AY)	0,10	0,00

İHA alternatiflerinin kriterlere göre bulanık sayılarla değerlendirilmesi sonucu karar matrisi Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. İHA Alternatiflerine Ait Bulanık Karar Matrisi

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1	ÇD	AD	D	ÇD	OD	ÇD	ÇD	D	ÇY	ÇY
A2	ÇD	D	O	D	OD	ÇY	ÇD	O	Y	Y
A3	ÇY	D	Y	Y	O	Y	ÇY	OY	O	O
A4	ÇY	OD	Y	Y	O	Y	Y	Y	Y	Y
A5	ÇD	ÇY	AY	OD	AY	ÇD	ÇY	ÇY	D	D
A6	ÇY	O	ÇY	ÇY	ÇY	ÇY	Y	ÇY	AD	AD

Her alternatifin ideal çözüme yakınlık derecesi kullanılarak tercih skoru hesaplanmıştır. En yüksek tercih skoruna sahip alternatif, en uygun alternatif olarak belirlenmiştir. Alternatiflerin tercih skorları ve sıralamaları Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Alternatiflerin Sıralanması

Sıralama	Alternatifler	ξ(xi)
1	VTOL	0
2	Multikopter	-0,54291
3	Hexakopter	-0,81007
4	Sabit Kanatlı	-3,42938
5	Kuadkopter	-3,48664
6	Trikopter	-4,34116

Yöntem sonucunda KBRN alanında kullanılmaya en uygun İHA "VTOL" olarak belirlenmiş olup, bu sonuç literatürde VTOL platformlarının hem sabit kanatlı sistemlerin menzil ve dayanım avantajını hem de çok rotorlu sistemlerin dikey kalkış-iniş ve yüksek manevra kabiliyetini bir arada sunması nedeniyle öne çıkarıldığını doğrulamaktadır; ancak bazı çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada operasyonel esneklik ve görev sürekliliği kriterlerinin daha yüksek ağırlıklandırılması, "Multikopter" ve benzeri platformların daha geri sıralarda yer almasına neden olmuştur. İkinci sırada "Multikopter" seçilmiştir. Daha sonra ise sırasıyla "Hexakopter", "Sabit Kanatlı", "Kuadkopter" ve "Trikopter" yer almaktadır.

4.6. Sonuçların Değerlendirilmesi

Yapılan analizler sonucunda, KBRN operasyonları için en uygun insansız hava aracı alternatifinin "VTOL" sistemleri olduğu belirlenmiştir. Bu sonucun ortaya çıkmasında, VTOL platformlarının sabit kanatlı ve çok rotorlu sistemlerin avantajlarını bütünleşik olarak sunabilmesi belirleyici olmuştur. Özellikle KBRN sahalarında uygun iniş-kalkış alanlarının sınırlı olması, dikey iniş-kalkış kabiliyeti sayesinde VTOL sistemlerini operasyonel açıdan daha esnek ve uygulanabilir hale getirmektedir. Bununla birlikte, yüksek menzil ve uzun havada kalış süresi sayesinde geniş alanların izlenebilmesi ve kesintisiz veri akışının sağlanabilmesi, bu sistemlerin tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır.

Elde edilen bu bulgular, literatürde KBRN ve afet yönetimi bağlamında İHA kullanımına ilişkin çalışmalarla örtüşmekte olup, özellikle çok amaçlı ve otonom sistemlerin tercih edilmesi gerektiğine yönelik yaklaşımları desteklemektedir. Bu yönüyle çalışma, VTOL platformlarının yalnızca operasyonel avantajlarını değil, aynı zamanda çok kriterli karar verme bağlamında sistematik olarak değerlendirilmesinin önemini ortaya koyarak literatüre katkı sağlamaktadır.

Bununla birlikte, mevcut literatürde İHA seçiminde genellikle teknik performans kriterlerine odaklanıldığı, ancak KBRN gibi yüksek belirsizlik içeren ortamlarda sensör entegrasyonu, gerçek zamanlı veri aktarımı ve otonom karar verme kabiliyeti gibi unsurların yeterince bütüncül ele alınmadığı görülmektedir. Bu çalışma, söz konusu eksikliği giderme yönünde bir adım olarak değerlendirilebilir.

Gelecek çalışmalar açısından, farklı KBRN senaryolarına göre dinamik kriter ağırlıklarının belirlenmesi, gerçek saha verileriyle modelin doğrulanması ve sürü (swarm) İHA sistemlerinin değerlendirmeye dahil edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, yapay zekâ destekli otonom karar verme mekanizmalarının entegrasyonu ile daha etkin ve hızlı müdahale süreçlerinin geliştirilmesi mümkün olacaktır. Bu doğrultuda, çalışmanın hem uygulayıcılara hem de akademik literatüre yön gösterici nitelikte olduğu düşünülmektedir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, KBRN kriz senaryolarında görev yapacak en uygun İHA platformunun seçimi problemi, karar sürecindeki yüksek belirsizliği ve uzman görüşlerindeki muğlaklığı dikkate alan Pisagor Bulanık AHP ve TOPSIS tabanlı hibrit bir model ile analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, yalnızca teknik performans açısından değil, aynı zamanda operasyonel gereksinimler ve saha koşulları bağlamında da anlamlı ve uygulanabilir sonuçlar sunmaktadır.

Yapılan ağırlıklandırma analizleri sonucunda, KBRN müdahale süreçlerinde en kritik parametrenin "termal kamera" olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, literatürde genel amaçlı İHA seçiminde sıklıkla öne çıkan maliyet ve batarya ömrü gibi kriterlerden farklılaşmaktadır. Dolayısıyla çalışma, KBRN gibi yüksek risk ve düşük görünürlük içeren ortamlarda algılama ve tespit kabiliyetinin öncelikli olduğunu ortaya koyarak literatüre özgün bir katkı

sağlamaktadır. Bu yönüyle elde edilen sonuçlar, sektörel ihtiyaçlara duyarlı bir kriter önceliklendirmesi sunmakta ve mevcut çalışmaların genelleştirilmiş yaklaşımına alternatif bir bakış açısı getirmektedir.

Alternatiflerin sıralanmasında ilk sırada yer alan VTOL tipi İHA sistemleri, hem döner kanatlı araçların dikey iniş-kalkış esnekliğini hem de sabit kanatlı araçların uzun menzil avantajını bir araya getirmesi nedeniyle en uygun çözüm olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, acil durum ve afet yönetimi literatüründe çok amaçlı ve esnek platformların önemine vurgu yapan çalışmalarla örtüşmektedir. Ancak bu çalışma, söz konusu avantajları KBRN bağlamında sistematik bir karar modeli ile ortaya koyması bakımından literatürdeki çalışmalardan ayrışmaktadır.

Metodolojik açıdan değerlendirildiğinde, Pisagor Bulanık AHP ve TOPSIS yöntemlerinin entegre bir şekilde kullanılması, özellikle uzman görüşlerindeki belirsizliğin ve kararsızlık durumlarının modele dahil edilmesine imkân tanımıştır. Bu durum, klasik çok kriterli karar verme yaklaşımlarına kıyasla daha gerçekçi ve hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla çalışma, yalnızca uygulama alanı açısından değil, kullanılan yöntemsel yaklaşım bakımından da literatüre katkı sunmaktadır.

Bununla birlikte, mevcut literatürde İHA seçim problemlerinin çoğunlukla statik kriterler üzerinden değerlendirildiği, oysa KBRN gibi dinamik ve yüksek belirsizlik içeren ortamlarda karar parametrelerinin zamana ve senaryoya bağlı olarak değişkenlik gösterebileceği görülmektedir. Bu çalışma, söz konusu boşluğa dikkat çekerek daha esnek ve senaryo bazlı karar modellerinin geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Araştırmanın temel kısıtı, kriter ağırlıklarının sınırlı sayıda uzman görüşüne dayanmasıdır. Bu durum, sonuçların genellenebilirliğini kısmen sınırlamaktadır. Gelecek çalışmalarda, daha geniş ve disiplinler arası uzman gruplarıyla analizlerin tekrarlanması, farklı bulanık küme yaklaşımlarının (örneğin küresel bulanık kümeler veya sezgisel bulanık kümeler) modele entegre edilmesi ve gerçek saha verileri ile doğrulama yapılması önerilmektedir. Ayrıca, sürü İHA sistemleri, yapay zekâ destekli otonom karar verme mekanizmaları ve gerçek zamanlı veri füzyonu gibi gelişmekte olan teknolojilerin modele dahil edilmesi hem literatüre hem de uygulamaya daha kapsamlı katkılar sunacaktır.

ETİK BEYAN & GENEL AÇIKLAMALAR

Bu makale araştırma ve yayın etiği standartlarını karşılamaktadır.

YAPAY ZEKÂ KULLANIM BEYANI

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde ChatGPT, yalnızca dil bilgisi, yazım, noktalama ve/veya dilsel akıcılığın iyileştirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Yapay zekâ çalışmanın bilimsel içeriğinin oluşturulması amacıyla kullanılmamıştır. Yapay zekâ tarafından önerilen tüm düzenlemeler yazar(lar) tarafından gözden geçirilmiş ve doğrulanmıştır.

YAZARLARIN KATKILARI

Fikir/Kavram: Y.B. Sanlı, E. Güven ve T. Eren; Tasarım: M. Özdemir, A.U. Uzunköprü, Z. Akbaş; Veri Toplama/İşleme: M. Özdemir, A.U. Uzunköprü, Z. Akbaş; Analiz/Yorum: Y.B. Sanlı, E. Güven ve T. Eren. Tüm yazarlar makalenin son halini okumuştur ve onaylamıştır.

FON

Söz konusu değildir.

VERİ VE MALZEME MÜSAİTLİĞİ

Söz konusu değildir.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışmalarının bulunmadığını belirtmektedir.

KAYNAKÇA

Altınörs, A., & Kuzu, F. (2021). Bir quadcopterin PID, adaptif ve LQR kontrol yöntemleri kullanılarak yapılan dinamik analizi. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, *5*(2), s. 65-74. https://doi.org/10.46460/ijiea.929552

Baş, K., & Karakurt, S. (2024). Decontamination solutions and techniques for chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN) incidents. *Savunma Bilimleri Dergisi*, *20*(1), s. 29-48. https://doi.org/10.17134/khosbd.1360355

Çalık, A. (2021). Bulanık çok kriterli karar verme yöntemleri ile yeşil tedarik zincirindeki risklerin karşılaştırılması. *Journal of Turkish Operations Management*, *5*(2), s. 822-838. https://izlik.org/JA53LM65CS

Dehshiri, S. C. (2026). Sustainable supplier selection based on a comparative decision-making approach under uncertainty. *Spectrum of Operational Research (SOR)*, *3*(1), 238-251. https://doi.org/10.31181/sor31202644

Erol, E., Özcan, E., & Eren, T. (2021). Elektrik üretim santrallarında iş güvenliği uzmanı seçiminde hibrit bir karar modeli. *Journal of Turkish Operations Management*, *1*(5), s. 615-629. https://izlik.org/JA86RW64TY

Ghirardelli, M., Kral, S. T., Müller, N. C., Hann, R., Cheynet, E., & Reuder, J. (2023). Flow structure around a multicopter drone: A computational fluid dynamics analysis for sensor placement considerations. *Drones*, *7*(7), s. 467. https://doi.org/10.3390/drones7070467

Ghorbani, M., & Ramezanian, R. (2020). Integration of carrier selection and supplier selection problem in humanitarian logistics. *Computers & Industrial Engineering*, 144. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106473

Güngör, M. (2023). İnsansız hava araçlarının (İHA) arkeolojik alanlardaki kullanımının incelenmesi. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, *5*(1), s. 37-42. https://doi.org/10.51534/tiha.1150512

Güven, E., Pınarbaşı, M., Alakaş, H. M., & Eren, T. (2024). Organize sanayi bölgelerinin NATECH riskine göre değerlendirilmesi: Kocaeli ili için bir örnek. *ESTU Resilience*, *8*(1), s. 13-30. https://doi.org/10.32569/resilience.1379980

Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, *91*, s. 99-131. https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003

Kahraman, C. (2008). Multi-criteria decision making methods and fuzzy sets. In *Springer Optimization and Its Applications* (pp. 1–18). Springer.

Kara, M., Yumuşak, R., & Eren, T. (2022). Acil yardım müdahalesi yapan birimler için çok ölçütlü karar verme yöntemleri ile kargo drone seçimi. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, *4*(2), s. 38-45. https://doi.org/10.51534/tiha.1148876

Kara, M., Yumuşak, R., & Eren, T. (2023). Anız yangınlarına müdahale için itfaiye drone seçimi: Giresun örneği. *Journal of Aviation Research*, *5*(1), 1-15. https://doi.org/10.51785/jar.1180613

Kaşlı, E. (2021). Suçlu drone saldırılarına karşı polisin zor kullanma yetkisi. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, *3*(2), s. 49-54. https://doi.org/10.51534/tiha.981025

Kıllıoğlu, M. E. (2023). İnsansız hava araçları (İHA) ve Türkiye. *Turkish Journal of War Studies*, *4*(2), s. 114-134. https://doi.org/10.52792/tws.1336610

Koca, G., & Yıldırım, S. (2020). Bulanık çok kriterli karar verme çalışmalarına yönelik bibliyometrik analiz: 2005-2019 dönemi. *Bilecik Şeyh Edebali University Journal of Social Science*, *5*(2), s. 257-272. https://doi.org/10.33905/bseusbed.787164

Küçükçelebi, A., & Yaldız, E. (2020). Kablolu İHA sistemleri ve uygulamaları. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* (Özel Sayı), s. 154-159. https://doi.org/10.31590/ejosat.802734

Lafçı, B., Taş, E. G., & Ölç, N. Cantürk (2022). İnsansız hava araçlarının ve insansız hava aracı sistemlerinin adli bilimler açısından önemi. *Güvenlik Bilimleri Dergisi*, *11*(2), s. 305-332. https://doi.org/10.28956/gbd.1212382

Mert, A., & Çetinyokuş, S. (2020). Denizyolu tehlikeli madde taşımacılığına yönelik kazaların analizi. *Journal of Humanities and Tourism Research*, *10*(1), 41-54. https://izlik.org/JA65TP23LY

Metin, M., & Şentürk, K. (2024). Static analysis of main body parts designed using carbon fiber material for hexacopter structure drone. *The Black Sea Journal of Sciences*, *14*(4), s. 1758-1781. https://doi.org/10.31466/kfbd.1474166

Mueller, T., & Michels, J. (2019). Design and control of a VTOL unmanned aerial vehicle with transition flight capabilities. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, *94*(1), s. 121-137.

Nemeth, C., Sedehi, J., Rule, G., Pietrantonia, J. D., Laufersweiler, D., Keeney, N., & Clark, R. (2024). Decision support for CBRN avoid and protect missions. *Cognition, Technology & Work*, s. 375-384. https://doi.org/10.1007/s10111-024-00767-5

Ölç, Y., & Göçer, F. (2024). Pisagor bulanık küme ortamında yenilenebilir enerji kaynağı seçimi. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, *6*(2), s. 96-115. https://doi.org/10.46740/alku.1420828

Park, Y., Park, S., Lee, J., Jang, J., Jeong, H., Shin, M., ... Kang, K. (2026). Rapid detection of hazardous chemical leaks in industrial facilities using a UAV–IMS system: Optimization of flight parameters for emergency response. *Process Safety and Environmental Protection*, 210. https://doi.org/10.1016/j.psep.2026.108691

Polat, G. E. (2022). Distribution centre location selection for disaster logistics with integrated goal programming-AHP based TOPSIS method at the city level. *Afet ve Risk Dergisi*, *5*(1), 282-296. https://doi.org/10.35341/afet.1071343

Ryll, M., Muscio, G., & Siegwart, R. (2018). Modeling and control of a quadrotor UAV with tilting propellers. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *3*(2), s. 993-1000. https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6225129

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, *1*(1), s. 83-98. https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590

Sakalp, D., & Akçay, Ö. (2023). Bina zarfının termal görüntüler ile fotogrametrik modellenmesi. *Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi*, *4*(1), 1-16. https://doi.org/10.48123/rsgis.1166498

Salam, M. A., & Khan, S. A. (2020). Lessons from the humanitarian disaster logistics management: A case study of the earthquake in Haiti. *Benchmarking: An International Journal*, *27*(4), 1455–1473. https://doi.org/10.1108/BIJ-04-2019-0165

Sanlı, Y. B., Güven, E., Tokuştepe, L., Özbek, K. O., Arslan, B., & Eren, T. (2025). Tehlikeli madde lojistiğinde güzergahların bulanık çok ölçütlü karar verme yöntemleri ile belirlenmesi: Adıyaman-Ankara örneği. *Journal of Transportation and Logistics*, *10*(2), s. 296-326. https://doi.org/10.26650/JTL.2025.1602446

Sarıaslan, H. (2024). Uçaklarda KBRN tehditleri algılama ve müdahale teknolojileri ve taşımacılıktaki yeni konseptler: Havayolu endüstrisinde risk analizi ve değerlendirmesi. *Journal of Aerospace Science and Management*, *2*(2), s. 84-97. https://izlik.org/JA89LY77LD

Schraml, S., Hubner, M., Taupe, P., Hofstätter, M., Amon, P., & Rothbacher, D. (2022). Real-time gamma radioactive source localization by data fusion of 3D-LiDAR terrain scan and radiation data from semi-autonomous UAV flights. *Sensors*, *22*(23), 9198. https://doi.org/10.3390/s22239198

Şahin, H., & Oktay, T. (2019). Özgün trikopterin özellikleri ve diğer insansız hava araçları ile karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *31*, s. 816-825. https://doi.org/10.31590/ejosat.586900

Taşcıoğlu, F., Konukbay, F., Karabacak, H., & Koluman, A. (2026). Advancements in process control methodologies for CBRN decontamination techniques: A review. *Resilience*, *9*(2), s. 357-370. https://doi.org/10.32569/resilience.1530724

Tekinay, O. N., & Bozoğlu Batı, G. (2022). Askeri alanlarda kullanılmak üzere insansız hava aracı (İHA) sistemleri seçiminde TOPSIS ve bulanık TOPSIS yönteminin kullanılması. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, *44*(1), 78-103. https://doi.org/10.14780/muiibd.1135526

Tezcan, M. (2024). Pisagor bulanık kümelere entegre AHP ve TOPSIS yöntemleri ile geniş gövde yolcu uçak tipi seçimi. *Journal of Aviation Research*, *6*(1), s. 1-24. https://doi.org/10.51785/jar.1371387

Villi, O., & Yakar, M. (2022). İnsansız hava araçlarının kullanım alanları ve sensör tipleri. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, *4*(2), s. 57-61. https://doi.org/10.51534/tiha.1189263

Wu, P., Mjörnell, K., Claes, S., & Mikael, M. (2021). Machine learning in hazardous building material management: Research status and applications. *Recent Progress in Materials*. *3*(2), s. 17. https://doi.org/10.21926/rpm.2102017

Yager, R. R. (2013). Pythagorean fuzzy subsets. *Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting*, s. 57-61. https://doi.org/10.1109/IFSA-NAFIPS.2013.6608375

Yeşilay, R., & Macit, A. (2020). Dünyada ve Türkiye'de drone ekonomisi: Geleceğe yönelik beklentiler. *Beykoz Akademi Dergisi*, *8*(1), s. 239-251. https://doi.org/10.14514/byk.m.26515393.2020.8/1.239-251

Yıldız, A., Ayyıldız, E., Gümüş, A., & Özkan, C. (2019). Ülkelerin yaşam kalitelerine göre değerlendirilmesi için hibrit Pisagor bulanık AHP-TOPSIS metodolojisi: Avrupa Birliği örneği. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *17*, s. 1383-1391. https://doi.org/10.31590/ejosat.658021