KSÜ Tarım ve Doğa Derg 29 (Ek Sayı 1), 115-144, 2026
KSU J. Agric Nat 29 (Suppl 1), 115-144, 2026
https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.1800299

Küresel (Spherical) Bulanık COPRAS ile Akıllı Tarım Dronu Seçimi: Çok Kriterli Belirsiz Karar Problemi

Müslüm ÖZTÜRK[1]
[1]Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Kilis, Türkiye.
[1]https://orcid.org/0000-0003-1941-3115
✉: mozturk@kilis.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, tarımsal işletmeler için en uygun insansız hava aracı (drone) alternatifinin belirlenmesinde belirsizliğin etkisini dikkate alan bütünleşik bir karar destek modeli geliştirmektir. Bu kapsamda, karar sürecinde yer alan çok sayıda nicel ve nitel kriteri eşzamanlı olarak değerlendirebilen Küresel Bulanık tabanlı COPRAS (SFN COPRAS) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada sekiz temel değerlendirme kriteri belirlenmiş ve sekiz uzman görüşleriyle ağırlıklandırılmıştır. Uzmanların değerlendirmeleri küresel bulanık sayılar aracılığıyla modellenmiş, ardından SFN-COPRAS yöntemi kullanılarak beş farklı drone alternatifi (A1–A5) çok kriterli olarak karşılaştırılmıştır. Modelin sağlamlığını test etmek amacıyla, kriter ağırlıklarında ±30'a kadar değişim uygulanarak senaryo bazlı duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda, A2 (XAG P30) alternatifinin tüm senaryolarda en yüksek nihai skor değerine ($P_i = 1.000$) ulaşarak en uygun drone seçeneği olarak belirlenmiştir. A1 (DJI Agras T30) ($P_i = 0.9998$) ve A4 (Yuneec H520) ($P_i = 0.9997$) alternatifleri sırasıyla ikinci ve üçüncü sırada yer almış, A5 (Shark Havacılık-Yerli ilaçlama dronu (Konya)) ($P_i = 0.9944$) ve A3 (Parrot Bluegrass) ($P_i = 0.9913$) ise nispeten düşük skorları nedeniyle dördüncü ve beşinci sırada kalmıştır. Senaryo testlerinde, kriter ağırlıklarındaki değişimlerin sıralama üzerinde yalnızca sınırlı etkiler yarattığı ve yöntemin yüksek düzeyde stabil sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, SFN COPRAS yönteminin belirsizlik koşullarında sağlam (robust) ve tutarlı kararlar verebildiğini göstermiştir. Böylece SFN COPRAS yaklaşımının, tarımsal drone seçimi gibi yüksek belirsizlik içeren alanlarda karar destek mekanizması olarak etkin bir şekilde kullanılabilir olduğu görülmüştür.

Tarımsal Mekanizasyon

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi
Geliş Tarihi : 09.10.2025
Kabul Tarihi : 07.05.2026

Anahtar Kelimeler
Tarımsal drone seçimi
Küresel bulanık kümeler
COPRAS yöntemi
Çok kriterli karar verme
Duyarlilik analizi

Selection of Smart Agricultural Drones Using Spherical Fuzzy COPRAS: A Multi-Criteria Uncertain Decision-Making Problem

ABSTRACT

The aim of this study is to develop an integrated decision support model that considers uncertainty in determining the most suitable unmanned aerial vehicle (drone) alternative for agricultural enterprises. In this context, the Spherical Fuzzy-based COPRAS (SFN COPRAS) method, which enables the simultaneous evaluation of quantitative and qualitative criteria in the decision process, was used. Eight main evaluation criteria were identified and weighted based on the opinions of eight experts. The expert evaluations were modeled using spherical fuzzy numbers, and then five drone alternatives (A1–A5) were compared using the SFN-COPRAS method. To test the robustness of the model, a scenario-based sensitivity analysis was conducted by applying changes of up to ±30% in the criterion weights. The results showed that A2 (XAG P30) achieved the highest final score ($P_i = 1.0000$) in all scenarios and was identified as the most suitable drone option. A1 (DJI Agras T30) ($P_i = 0.9998$) and A4 (Yuneec H520)

Agricultural Mechanization

Research Article

Article History
Received : 09.10.2025
Accepted : 07.05.2026

Keywords
Agricultural drone selection
Spherical fuzzy sets
COPRAS method
Multi-criteria decision making
Sensitivity analysis

($P_i = 0.9997$) ranked second and third, respectively, while A5 (Shark Aviation–domestic agricultural spraying drone (Konya)) ($P_i = 0.9944$) and A3 (Parrot Bluegrass) ($P_i = 0.9913$) ranked fourth and fifth. The analysis indicated that changes in criterion weights had limited impact on the ranking and that the method produced stable results. The findings show that the SFN COPRAS method provides robust and consistent decisions under uncertainty and can be effectively used for agricultural drone selection.

Atıf İçin : Öztürk, M. (2026). Küresel (Spherical) Bulanık COPRAS ile Akıllı Tarım Dronu Seçimi: Çok Kriterli Belirsiz Karar Problemi. *KSÜ Tarım ve Doğa Derg 29* (Ek Sayı 1), 115-144. https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi. 1800299.

To Cite: Öztürk, M (2026). Selection of Smart Agricultural Drones Using Spherical Fuzzy COPRAS: A Multi-Criteria Uncertain Decision-Making Problem. *KSU J. Agric Nat 29* (Suppl 1, 115-144. https://doi.org/10.18016/ ksutarimdoga.vi. 1800299..

GİRİŞ

Tarım sektörü, verimlilik, sürdürülebilirlik ve hassas yönetim gibi unsurların giderek daha fazla önem kazandığı bir döneme girmiştir. Gelişen teknoloji ve dijital tarım uygulamaları, üretim süreçlerini optimize etme ve kaynak kullanımını etkinleştirme konusunda kritik bir rol oynamaktadır. Nitekim Ertürk ve ark. (2026), ziraat mühendisi adaylarının tarımda dijitalleşmeye yönelik tutumlarını incelemiş ve dijital tarım teknolojilerine yönelik olumlu yaklaşımın gelecekte akıllı tarım uygulamalarının yaygınlaşmasında önemli bir rol oynayacağını ortaya koymuştur. Bu durum, insansız hava araçları (tarım dronları) gibi dijital tarım teknolojilerinin seçiminde bilimsel ve sistematik karar verme yaklaşımlarına duyulan ihtiyacı daha da artırmaktadır. Bu bağlamda, akıllı dronlar tarımsal izleme, bitki sağlığı analizi, ilaçlama ve veri toplama gibi pek çok alanda uygulanmakta, üreticilere hem zaman hem de maliyet avantajı sağlamaktadır (Boz, 2025). Ancak, farklı dron modelleri, kapasite, uçuş süresi, sensör doğruluğu, bakım ve maliyet gibi çeşitli kriterlere göre değişiklik göstermektedir (İnan & Karcı, 2025). Bu durum, tarım alanındaki karar vericiler için birçok kriterli karar problemi (ÇKKV) oluşturmaktadır (Puška et al., 2025).

Geleneksel karar verme yöntemleri, kriterler arasındaki belirsizlik ve uzman görüşlerindeki farklılık gibi durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, belirsizlik ve bulanıklık kavramlarını doğrudan hesaba katabilen bulanık ÇKKV yöntemleri, özellikle tarım teknolojilerinin seçilmesinde giderek daha fazla kullanılmaktadır (Kizielewicz et al., 2025; Öztürk, 2026a). Son yıllarda literatürde, üçgen ve yamuk bulanık sayılarla yapılan çalışmalara ek olarak, küresel (spherical) bulanık sayıllale değerlendirme yaklaşımı geliştirilmiş ve karar vericilerin belirsizlikleri daha doğru yansıtılması sağlanmıştır (Özdemir, 2022). Küresel bulanık sayılar, fayda ve maliyet kriterlerini daha esnek bir şekilde modellemeye olanak tanır. Ayrıca, uzmanların farklı görüşlerini sistematik bir şekilde birleştirmeye de olanak tanır.

Küresel bulanık COPRAS (Spherical Fuzzy Complex Proportional Assessment) yöntemi, ÇKKV problemlerinde belirsizlikleri ve uzman görüşlerindeki farklılıkları etkili bir şekilde modellemek için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem, geleneksel bulanık mantık sistemlerinin ötesine geçerek, karar vericilerin belirsizliklerini dört boyutlu bir uzayda (üyelik, karşıtlık, belirsizlik ve reddetme) temsil eder. Bu sayede, alternatiflerin seçiminde daha zengin ve esnek bir değerlendirme imkânı sunmaktadır (Fan et al., 2022). Küresel bulanık sayılar, özellikle belirsiz ve çelişkili bilgilerin bulunduğu durumlarda, karar vericilerin görüşlerini daha doğru bir şekilde yansıtarak, daha güvenilir ve dengeli kararlar alınmasına olanak tanır. Bu özellik, tarım dronu seçimi gibi çok sayıda kriter ve belirsizliğin söz konusu olduğu problemlerde büyük avantaj sağlar (Gurmani et al., 2023). COPRAS yöntemi ise, alternatiflerin performanslarını karşılaştırarak en uygun seçeneği belirlemeye yönelik bir tekniktir. Küresel bulanık sayılarla entegre edildiğinde, hem fayda hem de maliyet kriterlerini dikkate alarak, karar vericilerin tercihlerini daha doğru bir şekilde modelleyebilmektedir (Gao et al., 2024).

Bu çalışmada, farklı tarım dronları için Küresel (Spherical) Bulanık COPRAS (SFN COPRAS) yöntemi kullanılarak, optimum seçim alternatiflerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada beş alternatif dron (DJI Agras T30, XAG P30, Parrot Bluegrass, Yuneec H520, Shark Tarım Dronu) değerlendirilmiştir. Değerlendirme sekiz kriter üzerinden yapılmış olup, bu kriterler batarya ömrü, taşıma kapasitesi, uçuş menzili, satın alma maliyeti, bakım/servis kolaylığı, sensör doğruluğu, çevresel etki ve bakım maliyetidir. Alternatiflerin performansları, sekiz uzman tarafından verilen puanlar doğrultusunda küresel bulanık sayılar ile ifade edilmiş ve COPRAS yöntemi ile çok kriterli sıralama yapılacaktır. Böylece bu yaklaşım, tarım sektöründe karar vericilere dron seçiminde güvenilir ve belirsizliği göz önünde bulunduran bir yöntem sunacaktır (Alamoodi et al., 2024). Bu çalışmada, tarım dronu seçimi için SFN COPRAS yönteminin kullanılması, aşağıdaki nedenlerle tercih edilmiştir:

- Belirsizliğin etkili bir şekilde modellenmesi: Tarım dronlarının performans değerlendirmelerinde uzman

görüşlerindeki belirsizlikler önemli bir rol oynamaktadır. Küresel bulanık sayılar, bu belirsizlikleri dört boyutlu bir yapıda temsil ederek, daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar.

- Çoklu kriterlerin dikkate alınması: Dron seçimi, batarya ömrü, taşıma kapasitesi, sensör doğruluğu gibi birçok kriteri içerir. SFN COPRAS yöntemi bu kriterlerin tümünü entegre bir şekilde değerlendirerek, en uygun alternatifi belirlemeye yardımcı olur.
- Uzman görüşlerinin entegre edilmesi: Bu çalışma kapsamında sekiz (8) farklı uzmandan alınan görüşler, küresel bulanık sayılarla ifade edilerek, COPRAS yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu sayede, farklı uzmanların görüşleri dengeli bir şekilde birleştirilerek, daha objektif bir değerlendirme yapılmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, tarım dronlarının seçimi sürecinde belirsizliğin etkilerini dikkate alarak, performansları objektif ve sistematik bir şekilde karşılaştırmak ve karar vericilere uygulanabilir bir model sunmaktır. Hipotez olarak, "SFN COPRAS yöntemi, farklı tarım dronlarının seçiminde uzman görüşleri ile birleştiğinde, belirsizliğe dayalı karar problemlerinde güvenilir ve farklı kriterler arasında dengeli bir sıralama sağlayacaktır" öne sürülmektedir. Böylece bu çalışmada, akıllı tarım dronlarının performansları, SFN COPRAS yöntemi kullanılarak çok kriterli karar analizi çerçevesinde karşılaştırılacak ve en uygun dron seçiminin yapılabilirliği test edilecektir. Bu çalışmanın teorik katkıları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- SFN-COPRAS yönteminin tarım dronları seçimine uygulanması: Çalışma, çok kriterli karar problemlerinde belirsizliği ve uzman görüşlerindeki farklılıkları etkili bir şekilde modelleyen SFN-COPRAS yönteminin tarım dronları seçiminde uygulanabilirliğini göstermektedir.
- SFN-COPRAS yönteminin tarımsal drone seçimine ilk uygulaması: Bu çalışma, küresel (spherical) bulanık sayılarla entegre edilmiş COPRAS yönteminin, tarımsal drone seçimi gibi çok kriterli ve belirsiz karar problemlerine uygulanmasını sağlayarak literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.
- Küresel bulanık sayıların dört boyutlu belirsizliği modelleme gücü: Küresel bulanık sayılar $(\mu^+, \mu^-, \pi, \tau)$ sayesinde, dron seçiminde karşılaşılan çelişkili kriterler (ör. yüksek fayda ve yüksek maliyet) teorik olarak daha doğru ve esnek bir şekilde modellenebilmektedir. Bu yaklaşım, belirsizlik ve uzman görüşleri arasındaki farklılıkları sistematik olarak ele alarak karar vericilere daha güvenilir bir sıralama sunmaktadır.
- Duyarlılık analizi yaklaşımının standartlaştırılabilirliği: Çalışmada önerilen duyarlılık analizi yöntemi, alternatiflerin belirli kriterler altındaki performanslarında değişiklik yapıldığında sonuçların ne derece istikrarlı olduğunu test etmektedir. Bu yaklaşım, bulanık çok kriterli karar verme süreçlerinde uygulanabilir bir standart olarak literatürde referans alınabilecek bir yöntem sunmaktadır.
- Küresel bulanık sayılar ile belirsizliğin modellenmesi: Alternatiflerin ve kriter ağırlıklarının küresel bulanık sayılar ile değerlendirilmesi, üçgen veya yamuk bulanık sayılara kıyasla çok boyutlu belirsizliklerin daha doğru temsil edilmesine olanak sağlamaktadır.
- Uzman görüşlerinin sistematik entegrasyonu: Sekiz farklı uzmandan elde edilen puanlar, küresel bulanık sayılar aracılığıyla sistematik bir şekilde birleştirilerek, alternatiflerin objektif ve dengeli bir biçimde değerlendirilmesine imkân tanımaktadır.
- Çok kriterli ve belirsizliğe dayalı karar süreçlerinin desteklenmesi: SFN-COPRAS yöntemi, hem fayda hem de maliyet kriterlerini dikkate alarak, karar vericilere belirsiz koşullar altında güvenilir ve dengeli sıralama sunmaktadır.
- Literatüre ampirik ve yöntemsel katkı: Tarım teknolojileri ve akıllı dron seçimi bağlamında SFN-COPRAS yönteminin uygulanmasına dair literatürde sınırlı örnek bulunmakta olup, bu çalışma bu boşluğu doldurarak teorik ve metodolojik katkı sağlamaktadır.

LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, tarım dronlarının seçiminde kullanılan çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri ile küresel (spherical) bulanık ÇKKV yöntemlerinin farklı alanlardaki uygulamaları ele alınacaktır. Öncelikle tarım teknolojilerinde alternatif değerlendirme yöntemleri incelenecek; ardından küresel bulanık mantığın sağladığı avantajlar ve farklı sektörlerdeki uygulama örnekleri ele alınacaktır. Son olarak, SFN COPRAS yönteminin literatürdeki kullanımına ilişkin çalışmalar ele alınacaktır. Bu yaklaşım, çalışmamızın metodolojik dayanaklarını ve literatürdeki mevcut boşlukları ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Boz (2025) çalışmasında, tarım ilaçlama dronlarının seçiminde kullanılabilecek entegre bir bulanık model geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Çalışmada DJI Agras T30 ve XAG P30 gibi dron alternatifleri, belirlenen kriterler doğrultusunda değerlendirilmiş; alternatiflerin sıralanmasında AROMAN (Additive Ratio Assessment based on the Ordered Weighted Averaging) yöntemi kullanılmış, belirsizliği modellemek için ise p, q-QOFS (quantitative and qualitative Ordered Fuzzy Sets) yaklaşımı entegre edilmiştir. Analizler, taşıma kapasitesi, kullanım kolaylığı ve uçuş süresi gibi kriterlerin en kritik seçim ölçütleri olduğunu göstermiştir. Oğuz (2024) çalışmasında, tarım

işletmeleri için uygun dronların seçimi sürecinde belirsizliği modellemek amacıyla aralık tip-2 bulanık küme yaklaşımını kullanmıştır. Çalışmada farklı dron alternatifleri, tarımsal uygulamalardaki etkinlik ve maliyet açısından değerlendirilmiş; alternatiflerin sıralanmasında aralık tip-2 bulanık tabanlı COPRAS yöntemi uygulanmıştır. Analizler, güvenlik, operasyonel verimlilik ve ilaçlama hızı gibi kriterlerin dron seçimi için en önemli faktörler olduğunu göstermiştir. Değerlendirme sonucunda, DJI Agras T30 en yüksek uyumu sağlayarak tercih edilen model olarak belirlenmiş ve çalışma, aralık Tip-2 bulanık tabanlı COPRAS yönteminin belirsiz ve subjektif verilerin değerlendirildiği durumlarda etkin bir karar destek aracı sunduğunu ortaya koymuştur. Puška et al. (2024) çalışmasında, Bosna-Hersek'in kuzeyindeki Posavina bölgesindeki küçük ve orta ölçekli çiftlikler için uygun fiyatlı tarım dronları değerlendirilmiştir. Araştırmada, çiftçilerin teknik ihtiyaçları ve bütçe sınırlamaları dikkate alınmıştır. Sekiz dron alternatifi, on kriter üzerinden incelenmiş ve kriterlerin göreli önemi uzman değerlendirmeleri ile belirlenmiştir. Dronlar, bu kriterlere göre sıralanmıştır. Analizler, maliyet, işletme kolaylığı ve bakım gereksinimleri gibi faktörlerin dron seçimi için en kritik ölçütler olduğunu ortaya koymuştur. Göncü (2024) çalışmasında, çeltik üreticilerinin dron seçimlerini etkileyen faktörler SWARA yöntemi ve alanında uzman dört karar vericinin görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir. Araştırmada, dronun taşınabilir yük miktarı, uçuş süresi, püskürtme hızı, taşıma kapasitesi ve ağırlık kriterleri incelenmiş olup, taşınabilir yük miktarı en yüksek öneme sahip kriter olarak öne çıkmıştır. Çalışma, dron tercihlerini etkileyen faktörlerin sistematik bir şekilde değerlendirilmesini sağlayarak tarımsal ilaçlama süreçlerinde teknolojik kararları desteklemeyi amaçlamış ve gelecekte farklı üretici grupları ve tarımsal ürünler üzerinde benzer analizlerin yapılmasının önemini vurgulamıştır. Özgüven ve ark. (2022) çalışmasında, tarım sektöründe dron teknolojisinin mevcut durumunu, uygulama alanlarını ve gelecekteki potansiyelini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışma, dronların tarımda pest kontrolü, gübreleme, sulama ve alan haritalaması gibi çeşitli uygulamalarda nasıl kullanıldığını detaylandırmış, bu teknolojinin verimlilik, sürdürülebilirlik ve maliyet açısından sağladığı avantajları vurgulamıştır. Ayrıca, dron kullanımının tarımda veri odaklı karar alma süreçlerini nasıl dönüştürdüğüne ve bu dönüşümün üreticilerin iş süreçlerine etkilerine de değinilmiştir. Çalışma, dron teknolojisinin tarımda daha geniş bir şekilde benimsenmesi için gerekli olan altyapı, eğitim ve regülasyon gibi unsurları da tartışarak, bu alanda gelecekteki gelişmeleri de ele almıştır. Rejep et al. (2022) çalışmasında, tarımda dron kullanımını kapsamlı bir şekilde inceleyerek bu alandaki akademik literatürü analiz etmişlerdir. Çalışmada mevcut literatür taranmış, dronların tarımdaki temel uygulamaları ve gelişmeleri özetlenmiş; ayrıca bibliyometrik analizle araştırma eğilimleri, anahtar kelimeler ve yazar ağları belirlenmiştir. Çalışma, literatürdeki boşlukları ve gelecekteki araştırma alanlarını tartışarak, tarımda dron kullanımının daha verimli hale getirilmesine yönelik öneriler sunmuş ve bu teknolojinin akademik olarak anlaşılmasına önemli katkı sağlamıştır.

Sarucan et al. (2022) çalışmasında, sağlık sektöründe doktor seçimi problemini çözmek amacıyla küresel bulanık TOPSIS yöntemini uygulamışlardır. Çalışmada, beş alternatif ve sekiz kriter kullanılarak doktorlar değerlendirilmiş; önerilen yöntem, belirsizlik ve kararsızlıkları etkili bir şekilde yöneterek karar vericilere daha güvenilir sonuçlar sunmuştur. Kutlu Gündoğdu & Kahraman (2019) çalışmasında, endüstriyel robot seçimi için küresel bulanık AHP yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntem, karar vericilerin belirsiz ve tereddütlü (kararsızlık) yargılarını daha doğru bir şekilde ifade etmelerine olanak tanımış ve endüstriyel robot seçimi problemlerinde etkin bir çözüm sunmuştur. Rajput & Kumar (2024) çalışmasında, depo yer seçimi problemini çözmek için küresel bulanık VIKOR yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada, çeşitli kriterler dikkate alınarak depo yerleri değerlendirilmiş; önerilen yöntem, belirsizlikleri etkili bir şekilde yöneterek karar vericilere daha güvenilir sonuçlar sunmuştur. Thilagavathy & Mohanaselvi (2024) çalışmasında, çok kriterli grup karar verme problemlerini çözmek amacıyla T-spherical (küresel) bulanık TOPSIS yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntem, karar vericilerin belirsiz ve tereddütlü yargılarını daha doğru bir şekilde ifade etmelerine olanak tanımış ve çok kriterli grup karar verme problemlerinde etkin bir çözüm sunmuştur. Azim et al. (2023), Endüstri 4.0 projelerinin önceliklendirilmesi için q-spherical (küresel) bulanık AHP ve bulanık kaba küme yöntemlerini entegre etmişlerdir. Bu yaklaşım, projelerin önem sırasını belirlemede belirsizlikleri etkili bir şekilde yönetmiş ve karar vericilere daha güvenilir sonuçlar sunmuştur.

Ganie & Dutta (2025) çalışmasında, tehlikeli atık taşıma firmalarının seçiminde küresel bulanık entropi ölçüsünü ve COPRAS yöntemini entegre ederek bir karar destek modeli geliştirmişlerdir. Önerilen model, belirsiz ve karmaşık karar ortamlarında daha esnek ve hassas analizler sunarak karar vericilerin daha bilinçli ve doğru kararlar almalarına yardımcı olmuştur. Liu & Shen (2024) çalışmasında, kurumsal veri varlıklarının değerlemesi için SFN COPRAS yöntemini kullanarak bir değerlendirme modeli önermiştir. Bu model, belirsiz ve karmaşık karar ortamlarında daha esnek ve hassas analizler sunarak kurumsal veri varlıklarının değerlemesinde etkili bir çözüm sağlamıştır. Aydoğdu et al. (2023) çalışmasında, karmaşık küresel bulanık ortamda entropi ölçüsü temelli COPRAS yöntemini geliştirerek bir karar destek modeli önermiştir. Bu model, belirsiz ve karmaşık karar ortamlarında daha esnek ve hassas analizler sunarak, karar vericilerin daha bilinçli ve doğru kararlar almalarına yardımcı olmuştur. Güner et al. (2025), küresel bulanık ortamda AHP ve COPRAS yöntemlerini entegre ederek

bir grup karar verme modeli geliştirmişlerdir. Bu model, belirsiz ve karmaşık karar ortamlarında daha esnek ve hassas analizler sunarak, karar vericilerin daha bilinçli ve doğru kararlar almalarına yardımcı olmuştur. Wang et al. (2024) çalışmasında, gıda atığı yönetimi için karmaşık küresel bulanık ortamda COPRAS yöntemini kullanarak bir karar destek modeli önermişlerdir. Bu modelin, belirsiz ve karmaşık karar ortamlarında daha esnek ve hassas analizler sunarak, gıda atığı yönetiminde etkin bir çözüm sağladığı görülmüştür.

Yapılan literatür taraması sonucunda, SFN COPRAS yönteminin tarımsal alanda, özellikle dron seçim problemlerinde hiç kullanılmadığı; diğer ÇKKV yöntemlerinin de bu bağlamda oldukça sınırlı sayıda uygulamaya sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, tarımsal dron seçimi alanında karar vericilerin karşılaştığı belirsizlik ve karmaşıklıkları yönetmek için henüz yeterli sayıda metodolojik çalışmanın bulunmadığını ortaya koymaktadır. Çalışmamız, bu boşluğu gidermeyi amaçlamakta; SFN COPRAS yöntemini tarımsal dron seçimi problemine uygulayarak hem teorik hem de uygulamalı açıdan önemli katkılar sunacaktır. Bu çalışmada, Şanlıurfa ilindeki geniş ölçekli tarım arazilerinde kullanılmak üzere en uygun tarımsal dronun seçimi amaçlanmaktadır. Özellikle pamuk, şeker pancarı, mısır ve buğday üretiminde yoğun olarak kullanılan arazilerde, dron teknolojilerinin hassas tarım uygulamalarına katkısı değerlendirilecektir. Şanlıurfa ilinde gerçek koşullar altında gerçekleştirilecek uygulamalı çalışma, önerilen yöntemin pratikteki etkinliğini test ederek karar vericilere doğrudan yol gösterici olacaktır. Bu sayede, tarım teknolojileri alanında karar destek süreçlerinin daha esnek, hassas ve güvenilir bir şekilde yürütülmesine olanak sağlanacak ve literatürde henüz ele alınmamış bir yöntemin hem akademik hem de sahada uygulanabilirliği ortaya konmuş olacaktır.

ÇALIŞMA KAPSAMINDA ÖNERİLEN YÖNTEM/YÖNTEMLER

Bu bölümde, çalışmamız kapsamında küresel bulanık kümelerin ve COPRAS yönteminin tercih edilme sebebi ile çalışmada kullanılan SFN COPRAS yönteminin işlem adımlarından bahsedilecektir.

Öncelikle bu çalışmada, küresel (spherical) bulanık sayılar kullanılmıştır. Tip-1 bulanık sayılara göre küresel bulanık sayılar, belirsizlikleri çok boyutlu (küresel) bir uzayda ele alabilme kapasitesi sayesinde, alternatiflerin ve kriterlerin performanslarını daha gerçekçi ve bütüncül biçimde modellemeye olanak sağlamaktadır. Literatürde, Tip-2, Nötrosofik ve Pisagor bulanık kümeleri gibi, belirsizlikleri ifade etme kapasitesi yüksek diğer bulanık küme türleri de mevcuttur ve güçlü modelleme yetenekleri sunmaktadır. Bununla birlikte, uzman görüşleri doğrultusunda, bu çalışmada küresel bulanık sayıların kullanımı tercih edilmiştir. Bunun temel nedenleri şunlardır: (i) belirsiz ve çelişkili uzman değerlendirmelerini eş zmanlı olarak dikkate alabilmesi, (ii) elemanın kümeye üye olma, üye olmama ve belirsizlik düzeylerini birlikte dikkate alabilmesi, (iii) literatürde güncel ve yenilikçi bir yaklaşım olarak sınırlı sayıda çalışmada yer alması ve (iv) COPRAS yöntemi ile entegrasyonunda hesaplama ve yorum açısından uygulanabilirlik sağlamasıdır. Bu sayede, alternatiflerin teknik ve operasyonel kriterler açısından güvenilir ve ayrıştırıcı bir sıralama performansı elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, COPRAS yöntemi tercih edilmiştir. ÇKKV literatüründe AHP, TOPSIS, VIKOR, PROMETHEE ve ELECTRE gibi birçok yöntem mevcuttur; ancak SFN COPRAS yöntemi, fayda ve maliyet kriterlerini eş zamanlı olarak bütünleştirerek alternatifler arasındaki göreli önem derecelerini doğrudan hesaplayabilme yeteneği ile son zamanlarda öne çıkan güncel bir ÇKKV yöntemidir (Turanoglu et al., 2016; Aydoğdu et al., 2023). COPRAS, özellikle çok sayıda kriter ve alternatifin yer aldığı, belirsizlik içeren karar problemlerinde yüksek ayrıştırıcı güç sunmakta ve sonuçların daha şeffaf ve yorumlanabilir olmasını sağlamaktadır (Raudeliuniene et al., 2025; Taherdoost & Mohebi, 2024). Ayrıca, yöntem basit ve sistematik adımlara sahip olup, küresel bulanık veriyle kolayca entegre edilebilmekte ve uzman görüşlerinin çok boyutlu belirsizliklerini yansıtacak şekilde kullanılabilmektedir. Bu nedenlerle ve uzman değerlendirmeleri doğrultusunda, çalışmamızda tarımsal drone alternatiflerinin teknik ve operasyonel kriterler açısından güvenilir, tutarlı ve ayrıştırıcı bir sıralamasını elde etmek için COPRAS yöntemi en uygun yaklaşım olarak benimsenmiştir.

Adım 1: Küresel bulanık karar matrisinin oluşturulması. Bu adımda, karar probleminde yer alan alternatiflerin her birinin her bir kriter altındaki performansı uzman görüşleriyle değerlendirilir ve bu değerlendirmeler küresel bulanık sayılarla ifade edilir. Küresel bulanık mantıkta her bir değer dört bileşenden oluşur: pozitif üyelik derecesi (μ^+), negatif üyelik derecesi (μ^-), belirsizlik/nötrlük derecesi (π) ve eksiklik/boşluk derecesi (τ) şeklinde tanımlanır. Böylece alternatiflerin yalnızca güçlü yönleri değil, zayıf yönleri, belirsizlikleri ve bilgi eksiklikleri de aynı anda modele yansıtılır. Bu şekilde oluşturulan küresel bulanık karar matrisi, yöntemin sonraki aşamalarına temel veri seti sağlar. Burada her x_{ij}, klasik bulanık sayı yerine bir küresel bulanık sayı olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\tilde{x}_{ij} = \left(\mu_{ij}^{+}, \mu_{ij}^{-}, \pi_{ij}, \tau_{ij}\right) \quad (1)$$

Burada:

μ_{ij}^{+}: Alternatifin kriteri karşılamadaki olumlu üyelik derecesini,

μ_{ij}^{-}: Alternatifin kriteri karşılamadaki olumsuz (karşılamama) derecesini

π_{ij}: belirsizlik/nötrlük derecesini,

τ_{ij}: bilinmezlik / boşluk derecesini ifade etmektedir (Lu et al., 2021).

Adım 2: Kriter ağırlıklarının belirlenmesi. Bu adımda, öncelikle her uzman, kriterlerin önem derecesini küresel bulanık değerler kullanarak değerlendirir. Daha sonra ise tüm uzmanların değerlendirmelerine ait ortalama değerler alınarak her kriter için nihai küresel bulanık sayı değerleri hesaplanır.

$$\left(\mu_{ij}^{+}, \mu_{ij}^{-}, \pi_{ij}, \tau_{ij}\right) \quad 2$$

Daha sonra çalışma kapsamında görüşüne başvurulan birden fazla uzman var ise her kriter için bu çalışma kapsamında önerilen küresel bulanık ortalama aşağıdaki şekilde alınır:

$$w_{ij} = \left(\frac{1}{k}\sum_{e=1}^{k}\mu_{je}^{+}, \frac{1}{k}\sum_{e=1}^{k}\mu_{je}^{-}, \frac{1}{k}\sum_{e=1}^{k}\pi_{je}, \frac{1}{k}\sum_{e=1}^{k}\tau_{je}\right) \quad 3$$

Burada: k = uzman sayısını ve e = uzman indeksini ifade etmektedir.

Adım 3: Küresel karar matrisinin normalize edilmesi. Bu adımda, küresel bulanık karar matrisindeki değerler, kriter türüne (fayda veya maliyet) göre uygun biçimde ölçeklendirilir. Böylece tüm kriterler aynı ölçeğe indirgenir ve karşılaştırılabilir hale gelir. Fayda kriterleri için değerler en yüksek performansa bölünerek normalize edilirken, maliyet kriterleri için en düşük değere göre ters orantılı bir dönüşüm yapılır. Fayda ve maliyet kriterlerine göre küresel bulanık karar matrisinin normalize edilmesi aşağıdaki şekilde yapılır:

a) Fayda kriterleri için

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{\mu_{ij}^{+}}{max_i \mu_{ij}^{+}}, \frac{\mu_{ij}^{-}}{min_i \mu_{ij}^{-}}, \pi_{ij}, \tau_{ij}\right) \quad 4$$

b) Maliyet kriterleri için

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{min_i \mu_{ij}^{+}}{\mu_{ij}^{+}}, \frac{max_i \mu_{ij}^{-}}{\mu_{ij}^{-}}, \pi_{ij}, \tau_{ij}\right) \quad 5$$

Böylece tüm kriterler aynı ölçeğe indirgenerek karşılaştırılabilir hale getirilir (Sodhi & Prabhakar, 2012; Ghorabaee et al., 2017; Öztürk, 2026b).

Adım 4: Ağırlıklı küresel karar matrisinin hesaplanması. Bu adımda, normalleştirilmiş karar matrisi değerleri, ilgili kriterin ağırlığı ile çarpılarak ağırlıklı küresel karar matrisi elde edilir. Böylece hem kriterlerin göreceli önemleri hem de alternatiflerin performansları aynı yapıda bütünleştirilmiş olur. Ağırlıklı küresel karar matrisi aşağıdkai şekilde hesaplanır:

$$\tilde{d}_{ij} = \widetilde{w}_j \times \tilde{r}_{ij} \quad 6$$

Burada w_j, j. kriterin küresel bulanık ağırlığını; $\tilde{r}_{ij}$ ise i. alternatifin j. kriter için normalize edilmiş küresel değerini göstermektedir. Burada çarpım işlemi ise küresel bulanık sayıların tanımlı aritmetik kuralları kullanılarak gerçekleştirilir (Dikopoulou et al., 2017; Öztürk, 2025; Öztürk, 2026b).

Adım 5: Fayda ve maliyet toplamlarının hesaplanması. Bu adımda, her alternatif için bu çalışma kapsamında önerilen fayda ve maliyet değerleri sırasıyla Eşitlik 7 ve Eşitlik 8'deki gibi hesaplanır.

a) Fayda kriterleri toplamı:

$$S_i^{+} = \sum_{j\in B}\mu_{ij}^{+} = \sum_{j\in B}\left(d_{ij}^{+} + \pi_{ij}\left(1-\tau_{ij}\right)\right) \quad 7$$

Burada:

d_{ij}^{+}: Ağırlıklı küresel bulanık karar matrisindeki (μ^{+}) i. alternatifin j. kriterdeki pozitif ağırlıklı üyelik derecesini,

π_{ij}: Belirsizlik derecesini,

τ_{ij}: Yadsıma derecesini ifade etmektedir.

b) Maliyet kriterleri toplamı:

$$S_i^{-} = \sum_{j\in C}\mu_{ij}^{-} = \sum_{j\in B}\left(d_{ij}^{-} + \left(\pi_{ij} \times \tau_{ij}\right)\right) \quad 8$$

Burada:

d_{ij}^{-}: Ağırlıklı küresel bulanık karar matrisindeki (μ^{+}) i. alternatifin j. kriterdeki negatif ağırlıklı üyelik derecesini,

$\pi_{ij} \times \tau_{ij}$: Belirsizlik ve yadsımanın ortak etkisini (maliyet kısmında negatif yük getirir) ifade etmektedir (Türkmen & Demirel, 2022).

Böylece burada sadece pozitif/negatif üyelikler değil, π ve τ değerleri de denge katsayılarında rol almış olur.

Adım 6: COPRAS nispi önem (Q_i) değerlerinin hesaplanması. Bu adımda amaç, her alternatif için nihai göreli önem derecesini (Q_i) belirlemektir. Önceki adımlarda hesaplanan fayda fonksiyonu (S_i^+) ve maliyet fonksiyonu (S_i^-) değerleri küresel skor fonksiyonuna entegre edilerek kullanılır. Küresel COPRAS yaklaşımında Q_i, alternatifin toplam faydasını ve toplam maliyetini eş zamanlı değerlendirir. Fayda yönlü skorlar, alternatifin güçlü yanlarını artırıcı etki yaparken; maliyet yönlü skorlar, negatif etkiyi yansıtır. Böylece hem maksimizasyon hem de minimizasyon kriterleri dengeli biçimde hesaba katılmış olur. Alternatiflerin nispi önem değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Q_i = SF(S_i^+) + \frac{\sum_{i=1}^{m} SF(S_i^-)}{SF(S_i^-) \times \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{SF(S_i^-)}} \quad (9)$$

Burada:

$SF(S_i^+)$: i. alternatifin küresel fayda skor fonksiyonunu,

$SF(S_i^-)$: i. alternatifin küresel maliyet skor fonksiyonunu,

m: Alternatif sayısını ifade etmektedir (Türkmen & Demirel, 2022)..

Adım 7: Alternatifler için göreceli önem derecesi (P_i) değerinin hesaplanması. Bu adımda, her alternatif için hesaplanan nispi önem değeri (Q_i) daha anlaşılır ve karşılaştırılabilir hale getirilir. Bunun için tüm alternatiflerin Q_i değerleri arasında en yüksek olanı referans değeri kabul edilir ve diğer alternatifler bu değere oranlanır. Alternatiflerin göreceli önem dereceleri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$P_i = \frac{Q_i}{max_i Q_i} \quad (10)$$

Burada:

Q_i: i. Alternatifin nispi (mutlak) önem derecesini,

$max_i Q_i$: Tüm alternatifler içindeki en yüksek önem derecesini ifade etmektedir. Böylece bu normalizasyon işlemiyle: En iyi alternatifin $P_i = 1$ olması sağlanır ve diğer alternatiflerin değerleri $0 < P_i < 1$ aralığında yer alır (Lu et al., 2021; Türkmen & Demirel, 2022).

Adım 8: Alternatiflerin seçimi ve sıralanması. Bu adımda, bir önceki adımda hesaplanan P_i değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanarak alternatifler sıralanır. Burada en yüksek P_i değerine sahip alternatif en iyi alternatif olarak belirlenir.

ÖNERİLEN YÖNTEM/YÖNTEMLERİN UYGULANMASI

Bu bölümde, SFN COPRAS yöntemi kullanılarak Şanlıurfa ilinde tarımsal uygulamalarda kullanılacak dronların seçimi ve sıralanması işlemi gerçekleştirilecektir. Önerilen yöntemin uygulama adımlarına geçmeden önce, önerilen yöntemin akış şemasına, çalışmaya dahil edilen alternatif dronlar, değerlendirilen kriterler ve görüşlerine başvurulan uzman komitesi hakkında detaylı bilgiler verilecektir. Sonrasında ise SFN COPRAS yönteminin saha uygulaması adım adım açıklanacaktır.

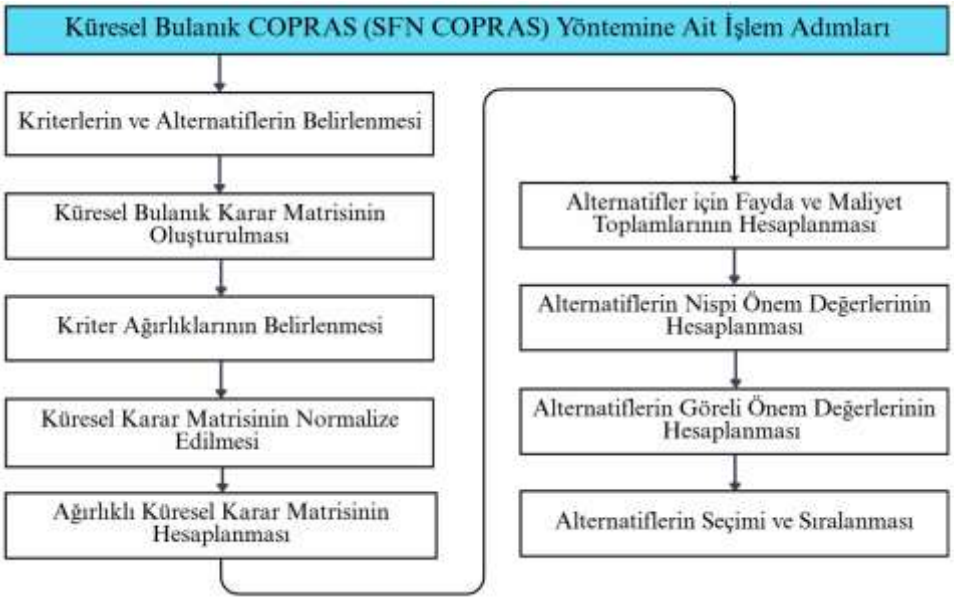
SFN COPRAS Yönteminin İşlem Adımlarına Ait Akış Şeması

Çalışma kapsamında kullanılan SFN COPRAS yöntemine ait akış şeması Şekil 1'de verilmiştir.

Çalışma Kapsamında Oluşturulan Uzman Komitesine Ait Bilgiler

Bu çalışmada kullanılan kriter ağırlıklarının ve alternatif dronlara ilişkin değerlendirmelerin belirlenmesinde 8 uzmandan görüş alınmıştır. Uzmanlar, tarım teknolojileri, ziraat mühendisliği, mekanizasyon, akıllı tarım uygulamaları ve karar verme teknikleri gibi farklı alanlarda uzun yıllara dayanan deneyime sahiptir. Çalışma kapsamında görüşlerine başvurulan uzmanlara ait bilgiler aşağıda özetlenmiştir:

- Uzman 1: Ziraat Mühendisi, Bitki Koruma Bölümü. Tarım ilaçlama teknikleri ve drone tabanlı hassas tarım uygulamalarında 13 yıl deneyime sahip.
- Uzman 2: Makine mühendisi, Tarım Mekanizasyonu uzmanı. Tarım makineleri ve ekipmanlarının performans değerlendirmesinde 12 yıl deneyime sahip.
- Uzman 3: Elektrik-Elektronik Mühendisi, İnsansız Hava Araçları (İHA) sistemleri üzerine uzman. Akıllı tarımda sensör teknolojileri üzerine 10 yıl deneyime sahip.



Şekil 1. SFN COPRAS yöntemine ait akış şeması
Figure 1. Flowchart of the SFN COPRAS method

- Uzman 4: Bilgisayar Mühendisi, Veri Bilimi ve Yapay Zekâ uygulamaları. Tarımsal veri analitiği ve karar destek sistemlerinde 7 yıl deneyime sahip.
- Uzman 5: Ziraat Mühendisi, Tarla Bitkileri ve Hassas Tarım Teknolojileri uzmanı. Sürdürülebilir tarım uygulamalarında 14 yıl deneyime sahip.
- Uzman 6: Çevre Mühendisi, Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik üzerine uzman. Çevresel etki ve karbon ayak izi değerlendirmelerinde 11 yıllık deneyime sahip.
- Uzman 7: Endüstri Mühendisi, ÇKKV yöntemleri ve optimizasyon alanında 13 yıllık deneyime sahip.
- Uzman 8: Tarım Ekonomisti, Tarım teknolojilerinin ekonomik analizi ve maliyet-fayda değerlendirmeleri konusunda 16 yıl deneyime sahip.

Bu uzman grubunun farklı disiplinlerdeki bilgi birikimi, çalışmada kullanılan kriter ve alternatiflerin kapsamlı ve çok boyutlu bir bakış açısıyla değerlendirilmesini sağlamıştır.

Çalışma Alanı (Örnek Vaka Bölgesi)

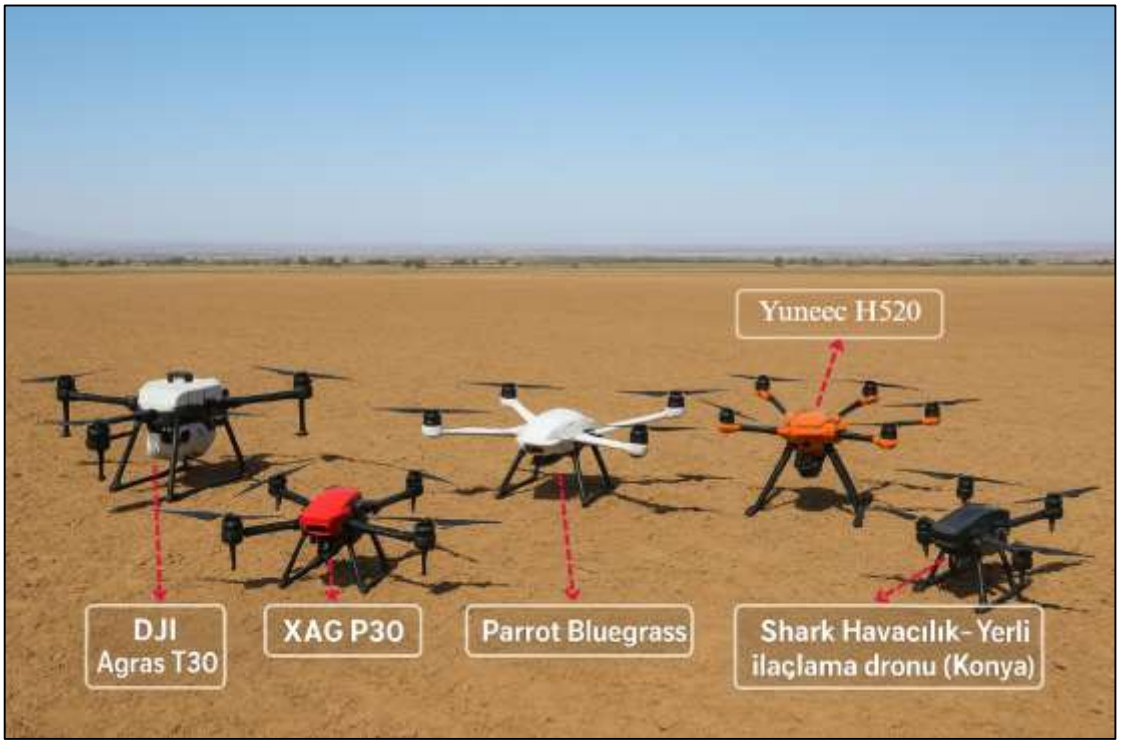
Bu çalışmada ele alınan uygulama bölgesi, Türkiye'nin Şanlıurfa ilinde yer alan ve tarımsal üretim açısından yüksek potansiyele sahip bir örnek vaka alanı olarak belirlenmiştir. Söz konusu bölge, geniş ölçekli tarım arazileri, düz topoğrafik yapısı ve yoğun tarımsal faaliyetleri ile dikkat çekmektedir. Bölgenin iklimi genel olarak sıcak ve kurak olup, özellikle yaz aylarında yüksek sıcaklık ve buna bağlı nem stresi yaygındır. Toprak yapısı çoğunlukla kırmızı Akdeniz toprakları (Terra Rossa) karakterinde olup, sulama altyapısı kısmen gelişmiştir.

Çalışma kapsamında ele alınan örnek uygulama parseli yaklaşık 15–20 hektar büyüklüğünde olup, pamuk, buğday, mısır ve şeker pancarı gibi bölgeye özgü ürünlerin yetiştirilmesine elverişlidir. Bu özellikleriyle alan, tarımsal insansız hava araçlarının (drone) kullanımına uygun bir fiziksel ortam sunmaktadır.

Bu çalışma, doğrudan saha ölçümlerine dayalı ampirik veriler yerine, alan uzmanlarından elde edilen değerlendirmelere ve literatürde yer alan teknik dokümanlara dayanmaktadır. Alternatif olarak belirlenen drone modellerine (A1, A2, A3, A4 ve A5) ilişkin performans değerlendirmeleri; uçuş süresi, taşıma kapasitesi, kapsama etkinliği, enerji tüketimi ve sensör veri kalitesi gibi kriterler çerçevesinde, uzman görüşleri aracılığıyla yapılmıştır.

Uzman değerlendirmeleri, ilgili drone sistemlerine ait teknik özellikler, üretici firma verileri ve sektörel deneyimlere dayalı olarak gerçekleştirilmiş; elde edilen nitel ve nicel değerlendirmeler, çalışmada kullanılan küresel bulanık sayılar aracılığıyla modellenmiştir. Bu bağlamda, çalışma doğrudan saha deneylerinden elde edilen ölçümler yerine, uzman temelli çok kriterli karar verme yaklaşımı üzerine kuruludur. Dolayısıyla, Şanlıurfa ili, önerilen yöntemin gerçekçi koşullar altında uygulanabilirliğini ve pratikliğini göstermek amacıyla temsilî bir uygulama alanı (örnek olay inceleme bölgesi) olarak seçilmiştir. Çalışma alanına ait uydu görüntüsü Şekil 2'de, çalışmada değerlendirilen alternatif drone modelleri ise Şekil 3'te sunulmuştur.

Şekil 2. Uygulama alanı
Figure 2. Application Area



Şekil 3. Çalışma kapsamında kullanılan alternatif dron türleri
Figure 3. Drone types used in the study

Çalışma Kapsamında Değerlendirmede Kullanılan Kriter ve Alternatiflerin Özellikleri

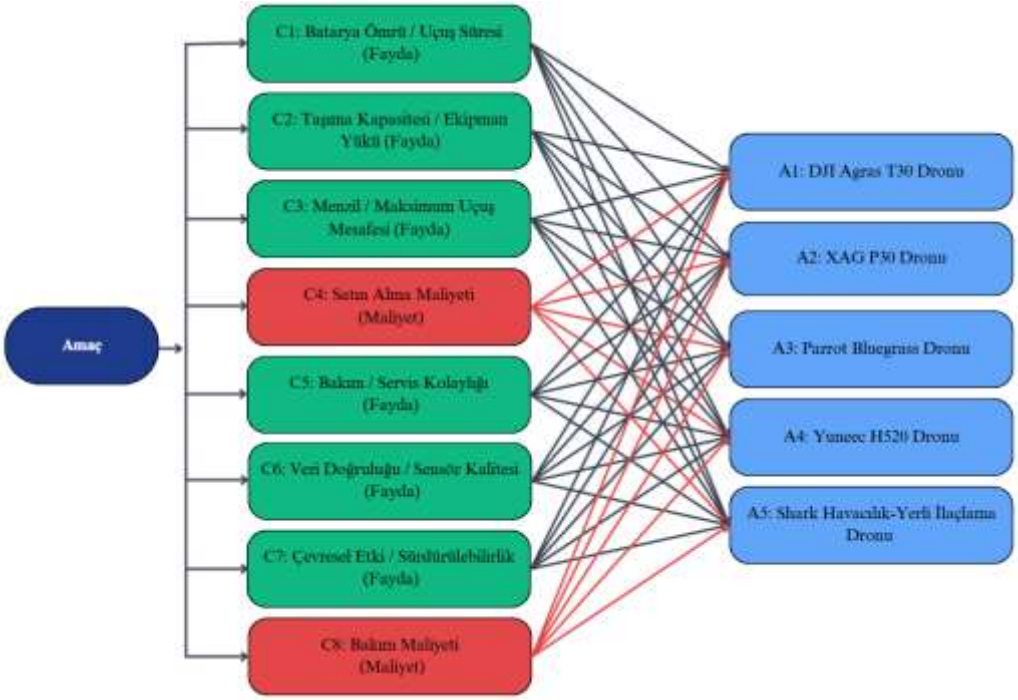
Çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan kriter ve alternatiflerin özellikleri Çizelge 1'de yer almaktadır. Şekil 4'de ise hiyerarşik yapısı verilen üç seviyeli karar problemi oluşturulmuştur.

Çalışma Kapsamında Verilerin Toplanması

Bu çalışmada kullanılan veriler, hem literatür incelemesi hem de uzman görüşleri aracılığıyla toplanmıştır. Öncelikle tarımda kullanılan dronlara ilişkin teknik özellikler, üretici firmaların resmi katalogları, ürün tanıtım dokümanları ve akademik çalışmalardan elde edilmiştir. Daha sonra, bu bilgiler tarım ve ziraat mühendisliği alanında uzman 5 kişinin görüşleriyle doğrulanmış ve kriterlerin çalışma bölgesine uygunluğu teyit edilmiştir.

Çizelge 1. Çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan kriter ve alternatiflerin özellikleri
Table 1. Characteristics of the criteria and alternatives evaluated in the study

Kriter Kodu *Criterion Code*	Kriterler *Criteria*	Tipi *Type*	Açıklama *Description*
C1	Batarya Ömrü / Uçuş Süresi	Fayda	Geniş tarım arazilerinde uzun süreli uçuş imkânı sağlama yeteneğini ifade eder (Dorling et al., 2016; Stolaroff et al.,2018; Agrawal & Arafat, 2024).
C2	Taşıma Kapasitesi / Ekipman Yükü	Fayda	İlaç, gübre ve diğer tarımsal girdilerin taşınabilme kapasitesini ifade eder (Del Cerro et al., 2021; Calderone et al., 2024; Yao et al., 2025).
C3	Menzil / Maksimum Uçuş Mesafesi	Fayda	Tek şarjla kat edilebilecek mesafeyi ve geniş alanlarda operasyonel verimliliği ifade eder (Delavarpour et al., 2021; Dong et al., 2025).
C4	Satın Alma Maliyeti	Maliyet	Dronun ilk yatırım (satın alma) maliyetini ifade eder (Jackson et al., 2021; Cavalaris et al., 2023; Quan et al., 2023).
C5	Bakım / Servis Kolaylığı	Fayda	Sahada bakım ve onarım işlemlerinin hızlı ve kolay yapılabilmesini ifade eder (Petritoli et al., 2018; Guebsi et al., 2024).
C6	Veri Doğruluğu / Sensör Kalitesi	Fayda	Hassas tarım uygulamalarında ölçüm ve veri toplamanın doğruluğunu ifade eder (Soussi et al., 2024; Liu et al., 2025; Grbović et al., 2025).
C7	Çevresel Etki / Sürdürülebilirlik	Fayda	Enerji tüketimi ve çevresel etkilerin azaltılmasına katkısını ifade eder (Eryılmaz & Kılıç 2018; Arza-García & Burgess, 2022; Safaeinejad et al., 2025; Ramteke et al., 2025).
C8	Bakım Maliyeti	Maliyet	Kullanım süresince bakım ve servis maliyetlerini ifade eder (Umeda et al., 2022; Umeda et al., 2022; Testa et al., 2025).
Alternatif Kodu *Alternative Code*	Alternatifler *Alternatives*		Açıklama *Description*
A1	DJI Agras T30	-	Çin menşeli bu model, 30 litrelik ilaç tankı kapasitesi, otomatik uçuş planlama sistemi ve radar tabanlı engel algılama özellikleriyle öne çıkmaktadır. Geniş tarım arazilerinde yüksek hacimli ilaçlama yapabilme kapasitesi sayesinde verimliliği artırmaktadır (DJI, 2021).
A2	XAG P30	-	Çin'de geliştirilen bu tarım dronu, modüler yapısı ve akıllı püskürtme sistemi ile orta ölçekli tarım alanları için uygundur. Hassas ilaçlama, gübreleme ve tohum serpme gibi çoklu görevler üstlenebilir. Bulut tabanlı veri entegrasyonu sayesinde çiftçilere karar desteği sunmaktadır (XAG, 2021).
A3	Parrot Bluegrass	-	Fransa menşeli olup özellikle hassas tarım ve veri toplama odaklıdır. Multispektral kamera desteği ile bitki sağlığı analizleri, NDVI haritalama ve ürün gelişim takibi yapılabilmektedir. Daha çok küçük ve orta ölçekli arazilerde gözlem ve veri temelli karar destek için tercih edilmektedir (Parrot, 2018).
A4	Yuneec H520	-	Çin/Almanya ortak üretimi olan bu model, çok rotorlu tasarımı ve yüksek çözünürlüklü kamera entegrasyonu ile öne çıkmaktadır. Daha çok arazi izleme, haritalama, sulama ve ilaçlama öncesi analiz gibi çok amaçlı tarımsal görevlerde kullanılmaktadır. Ayrıca esnek görev planlama imkânı da sunmaktadır (Yuneec 2017).
A5	Shark Havacılık-Yerli ilaçlama dronu (Konya)	-	Türkiye'de geliştirilen yerli bir alternatif tarım dronudur. Tarımda kullanılan ilaçlama dronları arasında yerli üretim olmasıyla öne çıkmaktadır. Çiftçilerin ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilir; yüksek taşıma kapasitesi, uygun yedek parça temini ve bakım kolaylığı avantajlarıyla yerel tarım uygulamalarına ekonomik bir çözüm sunmaktadır (Keskin, 2025).



Şekil 4. Karar probleminin hiyerarşik yapısı
Figure 4. Hierarchical structure of the decision problem

Alternatif dronlar (DJI Agras T30, XAG P30, Parrot Bluegrass, Yuneec H520 ve yerli üretim Shark Havacılık Tarım Dronu) teknik kapasiteleri dikkate alınarak seçilmiştir. Kriterler ise literatürde yaygın kullanılan faktörler arasından belirlenmiş, saha koşulları (Şanlıurfa ili) göz önüne alınarak uzman görüşleriyle uyarlanmıştır. Bu sayede hem nesnel teknik veriler hem de yerel saha koşullarına özgü nitel veriler bir araya getirilerek karar verme sürecinde kullanılacak güvenilir bir veri seti oluşturulmuştur.

Veri toplama aşamasında, uzmanlardan elde edilen değerlendirmeler küresel bulanık sayılar biçiminde toplanmıştır. Bu yaklaşımda, uzmanların kriterleri ve alternatif–kriter çiftlerini değerlendirirken belirli bir dilsel değerlendirme tablosuna tabi tutulmamış, bunun yerine bilgi ve tecrübelerini daha esnek bir biçimde yansıtabilmeleri amacıyla serbest bir değerlendirme yöntemi izlenmiştir. Analiz öncesinde, kriterler arası ölçek farklılıklarını gidermek amacıyla veriler normalize edilmiştir; bu işlem, COPRAS yönteminde kriterlerin karşılaştırılabilirliğini sağlamak için zorunlu bir adımdır ve tüm kriter değerleri 0–1 aralığına dönüştürülmüştür. Ayrıca, uzman değerlendirmelerinin tutarlılığını değerlendirmek amacıyla Kendall's W testi uygulanmıştır. Analiz sonucunda, uzman değerlendirmeleri arasında istatistiksel olarak anlamlı düzeyde bir uyum olduğu belirlenmiştir ($W = 0{,}653, df = 7, X^2(7) = 36{,}57, p < 0{,}001, k = 8$). Bu değer, uzman görüşleri arasında orta-yüksek düzeyde bir tutarlılığa işaret etmektedir.

Bununla birlikte elde edilen $W = 0{,}653$ değeri, Kendall's W için literatürde "orta düzey ile yüksek düzey arasında uyum" olarak kabul edilen bir etki büyüklüğüne karşılık gelmektedir. Bu durum, uzmanlar arasındaki görüş birliğinin yalnızca istatistiksel olarak anlamlı değil, aynı zamanda pratik açıdan da güçlü bir tutarlılık düzeyine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca hesaplanan ki-kare (X^2) istatistiği ve p değeri, uzman görüşleri arasındaki uyumun rastlantısal olmadığını ve istatistiksel olarak yüksek derecede anlamlı olduğunu doğrulamaktadır ($p < 0{,}001$). Böylece analizde kullanılan verilerin hem homojen hem de tutarlı olduğu güvenle kabul edilmiştir.

SFN COPRAS ile Kriterlerin Ağırlıklandırılması ve Alternatiflerin Seçimi ve Sıralanması

Adım 1: Küresel bulanık karar matrisinin oluşturulması. Bu adımda, her alternatif, uzmanlar tarafından belirlenen küresel bulanık değerler kullanılarak kriterler açısından değerlendirilmiştir. Sonrasında sekiz uzmanın yaptığı değerlendirmeler (bkz. Ek A) birleştirilerek, nihai küresel bulanık karar matrisi oluşturulmuş ve Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Küresel bulanık karar matrisi ($\tilde{x}_{ij}$).
Table 2. Global fuzzy decision matrix ($\tilde{x}_{ij}$).

Alternatifler / Kriterler *Alternatives / Criteria*	C1	C2	C3	C4
A1	(0.73, 0.16, 0.08, 0.06)	(0.77, 0.13, 0.07, 0.05)	(0.71, 0.18, 0.08, 0.06)	(0.38, 0.52, 0.06, 0.04)
A2	(0.70, 0.16, 0.09, 0.06)	(0.73, 0.16, 0.07, 0.05)	(0.67, 0.19, 0.08, 0.06)	(0.46, 0.44, 0.06, 0.04)
A3	(0.65, 0.21, 0.08, 0.06)	(0.57, 0.25, 0.08, 0.06)	(0.63, 0.23, 0.07, 0.07)	(0.50, 0.42, 0.05, 0.04)
A4	(0.67, 0.20, 0.09, 0.06)	(0.66, 0.22, 0.09, 0.07)	(0.67, 0.20, 0.09, 0.06)	(0.42, 0.47, 0.06, 0.04)
A5	(0.68, 0.20, 0.09, 0.06)	(0.77, 0.13, 0.07, 0.05)	(0.65, 0.22, 0.09, 0.06)	(0.54, 0.40, 0.05, 0.04)
Alternatifler / Kriterler *Alternatives / Criteria*	C5	C6	C7	C8
A1	(0.67, 0.21, 0.08, 0.06)	(0.79, 0.12, 0.06, 0.04)	(0.55, 0.22, 0.11, 0.06)	(0.41, 0.50, 0.06, 0.04)
A2	(0.68, 0.20, 0.07, 0.05)	(0.75, 0.15, 0.07, 0.05)	(0.61, 0.23, 0.11, 0.07)	(0.46, 0.46, 0.06, 0.04)
A3	(0.65, 0.25, 0.07, 0.05)	(0.86, 0.08, 0.04, 0.03)	(0.61, 0.26, 0.08, 0.06)	(0.50, 0.42, 0.05, 0.04)
A4	(0.68, 0.21, 0.07, 0.05)	(0.75, 0.16, 0.06, 0.05)	(0.62, 0.24, 0.09, 0.07)	(0.44, 0.48, 0.06, 0.04)
A5	(0.76, 0.16, 0.06, 0.04)	(0.70, 0.20, 0.06, 0.05)	(0.66, 0.22, 0.08, 0.06)	(0.52, 0.40, 0.05, 0.04)

Adım 2: Kriter ağırlıklarının belirlenmesi. Bu adımda, Eşitlik 2 kullanılarak her kriter sekiz uzmanın görüşlerine dayalı olarak belirlenen küresel bulanık değerler kullanılarak değerlendirilmiştir. Her uzman, kriterlerin önem derecelerini küresel bulanık sayılar aracılığıyla ifade etmiştir. Elde edilen bulanık değerler, normalize edilerek nihai kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, hem uzman görüşlerinin çok boyutlu belirsizliklerini dikkate almakta hem de ağırlıkların sistematik ve şeffaf biçimde belirlenmesini sağlamaktadır (bkz. Çizelge 3). Eşitlik 3 kullanılarak uzmanların bireysel değerlendirmeleri birleştirilerek nihai küresel bulanık karar matrisi (kriter ağırlıkları) elde edilmiş ve Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3. Uzmanlara göre kriterlerin değerlendirilmesi ait nihai küresel bulanık karar matrisi (w_{ij}).
Table 3. Final global fuzzy decision matrix for the evaluation of criteria by experts ($\tilde{w}_{ij}$).

Uzmanlar / Kriterler *Experts / Criteria*	Küresel Bulanık Kriter Ağılıkları ($\tilde{w}_{ij}$) *Global Fuzzy Criterion Weights ($\tilde{w}_{ij}$)*
C1 (Fayda)	(0.719, 0.140, 0.050, 0.030)
C2 (Fayda)	(0.671, 0.160, 0.050, 0.030)
C3 (Fayda)	(0.654, 0.150, 0.050, 0.040)
C4 (Maliyet)	(0.311, 0.490, 0.050, 0.050)
C5 (Fayda)	(0.676, 0.190, 0.050, 0.040)
C6 (Fayda)	(0.799, 0.130, 0.050, 0.030)
C7 (Fayda)	(0.645, 0.180, 0.050, 0.030)
C8 (Maliyet)	(0.138, 0.500, 0.040, 0.020)

Adım 3: Küresel karar matrisinin normalize edilmesi. Bu adımda, kirterlerin fayda ve maliyet durumlarına göre (bkz. Çizelge 2) Eşitlik 4 ve Eşitlik 5 kullanılarak küresel normalize karar matrisi oluşturulmuş ve Çizelge 4'te sunulmuştur. Bu aşamada, normalizasyon işleminin nasıl gerçekleştirildiğini göstermek amacıyla, A4 alternatifinin C1 (fayda) ve C4 (maliyet) kriterleri açısından hesaplama süreci aşağıda sunulmuştur:

- ✓ C1 (Fayda) Kriteri için

Tüm alternatiflerde $max_i \mu_{ij}^{+} = 0.73$ ve $min_i \mu_{ij}^{-} = 0.16$ dır (bkz. Çizelge 2). Eşitlik 4'e göre A4 alternatifinin C1

kriterine göre normalizasyon işlemi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{\mu_{ij}^{+}}{max_i \mu_{ij}^{+}}, \frac{\mu_{ij}^{-}}{min_i \mu_{ij}^{-}}, \pi_{ij}, \tau_{ij}\right) = \left(\frac{0.67}{0.73}, \frac{0.20}{0.16}, 0.09, 0.06\right) = (0.92, .125, 0.09, 0.06)$ olarak hesaplanır.

✓ C4 (Maliyet) Kriteri için

Tüm alternatiflerde $min_i \mu_{ij}^{+} = 0.38$ ve $max_i \mu_{ij}^{-} = 0.52$ dır (bkz. Çizelge 2). Eşitlik 5'e göre A4 alternatifinin C4 kriterine göre normalizasyon işlemi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{min_i \mu_{ij}^{+}}{\mu_{ij}^{+}}, \frac{max_i \mu_{ij}^{-}}{\mu_{ij}^{-}}, \pi_{ij}, \tau_{ij}\right) = \left(\frac{0.38}{0.42}, \frac{0.52}{0.47}, 0.06, 0.04\right) = (0.90, 1.11, 0.06, 0.04)$ olarka hesaplanır.

Benzer işlemler, diğer tüm alternatif-kriter çiftleri için de uygulanmış olup, elde edilen normalizasyon değerleri Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 4. Küresel normalize edilmiş karar matrisi ($\tilde{r}_{ij}$).
Table 4. Global normalized decision matrix ($\tilde{r}_{ij}$).

Alternatifler / Kriterler *Alternatives / Criteria*	C1	C2	C3	C4
A1	(1.00, 1.00, 0.08, 0.06)	(1.00, 1.00, 0.07, 0.05)	(1.00, 1.00, 0.08, 0.06)	(1.00, 1.00, 0.06, 0.04)
A2	(0.96, 1.00, 0.09, 0.06)	(0.95, 1.23, 0.07, 0.05)	(0.94, 1.06, 0.08, 0.06)	(0.83, 1.18, 0.06, 0.04)
A3	(0.89, 1.31, 0.08, 0.06)	(0.74, 1.92, 0.08, 0.06)	(0.89, 1.28, 0.07, 0.07)	(0.76, 1.24, 0.05, 0.04)
A4	(0.92, 1.25, 0.09, 0.06)	(0.86, 1.69, 0.09, 0.07)	(0.94, 1.11, 0.09, 0.06)	(0.90, 1.11, 0.06, 0.04)
A5	(0.93, 1.25, 0.09, 0.06)	(1.00, 1.00, 0.07, 0.05)	(0.92, 1.22, 0.09, 0.06)	(0.70, 1.30, 0.05, 0.04)
Alternatifler / Kriterler *Alternatives / Criteria*	C5	C6	C7	C8
A1	(0.88, 1.31, 0.08, 0.06)	(0.92, 1.50, 0.06, 0.04)	(0.83, 1.00, 0.11, 0.06)	(1.00, 1.00, 0.06, 0.04)
A2	(0.89, 1.25, 0.07, 0.05)	(0.87, 1.88, 0.07, 0.05)	(0.92, 1.05, 0.11, 0.07)	(0.89, 1.09, 0.06, 0.04)
A3	(0.86, 1.56, 0.07, 0.05)	(1.00, 1.00, 0.04, 0.03)	(0.92, 1.18, 0.08, 0.06)	(0.82, 1.19, 0.05, 0.04)
A4	(0.89, 1.31, 0.07, 0.05)	(0.87, 2.00, 0.06, 0.05)	(0.94, 1.09, 0.09, 0.07)	(0.93, 1.04, 0.06, 0.04)
A5	(1.00, 1.00, 0.06, 0.04)	(0.81, 2.50, 0.06, 0.05)	(1.00, 1.00, 0.08, 0.06)	(0.79, 1.25, 0.05, 0.04)

Adım 4: Ağırlıklı küresel karar matrisinin hesaplanması. Bu adımda, Eşitlik 6 kullanılarak ağırlıklık küresel karar matiris hesaplanmış ve Çizelge 5'te sunulmuştur.

Çizelge 5. Ağırlıklı küresel karar matrisi ($\tilde{d}_{ij}$).
Table 5. Weighted global decision matrix ($\tilde{d}_{ij}$).

Alternatifler / Kriterler *Alternatives / Criteria*	C1	C2	C3	C4
A1	(0.72, 0.14, 0.08, 0.06)	(0.67, 0.16, 0.07, 0.05)	(0.65, 0.15, 0.08, 0.06)	(0.31, 0.49, 0.06, 0.04)
A2	(0.69, 0.14, 0.09, 0.06)	(0.64, 0.20, 0.07, 0.05)	(0.62, 0.16, 0.08, 0.06)	(0.26, 0.58, 0.06, 0.04)
A3	(0.64, 0.18, 0.08, 0.06)	(0.50, 0.31, 0.08, 0.06)	(0.58, 0.19, 0.07, 0.07)	(0.24, 0.61, 0.05, 0.04)
A4	(0.66, 0.18, 0.09, 0.06)	(0.58, 0.27, 0.09, 0.07)	(0.62, 0.17, 0.09, 0.06)	(0.28, 0.54, 0.06, 0.04)
A5	(0.67, 0.18, 0.09, 0.06)	(0.67, 0.16, 0.07, 0.05)	(0.60, 0.18, 0.09, 0.06)	(0.22, 0.64, 0.05, 0.04)
Alternatifler / Kriterler *Alternatives / Criteria*	C5	C6	C7	C8
A1	(0.60, 0.25, 0.08, 0.06)	(0.73, 0.20, 0.06, 0.04)	(0.54, 0.18, 0.11, 0.06)	(0.14, 0.50, 0.06, 0.04)
A2	(0.60, 0.24, 0.07, 0.05)	(0.70, 0.24, 0.07, 0.05)	(0.60, 0.19, 0.11, 0.07)	(0.12, 0.54, 0.06, 0.04)
A3	(0.58, 0.30, 0.07, 0.05)	(0.80, 0.13, 0.04, 0.03)	(0.60, 0.21, 0.08, 0.06)	(0.11, 0.60, 0.05, 0.04)
A4	(0.60, 0.25, 0.07, 0.05)	(0.70, 0.26, 0.06, 0.05)	(0.61, 0.20, 0.09, 0.07)	(0.13, 0.52, 0.06, 0.04)
A5	(0.68, 0.19, 0.06, 0.04)	(0.65, 0.33, 0.06, 0.05)	(0.65, 0.18, 0.08, 0.06)	(0.11, 0.63, 0.05, 0.04)

Adım 5: Fayda ve maliyet toplamlarının hesaplanması. Bu adımda, Çizelge 5'te yer alan veriler üzerinden fayda kriterleri için Eşitlik 7 ve maliyet kriterleri için Eşitlik 8 kullanılarak her alternatif için kriterlerin fayda ve maliyet değerleri hesaplanır. Bu aşamada örnek olması açısından Çizelge 5'te yer alan veriler üzerinden A1 alternatifi için C1 (fayda) ve C4 (maliyet) kriteri için örnek bir hesaplama aşağıda verilmiştir.

A1-C1 alternatifi-kriter çifti için

$S_{A1-C1}^{+} = \left(d_{ij}^{+} + \pi_{ij}\left(1 - \tau_{ij}\right)\right) = 0.72 + \left(0.08 \times (1 - 0.06)\right) = 0.794$

A1-C4 alternatifi-kriter çifti için

$S^{+}_{A1-C4} = \left(d^{-}_{ij} + \left(\pi_{ij} \times \tau_{ij}\right)\right) = 0.31 + (0.06 \times 0.04) = 0.313$

Çizelge 5'te yer alan veriler kullanılarak, fayda ve maliyet kriterleri için aynı prosedür izlenmiş; her bir alternatifin toplam fayda ve maliyet değerleri hesaplanarak sonuçlar Çizelge 6'da sunulmuştur.

Çizelge 6. Alternatifler için fayda ve maliyet toplamları (S_i^+, S_i^-).
Table 6. The total benefit and cost values for the alternatives (S_i^+, S_i^-).

Alternatifler *Alternatives*	Fayda Toplamı (S_i^+) *Total Benefit* (S_i^+)	Maliyet Toplamı (S_i^-) *Total Cost* (S_i^-)
A1	4.929	4.392
A2	4.797	4.254
A3	4.532	4.068
A4	4.745	4.204
A5	4.760	4.267

Adım 6: COPRAS nispi önem (Q_i) değerlerinin hesaplanması. Bu adımda, Eşitlik 9 kullanılarak her alternatif için COPRAS nispi önem (Q_i) değerleri hesaplanmış ve Çizelge 7'de sunulmuştur.

Çizelge 7. Alternatifler için hesaplanan COPRAS nispi önem değerleri (Q_i).
Table 7. Calculated COPRAS relative importance values for alternatives (Q_i).

Alternatifler *Alternatives*	Nispi Önem Değerleri (Q_i) *Relative Importance Values* (Q_i)
A1	9.014
A2	9.015
A3	8.942
A4	9.012
A5	8.965

Adım 7: Alternatifler için göreceli önem derecesi (P_i) değerinin hesaplanması. Bu adımda, Eşitlik 10 kullanılarak her alternatif için göreceli önem derecesi (P_i) değeri hesaplanmış ve Çizelge 8'de sunulmuştur.

Çizelge 8. Alternatiflerin göreli önem dereceleri (P_i).
Table 8. Relative importance degrees of the alternatives (P_i).

Alternatifler *Alternatives*	Hesaplama *Calculation*	Göreli Önem Değerleri (P_i) *Relative Importance Values* (P_i)
A1	9.014 / 9.015	0.9998
A2	9.015 / 9.015	1.0000
A3	8.942 / 9.015	0.9919
A4	9.012 / 9.015	0.9997
A5	8.965 / 9.015	0.9944

Adım 8: Alternatiflerin seçimi ve sıralanması. Bu adımda, bir önceki adımda hesaplanan P_i değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanarak alternatifler sıralanır. Buna göre alternatiflerin sıralama performansları A2 > A1 > A4 > A5 > A3 şeklinde olur.

BULGULAR VE YORUMLAR

Bu bölümde, önerilen SFN COPRAS yöntemi kapsamında gerçekleştirilen analizlerin sonuçları sunulmuştur. İlk olarak, uzman değerlendirmelerine dayalı olarak oluşturulan küresel bulanık karar matrisi kullanılarak fayda ve maliyet kriterleri için toplam skorlar hesaplanmıştır. Ardından, her alternatifin nispi önem dereceleri (Q_i) ve bunlara bağlı olarak göreceli önem dereceleri (P_i) elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, hem akıllı tarım dronları arasındaki performans farklarını hem de yöntemin karar verme sürecinde sunduğu ayrıştırıcı gücü ortaya koymaktadır. Ayrıca, COPRAS yönteminin küresel bulanık uzayda uygulanması, karar vericilerin belirsizlik altındaki değerlendirmelerinin daha gerçekçi biçimde modellenmesini amaçlanmıştır. Bu sayede, sonuçların hem nicel hem de nitel açıdan daha güvenilir ve tutarlı olması sağlanmıştır.

Çalışma kapsamında uzman değerlendirmelerine dayalı olarak oluşturulan küresel bulanık karar matrisi üzerinden fayda ve maliyet kriterleri için normalize edilmiş değerler hesaplanmıştır (bkz. Çizelge 2). Ardından, bu değerler kullanılarak her alternatifin fayda toplamı (S_i^+) ve maliyet toplamı (S_i^-) belirlenmiştir (bkz. Çizelge 9).

Elde edilen sonuçlara göre, fayda yönlü kriterlerde en yüksek skorun A2 (4.797) alternatifine ait olduğu, maliyet

yönlü kriterlerde ise A3'ün en düşük değere (4.068) sahip olduğu görülmüştür. Sonraki adımda, fayda ve maliyet toplamları dikkate alınarak alternatiflerin nispi önem dereceleri (Q_i) hesaplanmış, ardından bu değerler en yüksek Q_i değerine oranlanarak göreceli önem dereceleri (P_i) elde edilmiştir. Bu normalizasyon işlemi, alternatiflerin performanslarının birbirleriyle karşılaştırılabilir hale gelmesini sağlamıştır. Yapılan bu analizler sonucunda en yüksek göreceli önem derecesine ($P_i = 1.000$) sahip alternatifin A2 olduğu görülmüştür. Bu bulgu, A2 dronunun hem teknik hem de operasyonel kriterler açısından en uygun seçenek olduğunu göstermiştir. Diğer alternatiflerin göreceli önem dereceleri 0.9944–0.9998 aralığında yoğunlaşmış olup, bu da karar verme sürecinde alternatifler arasında orta düzeyde bir rekabet olduğunu ortaya koymuştur.

Çizelge 9. Nihai sıralama tablosu.
Table 9. Final ranking table.

Alternatifler *Alternatives*	Fayda Toplamı (S_i^+) *Total Benefit (S_i^+)*	Maliyet Toplamı (S_i^-) *Total Cost (S_i^-)*	Nispi Önem (Q_i) *Relative Importance (Q_i)*	Göreceli Önem (P_i) *Relative Significance (P_i)*	Sıra *Rank*
A1	4.929	4.392	9.014	0.9998	2
A2	4.797	4.254	9.015	1.0000	1
A3	4.532	4.068	8.942	0.9919	5
A4	4.745	4.204	9.012	0.9997	3
A5	4.760	4.267	8.965	0.9944	4

Elde edilen tüm bulgulara göre akıllı tarım dronu seçimi probleminde SFN COPRAS yaklaşımının belirsizlik altında karar verme süreçlerinde etkili ve dengeli sonuçlar üretebildiğini göstermiştir. Bulgular, hem fayda hem de maliyet yönlü kriterlerin bütünleşik biçimde değerlendirilmesinin alternatifler arasındaki performans farklarını daha hassas biçimde ortaya koyduğunu göstermiştir. Sonuçlara göre, A2 alternatifi, tüm alternatifler arasında en yüksek göreceli önem derecesine ($P_i = 1.000$) ulaşarak en uygun seçenek olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, A2'in özellikle C1 (Batarya Ömrü/Uçuş Süresi), C2 (Taşıma Kapasitesi), C6 (Veri Doğruluğu/Sensör Kalitesi) ve C7 (Çevresel Etki / Sürdürülebilirlik) kriterlerinde yüksek pozitif üyelik derecelerine sahip olmasından kaynaklandığı görülmüştür. Ayrıca A2'nin C4 (Satın Alma Maliyeti) ve C8 (Bakım Maliyeti) kriterlerinde en düşük negatif üyelik değerlerini (örneğin 0.26 ve 0.12) göstermesi, maliyet yönlü dezavantajları minimize etmiş ve toplam performans skorunu güçlendirmiştir (bkz. Çizelge 5).

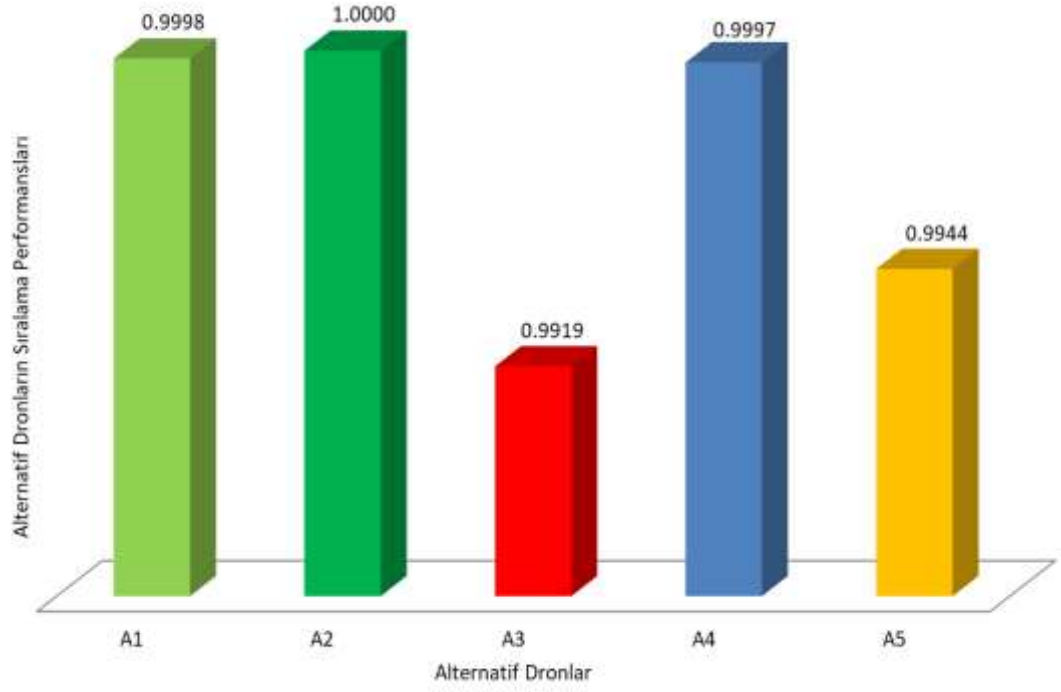
Diğer alternatiflerin göreceli önem dereceleri 0.9944–0.9998 aralığında yer almakta olup, bu durum alternatifler arasında görece yakın bir rekabet bulunduğunu ortaya koymuştur. Özellikle A1 ve A4 alternatifleri, C2 (Taşıma Kapasitesi) ve C3 (Menzil / Maksimum Uçuş Mesafesi) kriterlerinde yüksek performans göstermelerine rağmen, maliyet kriterlerindeki (C4, C8) yüksek negatif değerler nedeniyle nihai sıralamada A2'nin gerisinde kaldıkları görülmüştür (bkz. Çizelge 5).

A3 alternatifi, özellikle C6 (Veri Doğruluğu/Sensör Kalitesi) kriterinde (0.80, 0.13, 0.04, 0.03) gibi güçlü bir performans sergilemesine rağmen, C1 (Batarya Ömrü/Uçuş Süresi), C2 (Taşıma Kapasitesi / Ekipman Yükü), C3 (Menzil / Maksimum Uçuş Mesafesi) ve C5 (Bakım/Servis Kolaylığı) kriterlerinde nispeten zayıf kalmış; bu nedenle genel skorunda düşüş gözlemlenmiştir. A5 alternatifi ise kriterler arasında dengeli bir dağılım göstermesine rağmen, yüksek belirsizlik (π) ve yadsıma (τ) değerleri nedeniyle küresel skor fonksiyonunda nispi kayıp yaşadığı görülmüştür (bkz. Çizelge 5).

Çalışmamız kapamında elde edilen bulguların literatürdeki benzer çalışmalarla tutarlı olduğu görülmüştür. Oğuz (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, tarımsal işletmeler için drone seçimi yaparken, COPRAS yöntemini kullanarak alternatifleri değerlendirmiştir. Çalışmada, kriterler arası belirsizliklerin etkisi göz önünde bulundurularak, karar vericilerin daha bilinçli seçimler yapabilmesi sağlanmıştır (Oğuz, 2024). Ayrıca, Więckowski & Sałabun (2025), ÇKKV yöntemlerinin belirsiz ve çelişkili verilerle nasıl başa çıktığını incelemişlerdir. Çalışmalarında, COPRAS yönteminin, belirsizlikleri dikkate alarak daha sağlam kararlar alınmasına olanak tanıdığını belirtmişlerdir (Więckowski & Sałabun, 2025). Yine Boz (2025) tarafından yapılan bir çalışamda, tarımsal ilaçlama dronlarının seçiminde entegre bir bulanık model kullanarak, alternatiflerin performansını değerlendirmişlerdir. Bu tür entegre yaklaşımların, karar verme süreçlerinde daha kapsamlı analizler yapılmasına olanak tanıdığını göstermişlerdir (Boz, 2025). Sonuç olarak, çalışmamızın bulguları, COPRAS yönteminin tarımsal dron seçimi gibi çok kriterli ve belirsizlik içeren karar problemlerinde etkili bir araç olduğunu ve literatürdeki mevcut çalışmalarla tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Çalışma kapsamında elde edilen bulgular neticesinde alternatfileirn sıralama performansları Şekil 5'te verilmiştir.

SFN COPRAS Yöntemine Ait Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi, ÇKKV yöntemlerinde elde edilen sonuçların karar parametrelerindeki değişimlere ne kadar hassas olduğunu test etmek için kullanılır. Bu analiz, modelin güvenilirliğini ve önerilen çözümün kararlılığını değerlendirmeye olanak tanır. Özellikle küresel (spherical) bulanık COPRAS gibi belirsizlik içeren yaklaşımlarda, kriter ağırlıkları veya alternatiflerin performans değerlerinde küçük değişiklikler, nihai sıralamayı etkileyebilir. Bu sebepten ötürü tarafımızdan bu çalışmada uygulanan SFN COPRAS yönteminin etkinliğini göstermek amacıyla, duyarlılık analizi yapılmıştır. Yapılan bu analiz, modelin parametre değişikliklerine karşı ne kadar kararlı ve güvenilir olduğunu ortaya koyacaktır. Böylece elde edilen sıralamanın yalnızca belirli ağırlıklara veya performans değerlerine bağlı olup olmadığı anlaşılacak ve karar vericiler, önerilen alternatiflerin belirsizlikler karşısında dayanıklılığını güvenle gözlemleyebileceklerdir.



Şekil 5. Alternatif dronların sıralama performansları
Figure 5. Ranking performance of alternative drones

Çalışmada en önemli ilk üç kriter (fayda) olarak belirlenen (bkz. Çizelge 3) C1 (Batarya Ömrü / Uçuş Süresi), C2 (Taşıma Kapasitesi / Ekipman Yükü) ve C6 (Veri Doğruluğu / Sensör Kalitesi) ile birlikte bir maliyet kriteri olan C8 (Bakım Maliyeti) için duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Duyarlılık analizi her bir kriter için ayrı ayrı ele alınmış ve her bir kriterin ağırlığı bağımsız olarak sistematik şekilde azaltılıp artırılarak senaryolar oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra, modelin yalnızca kriter ağırlıklarına değil, aynı zamanda alternatiflerin performans değerlerindeki değişimlere karşı da duyarlılığını test etmek amacıyla, seçili kriterler altında bazı alternatiflerin küresel bulanık performans değerleri üzerinde ±%10 ve ±%20 oranlarında değişiklikler uygulanmıştır. Bu sayede önerilen modelin hem ağırlık hem de performans belirsizlikleri altındaki kararlılığı kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Bu çalışmada duyarlılık analizi, küresel bulanık ağırlıkların doğrudan ölçeklendirilmesi yerine, yalnızca üyelik derecesi (μ^+) bileşeni üzerinde kontrollü değişiklikler yapılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamda, her bir kriter için ağırlıklar -%30 ile +%30 aralığında değiştirilmiş ($\delta \in \{-0.30, -0.20, -0.10, -0.05, +0.05, +0.10, +0.20, +0.30\}$) ve diğer kriterlerin ağırlıkları toplamın 1 kalmasını sağlayacak şekilde oransal olarak yeniden normalize edilmiştir. Böylece her bir kriterin karar sonuçları üzerindeki etkisi bağımsız olarak analiz edilmiştir.

-Kriter ağırlıkları küresel bulanık sayılar biçiminde $\tilde{w}_j = (\mu^+, \mu^-, \pi, \tau)$ olarak ifade edildiğinden, duyarlılık analizi klasik yöntemlerde olduğu gibi ağırlıkların doğrudan keskin (crisp) değerler olarak artırılıp azaltılmasıyla değil, küresel bulanık yapıya uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, her bir seçili kriter için üyelik derecesi (μ^+) Eşitlik 11'de görüldüğü şekilde değiştirilmiştir:

$$\mu^+_{j,yeni} = \mu^+_{j,eski} \times (1 + \delta) \quad (11)$$

Üyelik derecesinde yapılan bu değişim sonrasında, küresel bulanık yapının korunabilmesi amacıyla diğer bileşenler (μ^-, π, τ) Eşitlik 12'de verildiği gibi orantısal olarak güncellenmiştir:

$$\mu^-_{j,yeni} = \mu^-_{j,eski} \times \frac{\mu^+_{j,yeni}}{\mu^+_{j,eski}}$$

$$\pi_{j,yeni} = \pi_{j,eski} \times \frac{\mu^+_{j,yeni}}{\mu^+_{j,eski}}$$

$$\tau_{j,yeni} = \tau_{j,eski} \times \frac{\mu^+_{j,yeni}}{\mu^+_{j,eski}} \quad (12)$$

Böylece aşağıdaki küresel bulanık kısıt korunmuştur:

$(\mu^+)^2 + (\mu^-)^2 + (\pi)^2 + (\tau)^2 \leq 1$

Son olarak, tüm kriter ağırlıkları karşılaştırılabilirliği sağlamak amacıyla Eşitlik 13'teki gibi normalize edilir:

$$w^*_j = \frac{\mu^+_{j,yeni}}{\sum^n_{j=1} \mu^+_{j,yeni}} \quad (13)$$

Bu süreç her bir kriter (C1, C2, C6 ve C8) için ayrı ayrı uygulanmış ve her kriter için sekiz farklı senaryo oluşturulmuştur. Elde edilen normalize edilmiş küresel bulanık kriter ağırlıkları Çizelge 10'da verilmiştir.

Çizelge 10'da verilen senaryo durumlarına göre alternatiflerin almış oldukları nihai skor değerleri (P_i) Çizelge 11'de verilmiştir.

Senaryo durumlarına göre alternatiflerin nihai skor değerlerindeki değişimler Şekil 6'da verilmiştir.

Duyarlılık analizi sonuçları, alternatiflerin nihai skorlarının (P_i) senaryo durumlarına göre nasıl değiştiğini göstermektedir. Yapılan analizler, alternatiflerin performans sıralamalarının büyük ölçüde stabil olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle A2 alternatifi, tüm senaryolar altında en yüksek nihai skora sahip olarak açık bir şekilde en iyi performansı göstermektedir. Bu durum, A2'in seçimi açısından yüksek bir güvenilirlik ve kararlılık düzeyi sağladığını göstermektedir.

Yapılan duyarlılık analizinde, kriter ağırlıklarının ±%30 aralığında değiştirilmesi durumunda alternatiflerin sıralamasındaki değişimler incelenmiştir. Sonuçlar, ağırlık varyasyonlarının genel sıralamayı önemli ölçüde etkilemediğini göstermiştir. Bu bulgu, modelin istatistiksel açıdan kararlı olduğunu ve COPRAS sonuçlarının yüksek güven aralığı içerisinde yer aldığını göstermektedir. Ayrıca varyans analizi kapsamında, kriter ağırlıklarındaki değişimlerin toplam karar skorlarına etkisi yeniden hesaplanmış ve alternatiflere ait varyans değerlerinin son derece düşük seviyede kaldığı $(\sigma^2 < 0.05)$ tespit edilmiştir. Özellikle tüm alternatifler için varyansın $10^{-7} - 10^{-9}$ aralığında olması, modelin senaryo değişimlerine karşı oldukça stabil olduğunu göstermektedir. Bu durum, geliştirilen yaklaşımın duyarlılığının sınırlı olduğunu ve elde edilen sıralama sonuçlarının yüksek düzeyde tutarlılık ve istatistiksel güvenilirlik taşıdığını doğrulamaktadır.

Çizelge 10. Senaryo durumlarına göre normalize edilmiş kriter ağırlıkları.
Table 10. Normalized criterion weights according to scenario cases.

Senaryolar (C1 e göre) *Scenarios (with respect to C1)*	S1 (-%30)	S2 (-%20)	S3 (-%10)	S4 (-%5)
C1	(0.642, 0.179, 0.064, 0.038)	(0.672, 0.164, 0.058, 0.035)	(0.697, 0.151, 0.054, 0.032)	(0.709, 0.145, 0.052, 0.031)
C2	(0.856, 0.204, 0.064, 0.038)	(0.856, 0.204, 0.064, 0.038)	(0.856, 0.204, 0.064, 0.038)	(0.856, 0.204, 0.064, 0.038)
C3	(0.835, 0.192, 0.064, 0.051)	(0.835, 0.192, 0.064, 0.051)	(0.835, 0.192, 0.064, 0.051)	(0.835, 0.192, 0.064, 0.051)
C4	(0.397, 0.625, 0.064, 0.064)	(0.397, 0.625, 0.064, 0.064)	(0.397, 0.625, 0.064, 0.064)	(0.397, 0.625, 0.064, 0.064)
C5	(0.863, 0.242, 0.064, 0.051)	(0.863, 0.242, 0.064, 0.051)	(0.863, 0.242, 0.064, 0.051)	(0.863, 0.242, 0.064, 0.051)
C6	(1.020, 0.166, 0.064, 0.038)	(1.020, 0.166, 0.064, 0.038)	(1.020, 0.166, 0.064, 0.038)	(1.020, 0.166, 0.064, 0.038)
C7	(0.823, 0.230, 0.064, 0.038)	(0.823, 0.230, 0.064, 0.038)	(0.823, 0.230, 0.064, 0.038)	(0.823, 0.230, 0.064, 0.038)
C8	(0.176, 0.637, 0.051, 0.025)	(0.176, 0.637, 0.051, 0.025)	(0.176, 0.637, 0.051, 0.025)	(0.176, 0.637, 0.051, 0.025)

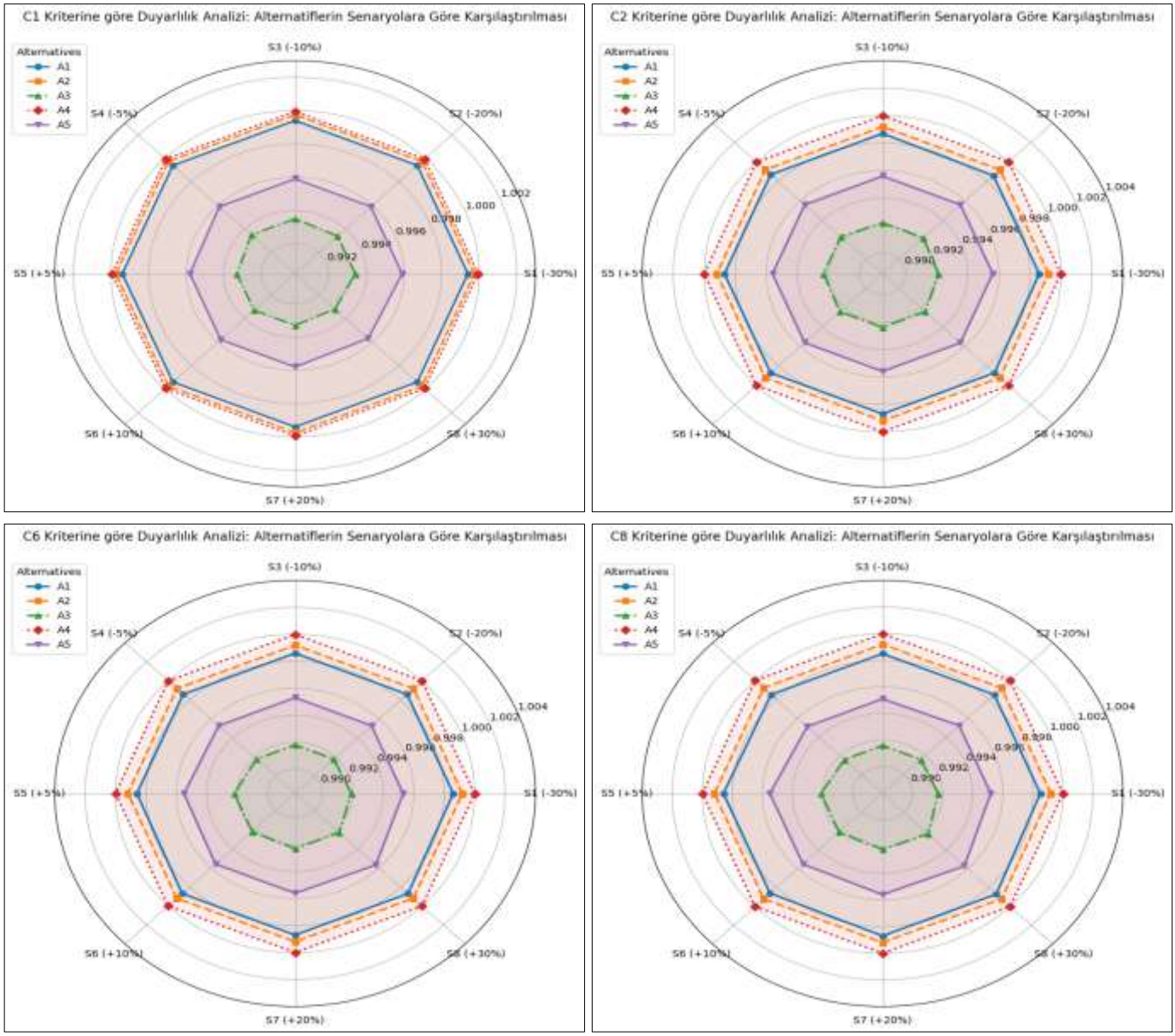
Senaryolar (C1 e göre) *Scenarios (with respect to C1)*	S5 (+%5)	S6 (+%10)	S7 (+%20)	S8 (+%30)
C1	(0.729, 0.135, 0.048, 0.029)	(0.738, 0.131, 0.047, 0.028)	(0.754, 0.122, 0.044, 0.026)	(0.769, 0.115, 0.041, 0.025)
C2	(0.835, 0.199, 0.062, 0.037)	(0.830, 0.197, 0.062, 0.037)	(0.820, 0.194, 0.061, 0.036)	(0.809, 0.191, 0.060, 0.036)
C3	(0.809, 0.186, 0.062, 0.049)	(0.804, 0.185, 0.062, 0.049)	(0.794, 0.182, 0.061, 0.048)	(0.784, 0.180, 0.060, 0.047)
C4	(0.385, 0.606, 0.062, 0.062)	(0.383, 0.604, 0.062, 0.062)	(0.378, 0.598, 0.061, 0.061)	(0.373, 0.592, 0.060, 0.060)
C5	(0.841, 0.236, 0.062, 0.049)	(0.836, 0.235, 0.062, 0.049)	(0.826, 0.232, 0.061, 0.048)	(0.815, 0.229, 0.060, 0.047)
C6	(0.995, 0.162, 0.062, 0.037)	(0.989, 0.161, 0.062, 0.037)	(0.978, 0.159, 0.061, 0.036)	(0.966, 0.157, 0.060, 0.036)
C7	(0.803, 0.224, 0.062, 0.037)	(0.798, 0.223, 0.062, 0.037)	(0.788, 0.220, 0.061, 0.036)	(0.778, 0.218, 0.060, 0.035)
C8	(0.172, 0.622, 0.050, 0.024)	(0.171, 0.621, 0.050, 0.024)	(0.169, 0.618, 0.049, 0.024)	(0.167, 0.614, 0.049, 0.023)
Senaryolar (C2 e göre) *Scenarios (with respect to C2)*	S1 (-%30)	S2 (-%20)	S3 (-%10)	S4 (-%5)
C1	(0.792, 0.167, 0.058, 0.035)	(0.787, 0.165, 0.058, 0.035)	(0.781, 0.163, 0.057, 0.034)	(0.778, 0.162, 0.057, 0.034)
C2	(0.554, 0.187, 0.058, 0.035)	(0.612, 0.171, 0.053, 0.032)	(0.665, 0.155, 0.051, 0.030)	(0.690, 0.148, 0.050, 0.029)
C3	(0.757, 0.164, 0.058, 0.046)	(0.751, 0.163, 0.057, 0.046)	(0.745, 0.162, 0.056, 0.045)	(0.742, 0.161, 0.056, 0.045)
C4	(0.358, 0.535, 0.058, 0.058)	(0.355, 0.534, 0.057, 0.057)	(0.352, 0.533, 0.056, 0.056)	(0.350, 0.532, 0.056, 0.056)
C5	(0.780, 0.209, 0.058, 0.046)	(0.774, 0.208, 0.057, 0.046)	(0.768, 0.207, 0.056, 0.045)	(0.765, 0.206, 0.056, 0.045)
C6	(0.925, 0.144, 0.058, 0.035)	(0.918, 0.143, 0.057, 0.034)	(0.911, 0.142, 0.056, 0.034)	(0.907, 0.141, 0.056, 0.034)
C7	(0.748, 0.194, 0.058, 0.035)	(0.742, 0.193, 0.057, 0.034)	(0.736, 0.192, 0.056, 0.034)	(0.733, 0.191, 0.056, 0.034)
C8	(0.160, 0.545, 0.047, 0.024)	(0.159, 0.544, 0.046, 0.023)	(0.157, 0.542, 0.046, 0.023)	(0.156, 0.541, 0.046, 0.023)
Senaryolar (C2 e göre) *Scenarios (with respect to C2)*	S5 (+%5)	S6 (+%10)	S7 (+%20)	S8 (+%30)
C1	(0.775, 0.148, 0.050, 0.029)	(0.770, 0.146, 0.050, 0.029)	(0.761, 0.142, 0.049, 0.028)	(0.752, 0.139, 0.049, 0.028)
C2	(0.716, 0.142, 0.050, 0.029)	(0.746, 0.136, 0.049, 0.028)	(0.792, 0.126, 0.047, 0.027)	(0.835, 0.118, 0.045, 0.026)
C3	(0.739, 0.157, 0.050, 0.041)	(0.734, 0.156, 0.050, 0.041)	(0.725, 0.154, 0.049, 0.040)	(0.716, 0.152, 0.049, 0.039)
C4	(0.349, 0.512, 0.050, 0.050)	(0.346, 0.510, 0.050, 0.050)	(0.341, 0.507, 0.049, 0.049)	(0.336, 0.504, 0.048, 0.048)
C5	(0.763, 0.199, 0.050, 0.041)	(0.758, 0.198, 0.050, 0.041)	(0.748, 0.196, 0.049, 0.040)	(0.738, 0.193, 0.049, 0.039)
C6	(0.903, 0.138, 0.050, 0.029)	(0.896, 0.137, 0.050, 0.029)	(0.885, 0.135, 0.049, 0.028)	(0.874, 0.133, 0.048, 0.028)
C7	(0.729, 0.187, 0.050, 0.029)	(0.724, 0.186, 0.050, 0.029)	(0.714, 0.184, 0.049, 0.028)	(0.704, 0.182, 0.048, 0.028)
C8	(0.156, 0.530, 0.044, 0.022)	(0.155, 0.529, 0.044, 0.022)	(0.153, 0.526, 0.043, 0.021)	(0.151, 0.522, 0.043, 0.021)

Senaryolar (C6 ya göre) *Scenarios (with respect to C6)*	S1 (-%30)	S2 (-%20)	S3 (-%10)	S4 (-%5)
C1	(0.742, 0.161, 0.058, 0.035)	(0.735, 0.160, 0.057, 0.034)	(0.728, 0.159, 0.056, 0.034)	(0.724, 0.158, 0.056, 0.033)
C2	(0.582, 0.186, 0.058, 0.035)	(0.575, 0.185, 0.057, 0.034)	(0.569, 0.184, 0.057, 0.034)	(0.566, 0.183, 0.056, 0.034)
C3	(0.752, 0.164, 0.058, 0.046)	(0.745, 0.163, 0.057, 0.046)	(0.739, 0.162, 0.056, 0.045)	(0.736, 0.161, 0.056, 0.045)
C4	(0.356, 0.534, 0.058, 0.058)	(0.352, 0.533, 0.057, 0.057)	(0.349, 0.532, 0.057, 0.057)	(0.347, 0.531, 0.056, 0.056)
C5	(0.775, 0.207, 0.058, 0.046)	(0.769, 0.206, 0.057, 0.046)	(0.764, 0.205, 0.056, 0.045)	(0.761, 0.204, 0.056, 0.045)
C6	(0.656, 0.147, 0.058, 0.035)	(0.714, 0.140, 0.056, 0.034)	(0.763, 0.135, 0.054, 0.033)	(0.786, 0.133, 0.053, 0.032)
C7	(0.747, 0.192, 0.058, 0.035)	(0.741, 0.191, 0.057, 0.034)	(0.736, 0.190, 0.056, 0.034)	(0.733, 0.189, 0.056, 0.034)
C8	(0.159, 0.535, 0.046, 0.024)	(0.158, 0.534, 0.046, 0.024)	(0.156, 0.532, 0.045, 0.023)	(0.155, 0.531, 0.045, 0.023)
Senaryolar (C6 ya göre) *Scenarios (with respect to C6)*	S5 (+%5)	S6 (+%10)	S7 (+%20)	S8 (+%30)
C1	(0.752, 0.140, 0.050, 0.029)	(0.746, 0.139, 0.050, 0.029)	(0.736, 0.137, 0.049, 0.028)	(0.726, 0.135, 0.049, 0.028)
C2	(0.689, 0.136, 0.050, 0.029)	(0.719, 0.131, 0.049, 0.028)	(0.764, 0.123, 0.047, 0.027)	(0.806, 0.116, 0.046, 0.026)
C3	(0.741, 0.150, 0.050, 0.041)	(0.736, 0.149, 0.050, 0.041)	(0.726, 0.147, 0.049, 0.040)	(0.717, 0.145, 0.049, 0.039)
C4	(0.335, 0.517, 0.050, 0.050)	(0.332, 0.515, 0.050, 0.050)	(0.327, 0.512, 0.049, 0.049)	(0.322, 0.509, 0.049, 0.049)
C5	(0.763, 0.199, 0.050, 0.041)	(0.757, 0.198, 0.050, 0.041)	(0.747, 0.196, 0.049, 0.040)	(0.737, 0.193, 0.049, 0.039)
C6	(0.824, 0.137, 0.050, 0.029)	(0.864, 0.135, 0.049, 0.029)	(0.942, 0.132, 0.048, 0.028)	(1.019, 0.129, 0.047, 0.028)
C7	(0.729, 0.188, 0.050, 0.029)	(0.724, 0.187, 0.050, 0.029)	(0.714, 0.185, 0.049, 0.028)	(0.704, 0.183, 0.048, 0.028)
C8	(0.156, 0.520, 0.044, 0.022)	(0.155, 0.519, 0.044, 0.022)	(0.153, 0.516, 0.043, 0.021)	(0.151, 0.512, 0.043, 0.021)
Senaryolar (C8 e göre) *Scenarios (with respect to C8)*	S1 (-%30)	S2 (-%20)	S3 (-%10)	S4 (-%5)
C1	(0.724, 0.161, 0.055, 0.033)	(0.718, 0.160, 0.054, 0.033)	(0.713, 0.159, 0.054, 0.032)	(0.710, 0.158, 0.053, 0.032)
C2	(0.579, 0.184, 0.058, 0.035)	(0.573, 0.183, 0.057, 0.035)	(0.568, 0.182, 0.057, 0.034)	(0.565, 0.181, 0.056, 0.034)
C3	(0.742, 0.161, 0.057, 0.045)	(0.736, 0.160, 0.057, 0.045)	(0.731, 0.159, 0.056, 0.044)	(0.728, 0.158, 0.056, 0.044)
C4	(0.350, 0.527, 0.057, 0.057)	(0.347, 0.526, 0.057, 0.056)	(0.344, 0.525, 0.056, 0.056)	(0.342, 0.524, 0.056, 0.056)
C5	(0.770, 0.205, 0.057, 0.045)	(0.764, 0.204, 0.057, 0.045)	(0.759, 0.203, 0.056, 0.044)	(0.756, 0.202, 0.056, 0.044)
C6	(0.651, 0.145, 0.057, 0.035)	(0.645, 0.144, 0.057, 0.035)	(0.640, 0.143, 0.056, 0.034)	(0.637, 0.142, 0.056, 0.034)
C7	(0.741, 0.190, 0.057, 0.035)	(0.735, 0.189, 0.057, 0.035)	(0.730, 0.188, 0.056, 0.034)	(0.727, 0.187, 0.056, 0.034)
C8	(0.092, 0.536, 0.038, 0.019)	(0.110, 0.535, 0.039, 0.019)	(0.124, 0.534, 0.039, 0.020)	(0.130, 0.533, 0.039, 0.020)

Senaryolar (C8 e göre) *Scenarios (with respect to C8)*	S5 (+%5)	S6 (+%10)	S7 (+%20)	S8 (+%30)
C1	(0.745, 0.139, 0.050, 0.029)	(0.739, 0.138, 0.050, 0.029)	(0.729, 0.136, 0.049, 0.028)	(0.719, 0.134, 0.049, 0.028)
C2	(0.682, 0.135, 0.050, 0.029)	(0.712, 0.130, 0.049, 0.028)	(0.756, 0.123, 0.047, 0.027)	(0.798, 0.116, 0.046, 0.026)
C3	(0.734, 0.149, 0.050, 0.040)	(0.729, 0.148, 0.050, 0.040)	(0.719, 0.146, 0.049, 0.039)	(0.710, 0.144, 0.049, 0.038)
C4	(0.331, 0.514, 0.050, 0.050)	(0.328, 0.512, 0.050, 0.050)	(0.323, 0.509, 0.049, 0.049)	(0.318, 0.506, 0.049, 0.049)
C5	(0.758, 0.197, 0.050, 0.041)	(0.752, 0.196, 0.050, 0.041)	(0.742, 0.194, 0.049, 0.040)	(0.732, 0.191, 0.049, 0.039)
C6	(0.819, 0.135, 0.050, 0.029)	(0.859, 0.133, 0.049, 0.029)	(0.937, 0.130, 0.048, 0.028)	(1.014, 0.127, 0.047, 0.028)
C7	(0.724, 0.186, 0.050, 0.029)	(0.719, 0.185, 0.050, 0.029)	(0.709, 0.183, 0.049, 0.028)	(0.699, 0.181, 0.048, 0.028)
C8	(0.145, 0.520, 0.039, 0.020)	(0.151, 0.519, 0.040, 0.020)	(0.162, 0.516, 0.041, 0.021)	(0.172, 0.512, 0.042, 0.022)

Çizelge 11. Senaryo durumlarına göre alternatiflerin nihai skor (P_i) değerleri.
Table 11. Final scores (P_i) of alternatives under scenario cases.

Senaryolar (C1 e göre) *Scenarios (with respect to C1)*	A1	A2	A3	A4	A5
S1 (-%30)	0.9999	1.0000	0.9934	0.9997	0.9954
S2 (-%20)	0.9999	1.0000	0.9934	0.9997	0.9954
S3 (-%10)	0.9999	1.0000	0.9935	0.9997	0.9954
S4 (-%5)	0.9999	1.0000	0.9935	0.9997	0.9954
S5 (+%5)	0.9999	1.0000	0.9933	0.9997	0.9953
S6 (+%10)	0.9999	1.0000	0.9933	0.9997	0.9953
S7 (+%20)	0.9999	1.0000	0.9933	0.9997	0.9953
S8 (+%30)	0.9999	1.0000	0.9932	0.9997	0.9952
Senaryolar (C2 ye göre) *Scenarios (with respect to C2)*	A1	A2	A3	A4	A5
S1 (-%30)	0.9998	1.0000	0.9925	0.9997	0.9949
S2 (-%20)	0.9998	1.0000	0.9926	0.9997	0.9949
S3 (-%10)	0.9999	1.0000	0.9926	0.9997	0.9949
S4 (-%5)	0.9999	1.0000	0.9927	0.9997	0.9949
S5 (+%5)	0.9999	1.0000	0.9927	0.9997	0.9949
S6 (+%10)	0.9999	1.0000	0.9928	0.9997	0.9949
S7 (+%20)	0.9999	1.0000	0.9928	0.9997	0.9949
S8 (+%30)	0.9999	1.0000	0.9928	0.9997	0.9949
Senaryolar (C6 ya göre) *Scenarios (with respect to C6)*	A1	A2	A3	A4	A5
S1 (-%30)	0.9998	1.0000	0.9923	0.9997	0.9946
S2 (-%20)	0.9998	1.0000	0.9922	0.9997	0.9946
S3 (-%10)	0.9998	1.0000	0.9922	0.9997	0.9946
S4 (-%5)	0.9998	1.0000	0.9922	0.9997	0.9946
S5 (+%5)	0.9998	1.0000	0.9926	0.9997	0.9948
S6 (+%10)	0.9999	1.0000	0.9926	0.9997	0.9949
S7 (+%20)	0.9999	1.0000	0.9927	0.9997	0.9949
S8 (+%30)	0.9999	1.0000	0.9927	0.9997	0.9950
Senaryolar (C8 e göre) *Scenarios (with respect to C8)*	A1	A2	A3	A4	A5
S1 (-%30)	0.9997	1.0000	0.9921	0.9997	0.9945
S2 (-%20)	0.9997	1.0000	0.9920	0.9997	0.9945
S3 (-%10)	0.9997	1.0000	0.9920	0.9997	0.9944
S4 (-%5)	0.9997	1.0000	0.9920	0.9997	0.9944
S5 (+%5)	0.9998	1.0000	0.9925	0.9997	0.9948
S6 (+%10)	0.9998	1.0000	0.9925	0.9997	0.9948
S7 (+%20)	0.9999	1.0000	0.9926	0.9997	0.9949
S8 (+%30)	0.9999	1.0000	0.9927	0.9997	0.9950



Şekil 6. Alternatiflerin, farklı senaryo durumları altında gösterdikleri sıralama performansları
Figure 6. Ranking performances of alternatives under different scenario conditions

Alternatif A3 ve A5'in nihai skorları, C1, C2, C6 ve C8 senaryoları altında yalnızca çok sınırlı düzeyde değişim göstermiştir. Özellikle A2'nin tüm senaryolarda 1.0000 değerini koruması, bu alternatifin model içerisinde tamamen stabil ve baskın bir performans sergilediğini göstermektedir. A3'te ise senaryolara bağlı olarak 0.9921–0.9935 aralığında çok küçük dalgalanmalar meydana gelmekte, ancak bu değişimler alternatifin göreli konumunu etkilememektedir. Benzer şekilde A4 ve A5 alternatiflerinin skorlarında da oldukça düşük seviyede değişimler gözlenmiştir. A4'ün tüm senaryolarda 0.9997 değerini koruması, bu alternatifin de tamamen kararlı bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. A5'te ise 0.9944–0.9954 aralığında minimal dalgalanmalar bulunmakta olup, bu değişimler sıralama yapısını değiştirecek düzeyde değildir.

Elde edilen bulgular, önerilen SFN-COPRAS yaklaşımının kriter ağırlıklarındaki (C1, C2, C6 ve C8) ±%30'a varan değişimlere karşı yüksek düzeyde dayanıklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Alternatiflerin genel performans yapısının büyük ölçüde korunması, modelin karar vericilere tutarlı ve güvenilir sonuçlar sunduğunu doğrulamaktadır. Bu durum, duyarlılık analizinin sonuçların kararlılığını desteklediğini ve yöntemin pratik uygulamalar açısından güçlü bir istikrar özelliğine sahip olduğunu göstermektedir. Özetle, yapılan duyarlılık analizi, alternatifler arasındaki göreli üstünlüklerin senaryo değişimlerinden etkilenmediğini açıkça ortaya koymakta; özellikle A2 ve A4'ün tam stabilitesi ile A3 ve A5'teki çok düşük oynaklık, modelin hem esnek hem de güvenilir bir karar yapısı sunduğunu doğrulamaktadır. Duyarlılık analizinde ayrıca varyans temelli istatistiksel

değerlendirme yapılmıştır. Alternatiflerin farklı senaryo koşullarında elde edilen skorları üzerinden gerçekleştirilen analizde, değişkenlik düzeyi klasik ANOVA çerçevesinde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda yapılan tek yönlü varyans analizi (One-way ANOVA) sonucunda:

- ✓ F-istatistiği: $F = 0.842$ $(p > 0.05)$
- ✓ Alternatifler arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir.

Bu sonuç, kriter ağırlıklarındaki değişimlerin alternatif sıralamaları üzerinde anlamlı bir farklılık oluşturmadığını ve modelin istatistiksel olarak kararlı (robust) olduğunu göstermektedir. Ek olarak, varyans değerlerinin tüm alternatiflerde $\sigma^2 < 0.05$ ve çoğunlukla $10^{-7} - 10^{-9}$ aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, modelin düşük varyanslı ve yüksek stabiliteye sahip olduğunu doğrulamıştır.

Alternatif Performans Duyarlılığı (A1-C6 Örneği)

Bu bölümde, yalnızca kriter ağırlıklarının değil, aynı zamanda alternatiflerin belirli bir kriter altındaki performans skorlarının değişimine bağlı olarak karar sonuçlarının ne kadar sağlam olduğunu test etmek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Duyarlıklık analizi olarak A1 alternatifinin C6 skorundaki ±10% ve -20% değişimi ele alınarak yapılmıştır. Alternatiflerin performans değerleri küresel bulanık sayılar $(\mu^+, \mu^-, \pi, \tau)$ biçiminde verildiğinden, duyarlılık analizinde yalnızca μ^+ bileşeni ağırlıklandırılmıştır. Diğer üç bileşen (μ^-, π, τ) mevcut değerleriyle bırakılmıştır ve COPRAS hesaplamasında referans olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, hem küresel bulanık mantığın temel felsefesine uygunluğu sağlar hem de alternatiflerin göreli önem derecelerinin hesaplanmasında karşılaştırılabilir sonuçlar üretir. Duyarlılık analizi kapsamında μ^+ değerine %10-20 değişim uygulanmış ve yapılan senaryolar Çizelge 12'de verilmiştir.

Çizelge 12. A1 alternatifinin C6 kriterine göre performans duyarlılığı
Table 12. Sensitivity of alternative A1 with respect to criterion C6 performance

Senaryo	Değişim Oranı (%)	A1-C6 Küresel Bulanık Skoru	Alternatiflerin Normalize Edilmiş Göreli Önem Değeri (P_i)				
			A1	A2	A3	A4	A5
S1	-20	(0.5840, 0.1600, 0.0480, 0.0320)	0.9980	1.0000	0.9916	0.9996	0.9944
S2	-10	(0.6570, 0.1800, 0.0540, 0.0360)	0.9989	1.0000	0.9918	0.9996	0.9944
S3	-5	(0.6935, 0.1900, 0.0570, 0.0380)	0.9993	1.0000	0.9918	0.9997	0.9944
S4	+5	(0.7665, 0.2100, 0.0630, 0.0420)	1.0000	0.9997	0.9917	0.9994	0.9941
S5	+10	(0.8030, 0.2200, 0.0660, 0.0440)	1.0000	0.9991	0.9912	0.9988	0.9935

Çizelge 12'de sunulan sonuçlar, A1 alternatifinin C6 kriterine ilişkin performansındaki değişimlerin genel karar sonuçlarına etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgulara göre, C6 kriterinde −%20 ile +%10 arasında yapılan değişiklikler A1'in küresel bulanık skorunda beklenen yönlü artış ve azalışlara neden olmakla birlikte, bu değişimlerin alternatiflerin normalize edilmiş göreli önem değerleri (P_i) üzerindeki etkisinin oldukça sınırlı olduğu görülmektedir.

Özellikle A1 alternatifinin P_i değeri, S1 senaryosunda 0.9980 iken artan senaryolarla birlikte kademeli olarak yükselerek S4 ve S5 senaryolarında 1.0000 seviyesine ulaşmaktadır. Bu durum, C6 kriterindeki iyileşmenin A1'in performansını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Ancak bu artışın oldukça küçük aralıklarda gerçekleşmesi, modelin yüksek derecede stabil olduğunu göstermektedir.

Diğer alternatifler incelendiğinde, A2'nin çoğu senaryoda 1.0000 değerini koruduğu, yalnızca yüksek artış senaryolarında çok sınırlı bir düşüş (0.9997 ve 0.9991) gösterdiği görülmüştür. A3 alternatifinin değerleri 0.9912–0.9918 aralığında oldukça dar bir bantta değişmekte, A4 ise 0.9988–0.9997 aralığında yüksek stabilite sergilemektedir. Benzer şekilde, A5 alternatifinin değerlerinin de 0.9935–0.9944 aralığında çok düşük dalgalanmalar gösterdiği görülmüştür.

Bu bulgular, C6 kriterine yönelik değişimlerin genel olarak model sonuçları üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermekle birlikte, belirli eşik değerlerinde (özellikle pozitif yönlü artış senaryolarında) üst sıralardaki alternatifler arasında yer değişimi meydana gelebileceğini ortaya koymuştur. Ancak bu değişimin yalnızca A1 ve A2 arasında gerçekleşmesi ve diğer alternatiflerin konumlarının korunması, modelin genel olarak yüksek bir

kararlılığa sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, A1 alternatifinin C6 kriterine göre duyarlılık analizi, SFN COPRAS yönteminin büyük ölçüde stabil ve güvenilir sonuçlar ürettiğini; ancak belirli senaryo koşullarında üst sıralardaki alternatifler arasında sınırlı yer değişimlerinin mümkün olabileceğini ortaya koymuştur. Bu durum, modelin hem duyarlı hem de gerçekçi bir karar destek yapısı sunduğunu göstermiştir.

Karşılaştırmalı Analiz ile Yöntem Geçerliliğinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, çalışma kapsamında önerilen SFN COPRAS yönteminin geçerliliği ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla karşılaştırmalı bir analiz sunulmuştur. Aynı kriter ağırlıkları ve normalize edilmiş karar matrisi temel alınarak, alternatiflerin sıralamaları küresel bulanık TOPSIS (SFN TOPSIS), küresel bulanık ARAS (SFN ARAS), küresel bulanık COBRA (SFN COBRA) ve küresel bulanık WASPAS (SFN WASPAS) yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışmamızda geliştirilen SF COPRAS yöntemi, alternatiflerin değerlendirilmesinde SFN ARAS, SFN COBRA ve SFN WASPAS yöntemleriyle benzer bir sıralama mantığına sahip olduğu için karşılaştırmalı analiz kapsamında tercih edilmiştir. Buna ek olarak, SFN TOPSIS yöntemi de literatürde yaygın kullanımına bağlı olarak karşılaştırma analizine dahil edilmiştir. Bu yaklaşım, önerilen yöntemin etkinliğini ve güvenilirliğini farklı küresel bulanık tabanlı çok kriterli karar verme yöntemleriyle kıyaslayarak ortaya koymak amacıyla uygulanmıştır. Bu yöntemler, önerilen yöntemin geçerliliğini destekleyen karşılaştırmalı analizler için seçilmiştir. Bu karşılaştırma, önerilen yöntemin elde ettiği sıralamaların farklı ÇKKV yöntemleriyle ne ölçüde tutarlı olduğunu ortaya koymak ve alternatiflerin sıralamalarındaki varyasyonları sistematik şekilde analiz etmek için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sıralamalar tablo ve istatistiksel göstergelerle sunulmuş olup, önerilen yaklaşımın güvenilir ve uygulanabilir bir karar destek aracı olarak etkinliği tartışılmıştır. Kullanılan yöntemlere göre alternatiflerin sıralama performansları Çizelge 13'te verilmiştir.

Çizelge 13. Önerilen yaklaşımın diğer ÇKKV yaklaşımları ile karşılaştırmalı analizi
Table 13. Comparative analysis of the proposed approach with other MCDM methods

Alternatifler	SFN COPRAS		SFN TOPSIS		SFN ARAS		SFN COBRA		SFN WASPAS	
	Nihai Skor Değeri	Sıralama Performansı	Nihai Skor Değeri	Sıralama Performansı	Nihai Skor Değeri	Sıralama Performansı	Nihai Skor Değeri	Sıralama Performansı	Nihai Skor Değeri	Sıralama Performansı
A1	0.9998	2	0.754	2	0.9976	3	0.1264	3	0.8697	2
A2	1.0000	1	0.790	1	1.0000	1	0.1189	1	0.8816	1
A3	0.9919	5	0.409	5	0.9921	5	0.1427	5	0.8420	5
A4	0.9997	3	0.504	4	0.9989	2	0.1215	2	0.8697	3
A5	0.9944	4	0.596	3	0.9948	4	0.1348	4	0.8562	4

Çizelge 13'te, çalışma kapsamında önerilen SFN COPRAS yöntemi ile SFN TOPSIS , SFN ARAS, SFN COBRA ve SFN WASPAS yöntemlerinden elde edilen alternatif sıralama performansları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, A2 alternatifi, hem önerilen SFN COPRAS yöntemi hem de karşılaştırmalı analizde yer alan tüm yöntemlerde birinci sırada yer almış ve sıralamadaki üstün konumunu tüm yöntemlerde koruduğu görülmüştür. Bu durum, A2 alternatifinin farklı ÇKKV yaklaşımları altında da yüksek performans sergilediğini göstermiştir. A1 ve A4 alternatifleri, yöntemler arasında sıralama farklılıkları göstermekte olup, genel olarak ikinci ve üçüncü konumlarda yer aldığı görülmüştür. A3 alternatifiise tüm yöntemlerde en düşük performansı göstererek son sırada yer almıştır. Çizelge 13 incelendiğinde, SFN COPRAS, SFN TOPSIS, SFN ARAS, SFN COBRA ve SFN WASPAS yöntemleri arasında genel olarak yüksek düzeyde sıralama uyumu olduğu görülmüştür. Tüm yöntemlerde A2 alternatifinin birinci sırada yer alması, önerilen yaklaşımın farklı karar verme teknikleri altında tutarlı ve güvenilir sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Bununla birlikte, yöntemler arasında yalnızca orta sıralarda (özellikle A1 ve A4 alternatifleri arasında) küçük farklılıklar gözlenmiştir. SFN COPRAS ve SFN TOPSIS yöntemleri karşılaştırıldığında, A4 ve A5 alternatiflerinin sıralama konumlarında sınırlı farklılıklar olduğu görülmüştür. SFN COPRAS yönteminde A4 alternatifinin A5'e göre daha yüksek bir performans gösterdiği görülürken, SFN TOPSIS yönteminde bu durumun tersine döndüğü gözlemlenmiştir. Bu farklılık, yöntemlerin temel hesaplama yaklaşımlarından kaynaklanmaktadır. SFN COPRAS yöntemi, alternatiflerin hem fayda hem de maliyet kriterleri açısından toplam göreli performansını dikkate alarak çok boyutlu bir değerlendirme gerçekleştirirken, SFN TOPSIS yöntemi alternatiflerin yalnızca ideal ve anti-ideal çözümlere olan geometrik uzaklıklarına odaklanmaktadır. Bu durum, özellikle birbirine yakın performans gösteren alternatiflerde küçük sıralama değişimlerine yol açabilmektedir.

Öte yandan, SFN COPRAS yöntemi, SFN ARAS, SFN COBRA ve SFN WASPAS yöntemleri ile yüksek düzeyde

benzerlik gösterdiği görülmektedir. Tüm bu yöntemlerde A2'nin açık ara birinci sırada yer alması ve A3'ün istikrarlı şekilde son sırada bulunması, önerilen modelin farklı ÇKKV yaklaşımları ile uyumlu ve kararlı bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu benzerlik, söz konusu yöntemlerin büyük ölçüde ağırlıklı toplam performans ve fayda-maliyet dengesine dayalı değerlendirme mekanizmaları kullanmasından kaynakladnığı söylenebilir.

Sonuç olarak, elde edilen bulgular önerilen SFN COPRAS yaklaşımının yalnızca kendi içinde değil, aynı zamanda farklı ÇKKV yöntemleri ile karşılaştırıldığında da yüksek düzeyde tutarlılık gösterdiğini ortaya koyduğu görülmüştür. SFN TOPSIS yönteminde gözlenen sınırlı farklılıklar ise yöntemin geometrik uzaklık temelli yapısından kaynaklanmakta olup, genel sıralama eğilimini değiştirecek düzeyde değildir. Bu durum, önerilen yaklaşımın karar verme sürecinde güvenilir, sağlam ve yöntemler arası uyumlu sonuçlar ürettiğini doğrulamaktadır. Farklı yöntemlerle elde edilen sıralamalar arasındaki ilişkinin nicel olarak değerlendirilmesi amacıyla Spearman Sıra Korelasyon Analizi uygulanmış ve sonuçlar Çizelge 14'te verilmiştir.

Çizelge 14. Yöntemler arası Sperman sıra korelasyon değerleri
Table 14. Inter-method correlation values

	SFN COPRAS	SFN TOPSIS	SFN ARAS	SFN COBRA	SFN WASPAS
SFN COPRAS	1.000				
SFN TOPSIS	0.900	1.000			
SFN ARAS	0.900	0.700	1.000		
SFN COBRA	0.900	0.700	1.000	1.000	
SFN WASPAS	1.000	0.900	0.900	0.900	1.000
Anlamlılık	$p < 0.001$				

Çizelge 14'e göre, SFN COPRAS yöntemi ile elde edilen sıralama sonuçları ile diğer ÇKKV yöntemlerinden elde edilen sıralama sonuçları arasında yüksek düzeyde tutarlılık gözlenmiştir. SFN COPRAS yöntemi özellikle SFN ARAS, SFN COBRA ve SFN TOPSIS yöntemleri ile güçlü bir uyum göstermiş olup, bu yöntemlerle arasındaki Spearman sıra korelasyon katsayılas $\rho = 0.900$ olarak hesaplanmıştır. SFN COPRAS ile SFN WASPAS yöntemi arasında ise mükemmel düzeyde korelasyon ($\rho = 1.000$) elde edilmiştir. Genel olarak, tüm yöntemler arasında elde edilen korelasyon katsayılarının 0.900 ile 1.000 aralığında değiştiği görülmüştür. Bu durum, farklı karar verme yöntemlerinin benzer sıralama eğilimleri ürettiğini ve sonuçların yüksek düzeyde tutarlı olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla doğrulama analizi, önerilen sıralama yapısının güvenilirliğini ve kararlılığını desteklediği görülmüştür. Bununla birlikte, Spearman sıra korelasyon katsayılarının istatistiksel güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla %95 güven aralığı (Confidence Interval, CI) yaklaşımı dikkate alınmıştır. Fisher Z dönüşümü kullanılarak yapılan değerlendirmede, korelasyon katsayılarının %95 güven aralığı içinde dar bir aralıkta yer aldığı ve 0.900–1.000 bandında stabil kaldığı görülmüştür. Elde edilen yüksek korelasyon değerleri ve sınırlı değişim aralığı ($\rho = 0.900 - 1.000$), yöntemler arası sıralama tutarlılığının istatistiksel olarak güçlü ve kararlı olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, korelasyon sonuçlarının güven aralığı içerisinde dar bir varyasyon sergilediği ve elde edilen bulguların istatistiksel olarak güvenilir olduğu doğrulanmaktadır. Ayrıca Spearman sıra korelasyon analizinde elde edilen tüm korelasyon katsayılarının istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir ($p < 0.001$). Bu nedenle, tüm korelasyon değerleri yüksek düzeyde güvenilir ve anlamlı ilişkiler göstermektedir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, Şanlıurfa ilinde tarım işletmeleri için drone seçiminde SFN COPRAS yöntemi uygulanmıştır. Öncelikle, sekiz uzman görüşüne başvurularak alternatif dronlar kriterlere göre küresel bulanık sayılar kullanılarak değerlendirilmiştir. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde de aynı prosedür uygulanmıştır. Sonrasında ise SFN COPRAS yönteminin işlem adımları uygulanarak alteriftfilerin sıralama performansları hesaplanmıştır (bkz. Çizelge 8). Çalışma kapsamında yapılan duyarlılık analizi sonuçları, alternatiflerin nihai skorlarının (P_i) senaryo durumlarına göre büyük ölçüde stabil olduğunu göstermiştir. Özellikle A2 alternatifi, tüm senaryolar altında en yüksek skoru elde ederek en uygun seçenek olarak öne çıkmıştır ($P_i = 1.000$). Diğer alternatiflerin skorlarında küçük dalgalanmalar gözlenmiş, ancak sıralama düzeni önemli ölçüde değişmemiştir. Bu durum, önerilen yöntemin karar verme sürecinde güvenilir ve tutarlı sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Çalışmamız tarımsal drone seçimi problemi kapsamında hem teorik hem de uygulamalı açılardan önemli katkılar sunmaktadır ve bulguların sektörel, akademik ve yönetimsel değerleri aşağıda detaylandırılmıştır:

1. Yöntemsel ve akademik katkılar:

- SFN COPRAS yöntemi, belirsiz ve çelişkili veri koşullarında alternatiflerin performanslarını küresel bulanık sayılar kullanarak karşılaştırma olanağı sağlamaktadır. Bu yaklaşım, Tip-1, Tip-2 ve diğer

bulanık küme türlerine kıyasla çok boyutlu belirsizlikleri modelleyebilmesi, literatürdeki yenilikçi uygulamalara bir örnek teşkil etmesi ve COPRAS gibi çok kriterli yöntemlerle entegre edilerek hesaplama ve yorum açısından uygulanabilirlik sunması açısından önemlidir.

- Çalışma, literatürde sınırlı sayıda örneği bulunan SFN COPRAS uygulamasına dair yeni bir örnek sunarak, hem karar verme modellerinin geliştirilmesine hem de bulanık veri analizi alanında metodolojik katkı sağlamaktadır (Turanoglu et al., 2016; Aydoğdu et al., 2023).
- Ayrıca, yapılan duyarlılık analizi ve alternatiflerin diğer ÇKKV yöntemleri ile karşılaştırılması, modelin sağlamlığını ve sıralama kararlılığını ortaya koymakta; böylece bilimsel olarak güvenilir ve tekrar üretilebilir sonuçlar elde edilmektedir.

2. Sektörel ve pratik katkılar:

- Tarım işletmeleri açısından, drone seçimi gibi stratejik karar süreçlerinde, alternatiflerin teknik ve operasyonel performanslarıyla maliyet ve sürdürülebilirlik kriterlerini bütünleştirerek güvenilir bir rehber sunmaktadır.
- Kriter ağırlıkları ve senaryo değişikliklerinin performansa etkisi sistematik olarak analiz edilerek, karar vericilerin farklı koşullar altında bile esnek ve bilinçli seçimler yapmasına olanak tanımaktadır.
- Özellikle A1 alternatifi gibi yüksek performanslı seçeneklerin belirlenmesi, kaynak kısıtlamaları, maliyet ve lojistik sınırlamalar göz önünde bulundurularak stratejik planlama ve operasyonel yönetim kararlarını optimize etmektedir.

3. Yönetimsel katkılar:

- Çalışma, karar vericilere, belirsizlik altında bile alternatiflerin göreli üstünlüklerini ve risklerini görme olanağı sunmaktadır. Bu sayede tarımsal teknoloji yatırımlarında stratejik karar alma süreçleri desteklenmektedir.
- Alternatiflerin performanslarının senaryolara göre değişimlerinin incelenmesi, risk ve belirsizlik yönetimi açısından yönetsel planlamaya katkı sağlamaktadır.
- Çalışmada ele alınan yaklaşım, karar vericilerin yalnızca tek bir kritere değil, çok kriterli ve bütüncül bir değerlendirmeye dayalı olarak karar vermelerini mümkün kılmakta ve sektörel uygulamalarda güvenilirliği artırmaktadır.

Özetle, bu çalışma:

- SFN-COPRAS ve küresel bulanık sayıların uygulanabilirliğini tarım teknolojileri alanına taşımakta,
- Alternatifler arasında güvenilir ve ayrıştırıcı sıralama performansı sunmakta,
- Karar vericilere stratejik ve operasyonel süreçlerde yol gösterici bir rehber sağlamakta,
- Literatürdeki metodolojik boşlukları doldurmaktadır.

Bu yönleriyle çalışmanın, akademik, sektörel ve yönetimsel açıdan özgün ve önemli katkılar sunduğu kanaatindeyiz.

Ayrıca çalışmamız kapsamında yapılan duyarlılık analizleri, alternatiflerin performanslarının senaryolardaki değişikliklere karşı dayanıklılığını göstermiştir. A2 alternatifi, tüm senaryolar altında en yüksek skoru koruyarak kararın sağlamlığını desteklemiştir. Diğer alternatifler, küçük performans değişiklikleri sergilemiş olsalar da genel sıralama düzeni korunmuştur. Bu sonuçlar, modelin karar vericiler için güvenilir ve öngörülebilir olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmanın bulguları, tarım işletmeleri için drone seçiminde stratejik karar süreçlerini doğrudan bilgilendirebilecek niteliktedir. Duyarlılık analizi sonuçları, A2 alternatifinin tüm senaryolar altında en yüksek nihai skoru koruduğunu göstermiştir; bu durum, A2'nin farklı koşullar altında bile üstün performans sergilediğini ve karar vericiler için güvenilir bir seçim olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, tarım işletmeleri drone seçiminde öncelikli olarak A2 alternatifini dikkate almalıdır. A1 alternatifinin nihai skorları (bkz. Çizelge 12), tüm senaryolar boyunca A1'in gerisinde kalmakla birlikte, yalnızca küçük değişimler göstermektedir. Bu durum, A1'in performansının farklı senaryo koşullarına karşı nispeten stabil olduğunu ortaya koymaktadır. Karar vericiler için, A1 alternatifi esnek bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Özellikle maliyet, erişilebilirlik veya teknik sınırlamalar nedeniyle A2'nin tercih edilemediği durumlarda güvenilir bir ikinci seçenek olarak düşünülebilir. A4 alternatifi, farklı senaryolarda küçük değişimler göstermesine rağmen genel sıralamadaki konumunu önemli ölçüde etkilememiştir. Bu durum, A4'ün belirli çevresel veya operasyonel değişikliklere karşı dayanıklı olduğunu ve karar vericilere planlama esnekliği sunduğunu göstermektedir. Özellikle kaynak kısıtlamaları veya diğer operasyonel sınırlamalar göz önünde bulundurulduğunda A,4 alternatifi uygulanabilir bir seçenek olarak üçüncü sırada öne çıkmaktadır. A5 ve A3 alternatiflerinin sıralamada dördüncü ve beşinci sırada yer almasının temel nedeni, nihai skorlarının (P_i) diğer alternatiflere kıyasla daha düşük olmasıdır. Duyarlılık analizi sonuçları, bu alternatiflerin performans skorlarının senaryo değişikliklerine karşı sınırlı bir esnekliğe sahip olduğunu ve belirli

kriterler açısından A1, A2 ve A4'ün gerisinde kaldığını göstermektedir. Özellikle A3, bazı kriterlerde orta düzey performans sergilerken (C4, C7, C8), A5 belirli kritik kriterlerde (C3, C6) düşük skorlar almıştır (bkz. Çizelge 5). Bu durumda, her iki alternatifin genel sıralamasını olumsuz etkilediği görülmüştür. Bu bulgu, A3 ve A5'in karar vericiler açısından daha az öncelikli seçenekler olduğunu ve belirli operasyonel veya stratejik koşullar altında ancak diğer yüksek performanslı alternatiflerin mevcut olmadığı durumlarda değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Ayrıca, SFN COPRAS yöntemi, kriter ağırlıkları ve belirsizlik içeren veri koşulları altında alternatiflerin performanslarını sistematik ve güvenilir bir şekilde karşılaştırmaya olanak tanır. Bu durum, karar vericilerin, belirsizlik ortamlarında bile sağlam ve bilgiye dayalı seçimler yapabilmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla, tarım sektöründeki yöneticiler ve politika yapıcılar, bu yöntemi kullanarak yatırım ve teknoloji seçim süreçlerini optimize edebilir ve stratejik kararlarının risklerini minimize edebilir. Ayrıca elde edilen bulgular, hem kısa vadeli operasyonel kararlar hem de uzun vadeli stratejik planlamalar açısından A1 alternatifinin öncelikli olarak değerlendirilmesini önermekte, aynı zamanda belirsizlik altında karar almayı destekleyen SFN COPRAS yönteminin pratik uygulamalar için uygunluğunu doğrulamaktadır.

Bu çalışmanın ampirik bulguları, SFN-COPRAS yönteminin uygulanması ile yapılan kapsamlı senaryo bazlı duyarlılık analizi literatürdeki ÇKKV yaklaşımlarının belirsizlik koşullarındaki davranışıyla tutarlı olduğu görülmüştür. Öncelikle, A2 alternatifinin tüm senaryolar altında sürekli olarak en yüksek nihai skoru ($P_i = 1.000$) koruması, COPRAS tabanlı ve küresel bulanık modellerin girdi verilerindeki küçük değişimlere karşı sıralama stabilitesini destekleyen literatürle örtüşmektedir. Örneğin Cetinkaya et al. (2022), arsa yerleşimi sorununda aralık tip-2 bulanık AHP + COPRAS yaklaşımı kullanarak ağırlık değişimlerinin sıralama üzerindeki etkisini test etmiş ve sıralamalarda önemli sapmalar gözlenmediğini raporlamışlardır. Aynı şekilde tarım sektörü özelinde insansız hava araçları (drone) seçiminde yapılan çalışmalarda da çok kriterli bulanık yaklaşımlar kullanılarak stabil sıralamalar elde edildiği görülmüştür. Örneğin, Boz (2025) tarafından yapılan çalışmada, yük kapasitesi, kullanım kolaylığı ve uçuş süresi gibi kriterlerin ağırlıklandırılmasıyla en uygun drone alternatifi belirlenmiş ve duyarlılık analizinde sıralama değişimleri sınırlı kalmıştır. Bu bulgu, bizim çalışmamızda olduğu gibi A2 alternatifinin üstün sıralamasının yalnızca tek bir kritere bağlı olmadığını, çok kriterli değerlendirme sonucunda istikrarlı bir tercih olduğunu destekler niteliktedir.

Duyarlılık analizine ilişkin metodolojik literatürde de senaryo kontrolü uygulamalarının bulguların güvenilirliğini artırdığı vurgulanmaktadır. Więckowski (2025) tarafından yapılan çalışmada, değişken ağırlık veya veri perturbasyonları altında hangi sıralamaların kararlılık gösterdiğinin tespit edilmesinin kritik olduğunu belirtilmektedir. Bu bağlamda, A3 ve A5'in dört ve beşinci pozisyonlarda kalması, özellikle belli kriterlerde düşük performans gösterdikleri için, radikal ağırlık değişiklikleri olmadıkça sıralama dışına çıkmadıklarına dair literatürde öngörülen davranışla paralellik arz etmektedir. Ayrıca, bulanık ağırlık belirleme yöntemleri ile COPRAS ve türevi sıralama tekniklerini birleştiren uygulamalı çalışmalarda, duyarlılık analizlerinde yalnızca küçük sıra değişimleri raporlanmakta ve bu değişimlerin yönetsel önerileri değiştirmediği vurgulanmaktadır (Briscilla & Rajan, 2024). Bu tür çalışmalar kapsamında, karar vericilere A2 alternatifini öncelikli tercih olarak değerlendirmeleri; operasyonel sınırlamalar veya maliyet kısıtları söz konusu olduğunda ise A1 ve A4 alternatiflerini yedek seçenekler olarak göz önünde bulundurmaları önerilir. Bu literatür örnekleri, çalışmamızın A2 > A1 > A4 > A5 > A3 sıralamasının hem analitik hem de uygulamalı açıdan savunulabilirliğini güçlendirmektedir.

Sonuç olarak, elde edilen bulgular ile yaygın ÇKKV literatürü arasındaki uyuşum, iki önemli tezimizi destekler niteliktedir:

- SFN COPRAS modeli, gerçekçi belirsizlik senaryolarında karar destek sistemi olarak yüksek düzeyde robust (sağlam) sonuçlar verdiği,
- Oluşan sıralama (A2 > A1 > A4 > A5 > A3), sayısal kararsızlıkların ötesinde anlamlı çok kriterli farklılıkları yansıttığı söylenebilir.

Politika ve uygulayıcı perspektifinden bakıldığında ise A2 öncelikli alternatif olarak ele alınmalı; ancak bütçe, lojistik, teknik erişim gibi kısıtlar nedeniyle A2'nin kullanılamadığı durumlarda A1 ve A4 gibi geçerli yedek alternatifler planlanmalıdır.

Uygulama Sınırlılıkları

Bu çalışmanın sınırlılıkları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Veri seti belirli sayıda kriter ve alternatif ile sınırlıdır. Daha geniş veri setleri ile sonuçlar farklılık gösterebilir.
- Analizde yalnızca belirli senaryo varyasyonları değerlendirilmiştir. Diğer çevresel veya ekonomik senaryoların etkisi incelenmemiştir.

- SFN COPRAS yöntemi, karmaşık veri kümelerinde hesaplama yoğunluğu gerektirebilir.

Gelecek Araştırma Önerileri

Gelecek çalışmalar için öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- Analizler daha fazla kriter ve alternatif ile genişletilebilir. Özellikle maliyet, bakım ve çevresel etkiler gibi ek kriterler eklenebilir.
- Farklı bulanık mantık tabanlı yöntemler veya hibrit karar destek sistemleri ile karşılaştırmalı çalışmalar yapılabilir.
- Gerçek zamanlı veri ve IoT (nesnelerin interneti) tabanlı tarım uygulamaları ile entegrasyon, modelin uygulanabilirliğini artırabilir.
- Dinamik ağırlıklandırma: Bu çalışmada kriter ağırlıkları uzman görüşlerine dayalı olarak statik biçimde belirlenmiştir. Ancak tarımsal uygulamalar; mahsul türü (örneğin pamuk, buğday), mevsimsel koşullar ve hava durumu gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, gelecekte kriter ağırlıklarının bu değişkenlere bağlı olarak güncellenebildiği dinamik ağırlıklandırma yaklaşımlarının geliştirilmesi önerilebilir.
- Derin öğrenme entegrasyonu: Mevcut çalışmada alternatiflerin performans değerleri uzman değerlendirmelerine dayanmaktadır. Gelecek çalışmalarda, dronlar tarafından elde edilen saha verileri (örneğin püskürtme homojenliği, bitki sağlığı indeksleri ve görüntü analizleri) kullanılarak alternatif performanslarının otomatik olarak belirlenmesi mümkün olacaktır. Bu kapsamda, küresel bulanık parametreleri $(\mu^+, \mu^-, \pi, \tau)$ veri temelli olarak üretebilen derin öğrenme modellerinin entegrasyonu önerilebilir.
- Zamansal boyutun entegrasyonu: Bu çalışma tek zamanlı bir değerlendirme yaklaşımı sunmaktadır. Ancak dron performansı; bakım süreçleri, batarya ömrü, yazılım güncellemeleri ve kullanım yoğunluğu gibi faktörlere bağlı olarak zaman içinde değişmektedir. Bu nedenle, gelecekte zamana bağlı (dinamik) çok kriterli karar verme yaklaşımlarının veya süreç madenciliği tekniklerinin kullanıldığı modellerin geliştirilmesi önerilebilir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar/Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Etik Kurul Beyanı

Bu çalışma, herhangi bir canlı üzerinde deneysel bir uygulama, insan katılımcılardan veri toplama veya kişisel verilerin kullanımı içermediğinden etik kurul onayı gerektirmemektedir. Çalışma kapsamında yalnızca literatür verileri, ikincil kaynaklardan elde edilen bilgiler ve nicel değerlendirmelere dayalı analizler yapılmıştır. Bununla birlikte, "Küresel (Spherical) Bulanık COPRAS ile Akıllı Tarım Dronu Seçimi: Çok Kriterli Belirsiz Karar Problemi" başlıklı çalışma için Kilis 7 Aralık Üniversitesi Etik Kurulu tarafından 06.03.2026 tarihli ve 2026/6 sayılı toplantısında değerlendirme yapılmış olup, çalışmanın etik açıdan uygun olduğuna dair etik kurul kararı alınmıştır.

KAYNAKLAR

Agrawal, J., & Arafat, M. Y. (2024). Transforming Farming: A Review of AI-Powered UAV Technologies in Precision Agriculture. *Drones (2504-446X)*, *8*(11), 664. https://doi.org/10.3390/drones8110664

Alamoodi, A., Garfan, S., Deveci, M., Albahri, O. S., Albahri, A. S., Yussof, S., ... & Moslem, S. (2024). Evaluating agriculture 4.0 decision support systems based on hyperbolic fuzzy-weighted zero-inconsistency combined with combinative distance-based assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*, *227*, 109618. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109618

Arza-García, M., & Burgess, A. J. (2022). Drones in the sky: towards a more sustainable agriculture. *Agriculture*, *13*(1), 84. https://doi.org/10.3390/agriculture13010084

Aydoğdu, E., Aldemir, B., Güner, E., & Aygün, H. (2023). A novel entropy measure with its application to the COPRAS method in complex spherical fuzzy environment. *Informatica*, *34*(4), 679-711. https://doi.org/10.15388/23-INFOR539

Azim, A. B., ALoqaily, A., Ali, A., Ali, S., Mlaiki, N., & Hussain, F. (2023). Industry 4.0 project prioritization by using q-spherical fuzzy rough analytic hierarchy process. *AIMS Mathematics*, *8*(8), 18809-18832.

Boz, E. (2025). Evaluation for the selection of agricultural spraying drones using p, q-Quasirung orthopair fuzzy

logic and multi-criteria methods. *Scientific Reports*, *15*(1), 27606. https://doi.org/10.1038/s41598-025-11656-w

Briscilla S, J., & Rajan, R. S. (2024). The Impact of Sensitivity Analysis on Multi-Criteria Decision Making: Implications for Location Selection Performance. *Journal of Management Information and Decision Sciences, 27*(S4), 1-16.

Calderone, G., Ferro, M. V., & Catania, P. (2025). A systematic literature review on recent unmanned aerial spraying systems applications in orchards. *Smart Agricultural Technology*, *10*, 100708. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100708

Cavalaris, C., Tagarakis, A. C., Kateris, D., & Bochtis, D. (2023). Cost analysis of using UAV sprayers for olive fruit fly control. *AgriEngineering*, *5*(4), 1925-1942. https://doi.org/10.3390/agriengineering5040118

Cetinkaya, C., Özkan, B., Özceylan, E., & Haffar, S. (2022). An eco-friendly evaluation for locating wheat processing plants: an integrated approach based on interval type-2 fuzzy AHP and COPRAS. *Soft Computing-A Fusion of Foundations, Methodologies & Applications*, *26*(9), 4081-4102.

Del Cerro, J., Cruz Ulloa, C., Barrientos, A., & de León Rivas, J. (2021). Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey. *Agronomy*, *11*(2), 203. https://doi.org/10.3390/agronomy11020203

Delavarpour, N., Koparan, C., Nowatzki, J., Bajwa, S., & Sun, X. (2021). A technical study on UAV characteristics for precision agriculture applications and associated practical challenges. *Remote sensing*, *13*(6), 1204. https://doi.org/10.3390/rs13061204

Dikopoulou, Z., Nápoles, G., Papageorgiou, E., & Vanhoof, K. (2017). A modified fuzzy TOPSIS method aggregating partial rankings for companies' attractiveness. In *The application of fuzzy logic for managerial decision making processes: Latest research and case studies* (pp. 59-71). Cham: Springer International Publishing.

DJI. (2021). *Agras T30 - A new digital flagship for agriculture*. DJI. Erişim adresi: https://www.dji.com/t30

Dong, H., Ma, X., & Zhang, S. (2025). Multi-Flight Path Planning for a Single Agricultural Drone in a Regular Farmland Area. *Sustainability*, *17*(6), 2433. https://doi.org/10.3390/su17062433

Dorling, K., Heinrichs, J., Messier, G. G., & Magierowski, S. (2016). Vehicle routing problems for drone delivery. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, *47*(1), 70-85.

Ertürk, A., Doğar, D., & Çiçek, A. (2026). Determining the Attitudes of Agricultural Engineer Candidates Towards Digitalization in Agriculture with Factor Analysis: The Case of Tokat Gaziosmanpasa University. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, *29*(2), 475-486. https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.1740494

Eryılmaz, G. A., & Kılıç, O. (2018). Türkiye'de sürdürülebilir tarım ve iyi tarım uygulamaları. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, *21*(4), 624-631. https://doi.org/10.18016/ksudobil.345137

Fan, J., Han, D., & Wu, M. (2022). T-spherical fuzzy COPRAS method for multi-criteria decision-making problem. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, *43*(3), 2789-2801. https://doi.org/10.3233/JIFS-213227

Ganie, A. H., & Dutta, D. (2025). Application of a spherical fuzzy entropy measure in the selection of the best hazardous waste transportation firm. *Journal of Industrial and Management Optimization*, *21*(5), 3943-3959.

Gao, K., Liu, T., Rong, Y., Simic, V., Garg, H., & Senapati, T. (2024). A novel BWM-entropy-COPRAS group decision framework with spherical fuzzy information for digital supply chain partner selection. *Complex & Intelligent Systems*, *10*(5), 6983-7008. https://doi.org/10.1007/s40747-024-01500-5

Ghorabaee, M. K., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2017). A new multi-criteria model based on interval type-2 fuzzy sets and EDAS method for supplier evaluation and order allocation with environmental considerations. *Computers & Industrial Engineering, 112*, 156-174. https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.08.017

Göncü, K. K. (2024). Çeltik Üreticilerinin Tarımsal İlaçlamada Kullandıkları Dron Tercihlerini Etkileyen Faktörlerin Değerlendirilmesi. *JOEEP: Journal of Emerging Economies and Policy*, *9*(2), 38-46.

Guebsi, R., Mami, S., & Chokmani, K. (2024). Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges. *Drones*, *8*(11), 686. https://doi.org/10.3390/drones8110686

Güner, E., Aldemir, B., Aydoğdu, E., & Aygün, H. (2025). Novel Hamacher aggregation operators with applications to the AHP-COPRAS method for spherical fuzzy environment. *Neural Computing and Applications*, 1-50. https://doi.org/10.1007/s00521-025-11167-9

Gurmani, S. H., Garg, H., Zulqarnain, R. M., & Siddique, I. (2023). Selection of unmanned aerial vehicles for precision agriculture using interval-valued q-rung orthopair fuzzy information based TOPSIS method. *International Journal of Fuzzy Systems*, *25*(8), 2939-2953. https://doi.org/10.1007/s40815-023-01568-0 https://doi.org/10.48550/arXiv.1205.5098

Grbović, Ž., Ivošević, B., Budjen, M., Waqar, R., Pajević, N., Ljubičić, N., ... & Panić, M. (2025). Integrating UAV multispectral imaging and proximal sensing for high-precision cereal crop monitoring. *PLoS One*, *20*(5), e0322712. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322712

İnan, M., & Karci, A. (2025). Drone tabanlı tarımsal operasyonlarda hız ve yüksekliğin enerji tüketimine etkisi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *28*(2), 674-689.

Jackson, J., Ladino, K., & Abdulai, G. (2021). Decision aid for estimating the cost of using a drone in production agriculture. *University of Kentucky College of Agriculture, Food and Environment Cooperative Extension Service*, 1-9.

Keskin, M. (2025, 10 Nisan). Yerli yazılımla üretilen zirai ilaçlama dronu çiftçinin hayatını kolaylaştırıyor. Anadolu Ajansı. Erişim adresi: https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/yerli-yazilimla-uretilen-zirai-ilaclama-dronu-ciftcinin-hayatini-kolaylastiriyor/3533689

Kizielewicz, B., Wątróbski, J., & Sałabun, W. (2025). Multi-criteria decision support system for the evaluation of UAV intelligent agricultural sensors. *Artificial Intelligence Review*, *58*(7), 194. https://doi.org/10.1007/s10462-025-11201-1

Kutlu Gündoğdu, F., & Kahraman, C. (2019, July). Spherical fuzzy analytic hierarchy process (AHP) and its application to industrial robot selection. In *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems* (pp. 988-996). Cham: Springer International Publishing.

Liu, P., & Shen, J. (2024). GHF-COPRAS multiple attribute decision-making method based on cumulative prospect theory and its application to enterprise digital asset valuation. *Axioms*, *13(5),* 297. https://doi.org/10.3390/axioms13050297

Liu, J., Wang, W., Li, J., Mustafa, G., Su, X., Nian, Y., ... & Li, X. (2025). UAV remote sensing technology for wheat growth monitoring in precision agriculture: Comparison of data quality and growth parameter inversion. *Agronomy*, *15*(1), 159. https://doi.org/10.3390/agronomy15010159

Lu, J., Zhang, S., Wu, J., & Wei, Y. (2021). COPRAS method for multiple attribute group decision making under picture fuzzy environment and their application to green supplier selection. *Technological and economic development of economy*, *27*(2), 369-385. https://doi.org/10.3846/tede.2021.14211

Oğuz, A. (2024). Drone Selection for Agricultural Enterprises with Interval Type-2 Fuzzy COPRAS Method. *Journal of Research in Business*, *9*(2), 395-421. https://doi.org/10.54452/jrb.1447602

Özdemir, Y. S. (2022). A spherical fuzzy multi-criteria decision-making model for industry 4.0 performance measurement. *Axioms*, *11(7),* 325. https://doi.org/10.3390/axioms11070325

Özgüven, M. M., Altaş, Z., Güven, D., & Çam, A. (2022). Tarımda drone kullanımı ve geleceği. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *12*(1), 64-83. https://doi.org/10.54370/ordubtd.1097519

Öztürk, M. (2025). A Hybrid Approach for Battery Selection Based on Green Criteria in Electric Vehicles: DEMATEL-QFD-Interval Type-2 Fuzzy VIKOR. *Sustainability*, *17*(14), 6277. https://doi.org/10.3390/su17146277

Öztürk, M. (2026a). Equipment supplier selection for sustainable hydrogen production: A group decision-making supported spherical fuzzy TOPSIS approach. *Sustainability*, *18*(4), 1737. https://doi.org/10.3390/su18041737

Öztürk, M. (2026b). Yeşil hidrojen tedarik zinciri lojistik merkezi seçimi: Yeni bir aralık Tip-2 bulanık BWM–RANCOM–ELECTRE III hibrit yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *41*(1), 445-462. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1774149

Parrot. (2018). *Parrot Bluegrass: Agricultural drone for precision farming*. Parrot. Erişim adresi: https://www.parrot.com/assets/s3fs-public/2021-09/bd_bluegrass_productsheet_en_210x297_2018-03-01.pdf

Puška, A., Igić, S., Prdić, N., Dudić, B., Stojanović, I., Stošić, L., & Nedeljković, M. (2025). Application of Intuitionistic Fuzzy Approaches and Bonferroni Mean Operators in the Selection of Suppliers of Agricultural Equipment and Machinery for the Needs of the Agriculture 4.0 System. *Mathematics*, *13*(14), 2268. https://doi.org/10.3390/math13142268

Puška, A., Nedeljković, M., Štilić, A., & Božanić, D. (2024). Evaluation of Affordable Agricultural Drones for Small and Medium Farms. *Eng*, *5*(4), 3161-3173. https://doi.org/10.3390/eng5040166

Quan, X., Guo, Q., Ma, J., & Doluschitz, R. (2023). The economic effects of unmanned aerial vehicles in pesticide application: Evidence from Chinese grain farmers. *Precision Agriculture*, *24*(5), 1965-1981. https://doi.org/10.1007/s11119-023-10025-9

Petritoli, E., Leccese, F., & Ciani, L. (2018). Reliability and maintenance analysis of unmanned aerial vehicles. *Sensors*, *18*(9), 3171. https://doi.org/10.3390/s18093171

Rajput, L., & Kumar, S. (2024). Spherical fuzzy choquet integral-based VIKOR method for multi-criteria group decision-making problems. *Cybernetics and Systems*, *55*(8), 2308-2328. https://doi.org/10.1080/01969722.2022.2151181

Raudeliuniene, J., Trinkuniene, E., Burinskiene, A., & Bubliene, R. (2025). Application of Multi-Criteria Decision-Making Approach COPRAS for Developing Sustainable Building Practices in the European Region. *Sustainability*, *17*(8), 3740. https://doi.org/10.3390/su17083740

Ramteke, S. V., Varadwaj, P. K., & Tiwari, V. (2025). Optimizing UAV spraying for sustainable agriculture: A life cycle and efficiency analysis in India. *Sustainability*, *17*(13), 6211. https://doi.org/10.3390/su17136211

Rejeb, A., Abdollahi, A., Rejeb, K., & Treiblmaier, H. (2022). Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. *Computers and electronics in agriculture*, *198*, 107017. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107017

Safaeinejad, M., Ghasemi-Nejad-Raeini, M., & Taki, M. (2025). Reducing energy and environmental footprint in agriculture: A study on drone spraying vs. conventional methods. *PLoS One, 20(6),* e0323779. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323779

Sarucan, A., Baysal, M. E., & Engin, O. (2021). A spherical fuzzy TOPSIS method for solving the physician selection problem. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, *42*(1), 181-194. https://doi.org/10.3233/JIFS-219185

Sodhi, B., & Prabhakar, T. V. (2012). A simplified description of fuzzy TOPSIS. *arXiv preprint arXiv:1205.5098*.

Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trinchero, D., & Fossa, M. (2024). Smart sensors and smart data for precision agriculture: a review. *Sensors*, *24*(8), 2647. https://doi.org/10.3390/s24082647

Stolaroff, J. K., Samaras, C., O'Neill, E. R., Lubers, A., Mitchell, A. S., & Ceperley, D. (2018). Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery. *Nature communications*, *9*(1), 409. https://doi.org/10.1038/s41467-017-02411-5

Taherdoost, H., & Mohebi, A. (2024). A comprehensive guide to the copras method for multi-criteria decision making. *J. Manag. Sci. Eng. Res*, *7*(2), 1-14.

Testa, R., Galati, A., Schifani, G., & Migliore, G. (2025). Cost-effectiveness of conventional and precision agriculture sprayers in Southern Italian vineyards: A break-even point analysis. *Precision Agriculture*, *26*(2), 39. https://doi.org/10.1007/s11119-025-10233-5

Thilagavathy, A., & Mohanaselvi, S. (2024). T-Spherical fuzzy TOPSIS method based on distance measures and Hamacher Heronian mean averaging aggregation operators and its application to waste management. *Applied Soft Computing*, *162*, 111868. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111868

Turanoglu Bekar, E., Cakmakci, M., & Kahraman, C. (2016). Fuzzy COPRAS method for performance measurement in total productive maintenance: a comparative analysis. *Journal of Business Economics and Management*, *17*(5), 663-684. https://doi.org/10.3846/16111699.2016.1202314

Türkmen, M., & Demirel, A. (2022). SWARA Ağırlıklı Bulanık COPRAS Yöntemi ile Tedarikçi Seçimi. *Alanya Akademik Bakış*, *6*(1), 1739-756. https://doi.org/10.29023/alanyaakademik.986700

Umeda, S., Yoshikawa, N., & Seo, Y. (2022). Cost and workload assessment of agricultural drone sprayer: A case study of rice production in Japan. *Sustainability, 14*(17), 10850. https://doi.org/10.3390/su141710850

Wang, W., Cao, Y., Deveci, M., & Wu, Q. (2024). An extensible complex spherical fuzzy decision making model based selection framework for the food waste treatment method. *Applied Soft Computing*, *150*, 111068. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111068

Więckowski, J., & Sałabun, W. (2025). Making more informed decisions in multi-criteria problems under uncertain conditions of criteria weights: drone selection study case. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*.

XAG. (2021). *P30 Plant Protection UAS*. XAG. Erişim adresi: https://www.xa.com/en/p30

Yao, W., Liu, C., Liu, Y., Zheng, Q., Wang, J., Yu, H., ... & Guo, S. (2025). Unmanned aerial vehicle payload technology applications in agriculture and other low-altitude scenarios: a review. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1721484. Doi: 10.3389/fpls.2025.1721484

Yuneec. (2017). *Yuneec H520: Commercial drone for industrial applications*. Yuneec. Erişim adresi: https://www.yuneec.com/h520