



Routing and payload planning of multi-base, heterogeneous fleet unmanned aerial vehicles to time-windowed missions

Aygün Altundaş^{1*}, Murat Arıkan², Serpil Erol²

¹Department of Industrial Engineering, Institute of Science, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Routing and payload planning are handled in an integrated manner
- Altitude level is included as a component
- Assignment of time-windowed and special-requirement tasks is performed in multi-base heterogeneous fleet UAV routing

Keywords:

- UAV path planning
- Payload planning
- Mission assignment
- Multi base, heterogenous fleet UAV routing

Article Info:

Research Article

Received: 02.10.2024

Accepted: 31.12.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1559891

Correspondence:

Author: Aygün Altundaş

e-mail:

aaltundas@kho.msu.edu.tr

phone: +90 545 493 4858

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a mixed-integer linear programming model is proposed to determine the path planning and corresponding altitude levels for intelligence gathering and physical attack tasks, which need to be executed before or during any military operation, at the lowest possible cost. In the model, payload planning and target assignment are conducted while considering physical constraints such as the UAVs' payload capacity, hanging point limit, airtime, as well as time windows and mission requirements, which vary depending on the mission types. The developed model is tested across various scenarios, solutions are presented, and the results are discussed along with suggestions for future studies. Figure A shows the stages of the study. The results obtained from the experimental study and sensitivity analysis confirm the model.

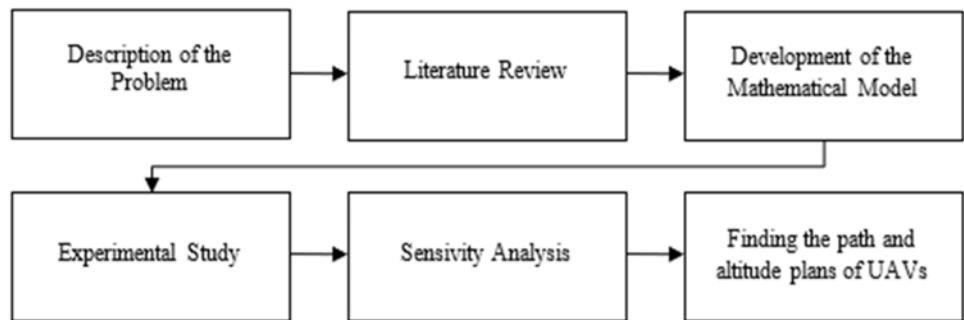


Figure A. Stages of Study

Purpose:

This study aims to incorporate altitude levels, mission requirements, and the physical constraints of UAVs into the path planning process.

Theory and Methods:

To achieve this goal and solve the problem, a Mixed-Integer Linear Programming model is developed and tested on sample problems.

Results:

Test problems are randomly generated on small, medium, and large scales. The developed model provides solutions for scenarios with up to 28 nodes.

Conclusion:

Optimal solutions are found for all small and medium-sized test problems, while for large-sized problems, optimal solutions are produced in 33% of the cases within 24 hours, and near-optimal solutions are obtained for 66% of the problems.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Çok üslü heterojen filolu insansız hava araçlarının zaman pencereli görevlere rotalanması ve faydalı yük planlaması

Aygün Altundaş^{1*}, Murat Arıkan², Serpil Erol²

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Rota ve yük planlaması entegre bir şekilde gerçekleştirildi
- Yükseklik seviyesi model bileşeni olarak kullanıldı
- Çok üslü heterojen filolu iha rotalamada zaman pencereli ve özel gereksinimli görevlere atama gerçekleştirildi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 02.10.2024

Kabul: 31.12.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1559891

Anahtar Kelimeler:

İHA Yol Planlaması,
faydalı yük planlaması, görev
ataması,
çok üslü heterojen filolu İHA
rotalama

ÖZ

Askeri teknolojilerin hızla gelişmesi, konvansiyonel harp kavramının dönüşmesine ve farklılaşmasına neden olmuş, bu bağlamda hibrit savaş kavramı ortaya çıkmıştır. Bu yeni savaş konseptiyle muharebe ortamlarının etki alanları genişlemiş ve değişim geçirerek birçok alanda yönetilen bir kavram haline gelmiştir. Bu değişim, farklı savaş ekipman ve teçhizatlarının kullanımını zorunlu kılmıştır. Son yıllarda savaşlara en çok etki eden askeri teknolojilerden biri İnsansız Hava Araçları (İHA)'dır. Gelişmiş ordulara sahip devletler, bu savaş ekipmanlarını envanterlerinde bulundurarak askeri operasyonlarda yoğun şekilde kullanmaktadır. Ancak muharebe ortamındaki başarı, yalnızca bu teknolojilerin envanterde bulundurulmasına değil, bu teknolojilerin etkin bir şekilde planlanmasına da bağlıdır. Bu çalışmada, her askeri operasyonun öncesinde veya gerçekleştirildiği esnada yapılması gereken; istihbarat toplama ve fiziksel saldırı görevlerinin gerçekleştirileceği minimum maliyetli yol planlamasını ve irtifa seviyelerini bulmak için bir karma tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Geliştirilen model irtifa seviyelerini modelin bileşeni olarak ele alması, rotalamayı yaparken göreve uygun faydalı yük planlamasını gerçekleştirmesi ve İHA'ların faydalı yük kapasitesi, asma noktası sınırı, havada kalma süresi gibi tüm fiziksel kısıtlamalarını gözeten görev atamasını gerçekleştirmesiyle literatürdeki diğer modellerden ayrılmaktadır. Geliştirilen model küçük, orta ve büyük ölçekli 9 farklı senaryoda test edilip çözümler sunulmuştur. Ayrıca minimum mesafeli yol planlarıyla mevcut çözümler karşılaştırılarak duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar tartışılarak gelecek çalışmalara öneriler getirilmiştir.

Routing and payload planning of multi-base, heterogeneous fleet unmanned aerial vehicles to time-windowed missions

H I G H L I G H T S

- Routing and payload planning are handled in an integrated manner
- Altitude level is included as a component
- Assignment of time-windowed and special-requirement tasks is performed in multi-base heterogeneous fleet UAV routing

Article Info

Research Article

Received: 02.10.2024

Accepted: 31.12.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1559891

Keywords:

UAV path planning,
payload planning,
mission assignment,
multi base heterogenous fleet
UAV routing

ABSTRACT

The rapid development of military technologies has caused the concept of conventional warfare to transform and differentiate, and in this context, the concept of hybrid warfare has emerged. With this new warfare concept, the areas of influence of combat environments have expanded and have become a concept that is managed in many areas by undergoing changes. This change has necessitated the use of different combat equipment and equipment. One of the military technologies that has had the most impact on wars in recent years is Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). States with advanced armies have this combat equipment in their inventories and use them intensively in military operations. However, success in the combat environment depends not only on having these technologies in the inventory, but also on the effective planning of these technologies. In this study, a mixed integer linear programming model is proposed to find the minimum cost path planning and altitude levels at which intelligence gathering and physical attack tasks will be carried out, which should be done before or during each military operation. The developed model differs from other models in the literature by considering altitude levels as a component of the model, performing the mission-appropriate payload planning while routing, and performing the task assignment by considering all physical limitations of UAVs such as payload capacity, suspension point limit, and airtime. The developed model was tested in 9 different scenarios of small, medium and large scale and solutions were presented. In addition, sensitivity analysis was performed by comparing the existing solutions with minimum distance path plans. The results were discussed and suggestions were made for future studies.

1. Giriş (Introduction)

Askeri teknolojilerin hızla gelişmesi, konvansiyonel harp kavramının dönüşmesine ve farklılaşmasına neden olmuş, bu bağlamda hibrit savaş kavramı ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan bu yeni savaş konsepti ile muharebe ortamlarının etki alanları genişlemiş ve yalnızca sahada değil ekonomi, psikoloji, teknoloji gibi çeşitli alanlarda da yönetilen bir kavram haline gelmiştir. Bu değişim, farklı savaş ekipman ve teçhizatlarının kullanımını zorunlu kılmıştır [1]. Güçlü ordulara sahip ve etki alanını uluslararası boyutlara ulaştırmış olan devletler, savaşın her boyutunda başarılı olabilmek için elektronik harp sistemleri, insansız sistemler ve diğer son teknoloji argümanları kullanmaya başlamıştır. Özellikle son yıllardaki gelişmeler, kullanan tarafa büyük bir kuvvet çarpanı olarak fayda sağlayan ve muharebenin seyrini değiştirebilen, can kaybı riskini ortadan kaldıran insansız sistemlerin yoğun kullanımını beraberinde getirmiştir [2, 3].

İnsansız sistemler, operatörlerini içinde taşımayan ve böylece can kaybını ortadan kaldıran, uzaktan yönetilebilen sistemlerdir. Son yıllarda en çok kullanılan ve savaşlara en çok etki eden türlerinden biri, İnsansız Hava Araçları (İHA)'dır. İHA'lar, kendilerini kullanan bir insan taşımayan, kendi kendine uçabilen veya uzaktan yönetilebilen, ölümcül veya ölümcül olmayan faydalı yükler taşıma kabiliyetine sahip hava araçlarıdır [4]. Sivil ve askeri kullanımları oldukça fazladır; askeri operasyonlarda yürütülen keşif-gözetleme, istihbarat toplama, fiziksel saldırı ve tahrip ile sınır koruması gibi görevlerde, diğer savaş teçhizatlarına göre düşük maliyetleri, yüksek esneklikleri ve gizlilik kabiliyetleri nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir [5]. Gelişmiş ordulara sahip modern devletler, bu tür savaş ekipmanlarını envanterlerinde bulundurmakta ve askeri operasyonlarda yoğun bir şekilde kullanmaktadır. Ancak muharebe ortamındaki başarı, yalnızca bu teknolojilerin envanterde bulundurulmasına değil, aynı zamanda bu teknolojilerin etkin bir şekilde planlanmasına da bağlıdır [6]. Karar vericiler, bu platformların fiziksel kısıtlamalarını dikkate alarak elde edecekleri faydayı maksimize ederken üs yeri seçimi, hedef ataması, ekipman konfigürasyonu ve yol planlaması gibi karmaşık problemlerle karşılaşmaktadır [7].

Bu çalışmada, her askeri operasyonun öncesinde veya gerçekleştiği esnada yapılması gereken; istihbarat toplama ve fiziksel saldırı görevlerinin gerçekleştirileceği minimum maliyetli yol planlamasını ve irtifa seviyelerini bulmak için bir karma tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Model, İHA'ların operasyon sırasında izleyecekleri rotayı optimize ederken, görevlerin türü ve coğrafi engeller gibi faktörleri göz önünde bulundurarak uçuş yüksekliğini de belirlemektedir. Gerçekleştirilecek görevlerin tipi ve coğrafi engeller göz önüne alındığında İHA'nın bulunacağı yüksekliği belirlemek de en az yol planı kadar önemlidir. Geliştirilen model irtifa seviyelerini modelin bir bileşeni olarak ele alması, rotalamayı yaparken göreve uygun faydalı yük planlamasını da gerçekleştirmesi ve İHA'ların faydalı yük kapasitesi, asma noktası sınırı, havada kalma süresi gibi tüm fiziksel kısıtlarını göz önüne alarak görev atamasını gerçekleştirmesiyle literatürdeki diğer modellerden ayrılmaktadır. Geliştirilen model küçük, orta ve büyük ölçekli toplam 9 farklı senaryoda test edilmiş ve çözümler sunulmuştur. Ayrıca duyarlılık analizi gerçekleştirilerek amaç fonksiyonunun minimum uzaklık olduğu durumdaki çözümler ile mevcut çözümler karşılaştırılmıştır. Sonuçlar tartışılarak gelecek çalışmalar için öneriler getirilmiştir.

Giriş bölümünün ardından makalenin ikinci bölümünde konu ile ilgili literatürde bulunan çalışmalar incelenmiştir. Problemin çözümüne ait geliştirilen matematiksel model ve kullanılan notasyon, parametre ve karar değişkenleri üçüncü bölümde sunulmuştur. Dördüncü bölümde modelin test edilmesi ve sınırlılıklarının belirlenmesi için deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve duyarlılık analizi yapılmıştır. Beşinci ve

son bölümde ise ulaşılan sonuçlar vurgulanarak çalışma sonlandırılmıştır.

2. Literatür Araştırması (Literature Review)

Literatürde İHA rotalama problemleri incelendiğinde, "araç rotalama", "yol planlama" ve "yörünge optimizasyonu" gibi çeşitli kavramlarla karşılaşılmaktadır [8]. Bu kavramlar arasındaki farklılıklar, İHA rotasını belirlerken odaklandıkları üç önemli noktadan kaynaklanmaktadır. Bunlardan ilki "Verimlilik ve Maliyet Minimizasyonu"dur. İHA yolunun verimli olması ve bir maliyet fonksiyonu çerçevesinde kabul edilebilir bir hesaplama süresi içinde minimize edilerek en uygun yolun elde edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda yapılan çalışmalar, belirli yerleri ziyaret edecek şekilde araçları organize etmek üzerine yoğunlaşır ve genellikle "araç rotalama" kavramını kullanırlar. İkinci odak noktası ise "Güvenlik ve Engel Önleme"dir. İHA'nın güvenliğini sağlanması, yani uçuş sırasında engellerle veya yerle çarpışmasının önlenmesidir. Bu amaçla, İHA'ların ve çevredeki nesnelerin konumu ve geometrisini dikkate alan, nadiren araç dinamikleri kısıtlarını da göz önünde bulundurarak "yol planlaması" kavramı kullanılır. Bu çalışmalarda, engellerden kaçınılan rotaların bulunmasına odaklanılır. Son odak nokta ise "Uygulanabilirlik ve Performans Optimizasyonu"dur. Yörüngenin uygulanabilir olması, yani planlanan yolun dinamik kısıtlamaları karşılaması ve kontrol sistemi tarafından uygulanabilir olması gerekmektedir [9]. Bu noktaya odaklanan çalışmalar, zamanın bir fonksiyonu olarak aracın kinematiki ve dinamiki üzerindeki kısıtlamaları karşılarken, uçuş süresi veya yakıt tüketimi gibi performans ölçümlerini en aza indiren yörüngeleri belirlemeye çalışır. Bu çalışmalar "yörünge optimizasyonu" kavramını kullanmaktadır [10].

Bu çalışma kapsamında, İHA'ların dinamik ve kinematik kısıtları göz ardı edilip, engellerin hesaba katılarak irtifa seviyeleri ve uygun rotaların belirlenmesi üzerine odaklanıldığından, "araç rotalama" ve "yol planlaması" kavramlarını kullanan, 1998 yılından günümüze kadar uzanan zaman diliminde yapılmış çalışmalar incelenerek Tablo 1'de sunulmuştur. Yapılan çalışmalar ve amaçları tabloda belirtilmiştir. Yapılan literatür taraması analiz edildiğinde İHA rotalama problemlerinin farklı alanlardaki uygulamalarının yıllara göre artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Araştırmacıların yoğun ilgisini çekmeyi başaran bu problem için farklı problem türlerinde farklı çözüm önerileri getirilmiştir. İlk yıllarda yapılan çalışmalar klasik araç rotalama problemleri gibi kurgulanırken son yıllarda yapılan çalışmalarda arazi engebeleri, radar tespit riski ve tehdit seviyesi algılamaları gibi daha kompleks problemlere çözüm aranmıştır. İHA'ların son yıllardaki operasyon ortamlarında sıklıkla kullanılması ve yüksek görev ifa oranları araştırmacıların bu alana daha fazla yönelmesine neden olmuş bu nedenle çalışmaların sayısı ve çeşitliliği artmıştır. Yapılan çalışmaların sınıflandırılması Tablo 2'de sunulmuştur. Çalışmaların sınıflandırılması değerlendirildiğinde İHA'lar için klasik araç rotalama problemleri bakış açısıyla çözüm arayışlarının diğer çalışmalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. İHA'ların artan kullanım alanları ve çeşitliliği ile ortaya çıkan yeni problem sahalarının etkisiyle önümüzdeki dönemlerde yapılan çalışmaların farklı sınıflandırma alanlarına kayacağı düşünülmektedir.

Yapılan literatür taraması sonucunda İHA yol planlamasını yaparken irtifa seviyelerini de modelin bir bileşeni olarak ele alan çok üslü, heterojen filolu, zaman pencereli ve özel gereksinimli görevlere atamanın gerçekleştirildiği, İHA'ların fiziksel kapasitelerini de dikkate alarak faydalı yük planlaması yapan herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Yapılan çalışma ile bu boşluğu doldurulup literatüre katkı sağlanacağı ve çalışmanın sınırlılıkları kapsamında yeni çalışma alanları açılacağı düşünülmektedir.

Tablo 1. Literatür Taraması (Literature Review)

Referans	Açıklama	Referans	Açıklama
[11]	İHA'lar minimum maliyetli rota planı	[49]	İHA radar algılama ve mesafeyi minimize eden yol planı
[12]	Çoklu İHA'ların radarlar tarafından tespit edilmesini minimize edecek yol planı	[50]	Gözetleme görevi için menzil kısıtı altında minimum İHA sayısı tespiti ve görev atama planı
[13]	Düşman hava savunmasının bastırılması için kullanılan İHA'ların rota planı	[51]	Afet bölgesinde kullanılan İHA için baz istasyonu yer seçimi, İHA'nın baz istasyonlarına rota planı
[14]	Gözetleme görevlerinde kullanılan İHA filosunun stratejik hedeflere rota planı	[52]	Mesafe kısıtlı İHA'ların orman yangını tespiti için rota planı
[15]	Kara sınırlarının izlenmesi amacıyla kullanılan İHA'ların rota planı	[53]	Mesafe ve yükleme kısıtlı İHA'ların COVID-19 test kitlerini taşıyacağı en kısa mesafeli rota planı
[16]	İHA'nın olası hedeflere görev atama planı	[54]	İHA'lar için sevkiyat dağıtım planı
[17]	İHA'lara takılacak sensör seçimi ve görev planı	[55]	İHA rotalarını uygun İHA şarj araçları konum planı
[18]	Sürü heterojen İHA'lar için rota planı	[56]	Deprem hasar tespiti İHA'larının rota planı
[19]	Yüksek havada kalma ve orta irtifaya sahip İHA'lar için dinamik ve statik ortamda rota planı	[57]	İHA görev atama planı ve görevlerde kullanılacak İHA sayısı tespiti
[20]	Çok depolu çoklu İHA'ların yol planı	[58]	Keşif görevinde kullanılan İHA'nın rota planı
[21]	Heterojen İHA filoları için rota planı	[59]	İHA'ların 3 boyutlu en kısa mesafeli yol planı
[22]	Keşif ve gözetlemede görevlerinde kullanılacak en az İHA sayısı ve rota planı	[60]	Arama kurtarma görevlerinde kullanılan İHA'ların minimum gecikmeli rota planı
[23]	3 Boyutlu arazide İHA filosunun yol planı	[61]	Gözetleme görevlerinde kullanılan çoklu İHA rota planı
[24]	İnsansız savaş araçlarının çoklu hedeflere minimum riskli yol planı	[62]	Arama kurtarma faaliyetlerinde görev yapacak İHA'ların seçimi ve görev atama planı
[25]	Seyahat, servis süresinin stokastik olduğu ortamda İHA için maksimum beklenen faydalı rota planı	[63]	Devriye görevleri için kullanan İHA'ların stokastik ortamdaki rota planı
[26]	Görüntülemeye kullanılan İHA'ların faydayı maksimize mesafeyi minimize eden rota planı	[64]	Gözetleme görevlerinde kullanılan İHA'lar için maksimum faydalı rota planı
[27]	Çoklu İHA'ların en fazla alanı en az süre ile kapsayacağı rota planı	[65]	İHA'lar için maksimum önem dereceli ve minimum mesafeli rota planı
[28]	İHA'lar için maksimum faydalı rota planı	[66]	Lojistikte kullanılan İHA'ların en az maliyetli rota planı
[29]	Belirsizlik altında trafik görüntülemesi için kullanılan İHA'ların rota planı	[67]	Çoklu İHA'ların ağ transferi ve veri aktarımı gerçekleştireceği yol planı
[30]	Heterojen filolu çoklu İHA'ların çok depolu yol planı	[68]	Görevlerin tamamlanmasını sağlayacak minimum İHA sayısı tespiti ve minimum süreli rota planı
[31]	Görevlerin gerçekleşeceği maksimum zamanı minimize eden İHA rota planı	[69]	İHA'lar için karmaşık bilinmeyen ortamda zaman kısıtlı yol planı
[32]	Operasyonel ve şarj kısıtlarını da dikkate alarak heterojen İHA'ların rota planı	[70]	Afet kurtarma operasyonlarında en fazla kapsama yapacak yol planı
[33]	İHA'lar için radar algılanma ve toplam mesafeyi minimize edecek yol planı	[71]	İHA'lar için toplam batarya tüketimini minimize edecek rota planı
[34]	İHA'lar için minimum mesafeli rota planı	[72]	Uğranan noktalardan elde edilecek faydayı maksimize eden en kısa rota planı
[6]	Heterojen İHA filosunun dinamik hedeflere görev ataması ve minimum maliyetli rota planı	[73]	3 Boyutlu karmaşık ortamda en kısa yol planı
[35]	Ziyaret edilen hedef sayısını maksimize, tehdit ve seyahat süresini minimize eden yol planı	[74]	Engellere takılmayan en kısa yol planı
[36]	İHA'lar ile karayolu trafiğinin gerçek zamanlı izlenmesi için çizelge planı	[75]	İstihbarat görevinde kullanılan İHA'lar için tespiti minimize eden yol planı
[37]	Gözetleme görevinde kullanılan İHA'ların rota planı	[76]	Enerji tüketimini minimize eden yol planı
[38]	2 boyutlu dinamik bir ortamda toplam mesafe ve radar algılamasını minimize edecek İHA yol planı	[77]	Katedilen mesafeyi ve yakılan yakıtı minimize eden yol planı
[39]	Afet bölgesinin gözetlenmesinde kullanılan İHA'lar için rotalama planı	[78]	Görev süresi ve görev maliyetini minimize eden rota planı
[40]	Çok depolu İHA rota planı ve silah konfigürasyonu	[79]	Kurtarma hedefinin bulunma olasılığını arttıran rota planı
[41]	Görüntüleme için kullanılacak İHA'ların irtifaya bağlı yol planı	[80]	Tüm görevlerin tamamlanma zamanını minimize eden rota planı
[42]	İHA'lar yardımıyla orman yangınlarını gözetleme görevini gerçekleştirmek için rota planı	[81]	Tüm görevlerin tamamlanma zamanını minimize eden rota planı
[43]	İnsani yük taşımacılığında kullanılan heterojen İHA'lar için rota planı	[82]	Genel operasyonel maliyetleri minimize eden rota planı
[44]	Hareketli baz istasyonları yer seçimi ve İHA'ların bu baz istasyonlarına rota planı	[83]	Enerji tüketimini minimize eden rota planı
[45]	Göçmen hareketlerini incelemek amacıyla kullanılan İHA'ların rota planı	[84]	Maruz kalınan riski minimize eden yol planı
[46]	Çoklu İHA'ların kapasite ve zaman penceresi kısıtları altında hareket halindeki hedeflere rota planı	[85]	Enerji tüketimi ve radar tehdidini minimize eden yol planı
[47]	İstihbarat, gözetleme faaliyetlerinde kullanılan İHA'ların baz istasyonları yer seçimi ve rota planı	[86]	Katedilen mesafeyi minimize eden yol planı
[48]	2 ve 3 Boyutlu ortamlarda İHA'lar için hedef noktaya giden en kısa yol planı	[87]	Tehlikeden kaynaklı maliyeti minimize eden yol planı

Tablo 2. Literatür Taraması Sınıflandırması (Classification of Literature Review)

Araç Rotalama	[5], [9], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [19], [20], [23], [24], [25], [26], [27], [29], [30], [32], [34], [35], [37], [38], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [67], [69], [70], [78], [79], [80], [81], [82], [83]
Yol Planlaması	[2], [18], [21], [22], [28], [31], [33], [36], [39], [47], [48], [57], [58], [66], [68], [71], [72], [73], [74], [77], [85], [86], [87]

3. Problem Tanımı ve Geliştirilen Model (Problem Definition And Developed Model)

Güçlü bir orduya sahip olan devletler gerek iç güvenliğini sağlamak gerekse sınırlarını korumak için İHA'ları istihbarat toplama ve fiziksel saldırı operasyonlarında sıklıkla kullanmaktadır. Bu operasyonların başarısı kullanılan İHA'ların etkin bir şekilde görev planlaması ile mümkündür. Bu görev planlanmasında hem İHA'nın faydalı yük kapasitesi, asma noktası sınırı, havada kalma süresi gibi fiziksel kısıtlamaları hem de görevin gereksinim duyduğu hasar seviyesi, en erken ve en geç tamamlanma zamanları gibi faktörleri göz önüne almak gerekir. Bu çalışmada İHA'ların minimum maliyetli görev planlarının oluşturulması için bir karma tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin varsayımları şunlardır;

- İHA'lar, birden fazla üs kullanarak kalkış ve iniş yapabilirler. Bir İHA, herhangi bir üsten kalkabilir ve yine herhangi bir üsse iniş yapabilir. Bu, operasyonel esnekliği artırarak görevlerin daha stratejik ve etkin bir şekilde planlanmasını sağlar.
- İHA'lar, istihbarat toplama ve fiziksel saldırı olmak üzere iki farklı türde görev icra ederler. İstihbarat toplama görevleri, yüksek ve düşük öncelikli olarak sınıflandırılır.
- Fiziksel saldırı ve yüksek öncelikli istihbarat toplama görevleri kesin olarak yapılması gerekirken, düşük öncelikli istihbarat toplama görevleri karar vericinin insiyatifinde gerçekleştirilir veya gerçekleştirilmez.
- Her bir görevin gerçekleştirilmesi gereken belirli bir zaman aralığı vardır. Bu zaman aralığının alt sınırından önce veya üst sınırından sonra görevler gerçekleştirilemez. Bu kısıt, görevlerin tam olarak istenen zaman aralığında ve etkili bir şekilde tamamlanmasını sağlar.
- Fiziksel saldırı görevleri için gereken hasar miktarı ve istihbarat toplama görevleri için gereken bilgi işleme seviyeleri bilinmektedir. Bu gereksinimlerin karşılanması, görevlerin başarısını doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir.
- Oluşturulan rotaların tamamlanma süresi, İHA'ların maksimum havada kalma sürelerini aşmamalıdır. Bu, operasyonların güvenli ve sürdürülebilir olmasını sağlar.
- Görevi gerçekleştirmek için kullanılan faydalı yükler İHA'ların faydalı yük ve asma noktası sınırı gibi fiziksel kapasitelerini ihlal edemez.
- Her iki hedef arasındaki coğrafi engeller göz önünde bulundurularak eşik değere bağlı olarak irtifa seviyeleri belirlenir. İHA'lar, görevlerini gerçekleştirirken bir engelle karşılaşma riskinin olmadığı irtifada hareket etmelidir.

İHA'ların çeşitli görevleri en düşük maliyetle yerine getirirken herhangi bir engelle karşılaşma risklerini ortadan kaldırmak için geliştirilen bu model, farklı görev türleri ve öncelik seviyelerini dikkate alarak, araçların operasyonel kapasitesini en üst düzeye çıkarmayı hedeflemektedir. Böylece modern askeri operasyonların karmaşık ve dinamik doğasına uygun bir çözüm sunulmaktadır. Problemin çözümü için geliştirilen karma tam sayılı doğrusal programlama modeli ve kullanılan notasyon, parametre ve karar değişkenleri aşağıda sunulmuştur.

Notasyonlar:

I_{low} , Düşük öncelikli istihbarat toplanacak düğümler kümesi
 I_{high} , Yüksek öncelikli istihbarat toplanacak düğümler kümesi
 I , İstihbarat toplanacak düğümler kümesi, $I \rightarrow I_{low} \cup I_{high}$
 A , Taarruz edilecek düğümler kümesi
 T , Tüm görevler kümesi, $T \rightarrow I \cup A$
 B , İHA üs düğümleri kümesi
 N , Tüm noktalar kümesi, $N \rightarrow T \cup B$; $i, j \in N$
 U , İHA'lar kümesi, $k \in U$
 S , Sensörler kümesi, $s \in S$
 G , Silahlar kümesi, $g \in G$
 L , İrtifa seviyeleri kümesi; $l, h \in L$

Parametreler:

dm_i , i istihbarat hedefinin bilgi talebi
 di , i taarruz hedefinin hasar talebi
 Q_k , k İHASının faydalı yük (ağırlık) kapasitesi
 h_k , k İHASının asma noktası sınırı
 en_k , k İHA'sının maksimum havada kalma süresi
 V_k , k İHA'sının seyir hızı
 f_k , k İHA'sının maliyeti
 fe_k , k İHA'sının br. zamandaki (saat) yakıt maliyeti
 w_s , s sensörünün ağırlığı
 w_g , g silahının ağırlığı
 p_s , s sensörünün fiyatı
 pr_g , g silahının fiyatı
 ais , s sensörünün i hedefinde istihbarat toplama kabiliyeti
 $adig$, g silahının i hedefi üzerinde taarruz kabiliyeti
 ei , i hedefinin ziyaret edilebileceği en erken zaman
 lai , i hedefinin ziyaret edilebileceği en geç zaman
 sei , i hedefine taarruz ederken/istihbarat toplarken harcanan zaman
 ww_{iklh} , k İHA'sının i hedefini l irtifasında ararken harcadığı zaman
 d_{ijlh} , i ve j hedefi arası irtifa değişimini de göz önüne alan mesafe
 ttr_{ijklh} , k İHA'sının i hedefinden j hedefine giderken l irtifasından h irtifasına seyahat etme zamanı, $ttr_{ijklh} = d_{ijlh}/V_k$
 bee_{ijh} , i hedefinden j hedefine h irtifasında gidilebiliyorsa 1 değerini alan yardımcı parametre
 m , Ziyaret edilecek düşük öncelikli istihbarat noktası sayısı

Karar Değişkeni:

X_{ijklh} , k İHASı l irtifasında i hedefinden h irtifasında j hedefine gidiyorsa 1, aksi halde 0
 y_{ikg} , k İHASının i hedefine saldırmak için kullanacağı g silahı miktarı
 z_{iks} , k İHASının i hedefinden istihbarat toplamak için kullanacağı s sensörü miktarı
 te_{ik} , k İHASının i düğümlüne ulaştığı zaman

Amaç Fonksiyonu:

$$\min z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in U} \sum_{l \in L} \sum_{h \in L} fe_k ttr_{ijklh} X_{ijklh} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in U} \sum_{g \in G} pr_g y_{ikg} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in U} \sum_{s \in S} p_s z_{iks} + \sum_{i \in B} \sum_{j \in T} \sum_{k \in U} \sum_{l \in L} \sum_{h \in L} f_k X_{ijklh} \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$X_{ijklh} \in \{0,1\} \quad (19)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in U} \sum_{l \in L} \sum_{h \in L} bee_{ijh} X_{ijklh} \leq 1, \forall j \in I_{low} \quad (2)$$

$$te_{ik} \geq 0 \quad (20)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in U} \sum_{l \in L} \sum_{h \in L} bee_{ijh} X_{ijklh} \leq 1, \forall i \in I_{low} \quad (3)$$

$$y_{ikg}, z_{iks} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad (21)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in I_{low}} \sum_{k \in U} \sum_{l \in L} \sum_{h \in L} bee_{ijh} X_{ijklh} = m \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in U} \sum_{l \in L} \sum_{h \in L} bee_{ijh} X_{ijklh} = 1, \forall j \in A \cup I_{high} \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in U} \sum_{l \in L} \sum_{h \in L} bee_{ijh} X_{ijklh} = 1, \forall i \in A \cup I_{high} \quad (6)$$

$$\sum_{i \in U} \sum_{l \in L} bee_{iro} X_{irklo} - \sum_{j \in N} \sum_{h \in L} bee_{rjh} X_{rjkoh} = 0, \quad \forall r \in T; \forall o \in L; \forall k \in U \quad (7)$$

$$\sum_{k \in U} \sum_{s \in S} a_{is} z_{iks} \geq dm_i (\sum_{j \in N} \sum_{k \in U} \sum_{l \in L} \sum_{h \in L} bee_{jih} X_{jiklh}), \forall i \in I_{low} \quad (8)$$

$$\sum_{k \in U} \sum_{s \in S} a_{is} z_{iks} \geq dm_i, \forall i \in I_{high} \quad (9)$$

$$\sum_{k \in U} \sum_{g \in G} ad_{ig} y_{ikg} \geq d_i, \forall i \in A \quad (10)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{g \in G} y_{ikg} + \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} z_{iks} \leq h_k, \forall k \in U \quad (11)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{g \in G} we_g y_{ikg} + \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} w_s z_{iks} \leq Q_k, \forall k \in U \quad (12)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{l \in L} \sum_{h \in L} (ttr_{ijklh} + se_i + ww_{ikl})(bee_{jih} X_{jiklh}) \leq en_k, \forall k \in U \quad (13)$$

$$z_{iks} \leq M \sum_{j \in N} \sum_{l \in L} \sum_{h \in L} bee_{jih} X_{jiklh}, \forall i \in I; \forall k \in U; \forall s \in S \quad (14)$$

$$y_{ikg} \leq M \sum_{j \in N} \sum_{l \in L} \sum_{h \in L} bee_{jih} X_{jiklh}, \forall i \in A; \forall k \in U; \forall g \in G \quad (15)$$

$$te_{ik} + ttr_{ijklh} + se_i + ww_{ikl} \leq te_{jk} + M(1 - (bee_{ijh} X_{ijklh})), \forall i, j \in N; \forall k \in U; \forall l, h \in L; i \neq j \quad (16)$$

$$te_{ik} \geq e_i, \forall i \in T; \forall k \in U; \forall l \in L \quad (17)$$

$$te_{ik} + ww_{ikl} + se_i \leq la_i, \forall i \in T; \forall k \in U; \forall l \in L \quad (18)$$

Amaç fonksiyonu'nda (1), minimize edilen toplam maliyet 4 farklı bileşenden oluşmaktadır. İlk bileşen İHA'nın havada kaldığı süreye bağlı olarak yakıt tüketim maliyetini, ikinci ve üçüncü bileşen kullanılan silah ve sensör maliyetini son bileşen ise İHA kullanım maliyetini göstermektedir. Kısıt (2) ve (3), düşük öncelikli istihbarat görevlerinin karar verici insiyatifinde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Kısıt (4), bu görevlerden karar vericinin belirleyeceği m tanesinin yerine getirilmesi için kullanılmaktadır. Kısıt (5) ve (6), yüksek öncelikli istihbarat ve fiziksel saldırı görevlerinin kesin olarak gerçekleştirilmesini garanti etmektedir. Kısıt (7), akış korunum kısıtıdır. Rotanın ara düğümlerde sonlanmasını engellemektedir. Kısıt (8), eğer düşük öncelikli istihbarat toplama görevi yerine getirilecekse o görevin minimum bilgi işleme talebinin karşılanmasını sağlamaktadır. Kısıt (9) ve (10), yüksek öncelikli istihbarat ve fiziksel saldırı görevlerinin bilgi işleme ve hasar gereksinimlerinin karşılanmasını garanti etmektedir. Kısıt (11) ve (12), sırasıyla İHA'ya entegre edilecek sensör ve silah miktarı ile ağırlığının İHA'nın asma noktası sınırı ve faydalı yük kapasitesini aşmasını engellemektedir. Kısıt (13) ise İHA için oluşturulan yol planı süresinin İHA'nın maksimum havada kalma süresini aşmasını önlemektedir. Kısıt (14) ve (15), karar değişkenleri arası bağlantı kısıtlarıdır. Eğer o görevler yapıldıysa silah ve sensör sayısı değişkenlerinin değer almasını sağlamaktadır. Kısıt (16), zaman izleme kısıtıdır. İHA'nın hangi görevi ne zaman gerçekleştirmeye başladığını belirlemektedir. Kısıt (17) ve (18) zaman penceresi kısıtlarıdır. Görevlerin istenen zamandan önce veya sonra yapılmasını engellemektedir. Kısıt (19), (20) ve (21) ise karar değişkenlerinin türünü göstermektedir.

4. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

Oluşturulan karma tamsayılı doğrusal programlama modelinin doğruluğu, güvenilirliği ve sınırlarını tespit edebilmek için 3 farklı ölçekte 9 ayrı test problemi oluşturulmuştur. Test problemleriyle ilgili detaylar ve çözümleriyle ilgili analizler bu bölümde verilmiştir.

4.1. Test Problemleri (Test Problems)

Oluşturulan test problemleri küçük, orta ve büyük ölçekte olmak üzere 3 kategoride sınıflandırılmıştır. Bu kategorilerin içerdiği problem parametreleri belirlenirken modelin sınırlılıklarını tespit edebilmek adına sistematik olarak arttırım gerçekleştirilmiştir. Bu kategorilerin ana özellikleri Tablo 3'te detaylı olarak açıklanmıştır.

Tablo 3. Test Problemleri (Test Problems)

Ölçek	Alan (kmxkm)	Düğüm Sayısı	Düşük Öncelikli İstihbarat Noktaları	Yüksek Öncelikli İstihbarat Noktaları	Taarruz Noktaları	Üs Sayısı	İHA Tipi Sayısı	Sensör Tipi Sayısı	Silah Tipi Sayısı	İrtifa Seviyesi Sayısı
Küçük Boyutlu	300x300	8 - 14	2 - 4	2 - 4	2 - 4	2	2	2	2	2
Orta Boyutlu	500x500	18 - 24	5 - 7	5 - 7	5 - 7	3	3	3	3	2
Büyük Boyutlu	1000x1000	28 - 34	8 - 10	8 - 10	8 - 10	4	4	4	4	2

Tablodaki düğüm bilgilerini içeren hücrelerdeki ilk değer o senaryo için alt sınırı, ikinci değer ise o senaryo için üst sınırı ifade etmektedir. Küçük boyutlu test problemleri için operasyonların 300x300 km²'lik bir alanda gerçekleşeceği varsayılmıştır ve burada en az 8 en çok 14 düğümden oluşan 3 farklı test problemi oluşturulmuştur. Bu test problemlerinde üs sayısı, İHA, silah ve sensör tipi 2 olarak belirlenmiştir. Orta ölçekli test problemlerinde ise en az 18 en çok 24 düğümden oluşan 3 farklı test problemi oluşturulmuştur. Bu test problemlerinde depo sayısı, İHA, silah ve sensör tipi 3 olarak belirlenmiştir. Büyük ölçekli test problemlerinde ise en az 28 en çok 34 düğümden oluşan 3 farklı test problemi oluşturulmuştur. Bu test problemlerinde üs sayısı, İHA, silah ve sensör tipi 4 olarak belirlenmiştir. Her kategorideki test problemlerinde düşük öncelikli istihbarat noktası, yüksek öncelikli istihbarat noktası ve taarruz noktası sayıları eşit olarak alınmıştır. İrtifa seviyeleri ise her kategoride alçak ve orta irtifa olarak 2 tip belirlenmiştir. Test problemlerinin büyüklüğü gerçek hayat uygulamaları göz önünde bulundurularak en fazla 34 düğümlü (30 görev) bir problem ile sonlandırılmıştır.

4.2. Parametre Üretimi (Parameter Generation)

Farklı kategorilerdeki test problemlerinde üs yerleri ile görevler için x ve y koordinatları belirlenen alanda rassal olarak oluşturulmuştur. Her bir düğüm arası mesafe Öklid uzaklık ile elde edilmiştir. İrtifa değişiminden kaynaklı mesafe artışı ise 2 boyutlu olarak hesaplanan Öklid uzaklığın üstüne irtifa seviyeleri arasındaki farkın direkt olarak eklenmesiyle elde edilmiştir. Bu bağlantı Eş. 22'de gösterilmiştir.

$$d_{ijth} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} + |l_i - h_j| \quad (22)$$

Her bir test problemi kategorisinde farklı sayıda İHA, silah ve sensör tipi kullanılmıştır. Test parametrelerinin üretimi için hasar ve bilgi akış talepleri, en erken ve en geç ziyaret zamanları, servis ve bekleme zamanları Uniform dağılımdan gerçek hayat uygulamasında karşılaşılan verilere aykırı olmayacak şekilde elde edilmiştir. İHA, silah ve sensörlerle ilgili parametreler ise deterministik olarak belirlenmiştir. Kullanılan tüm parametre değerleri gerçek hayat uygulamalarındaki verileri yansıtacak şekilde jenerik olarak oluşturulmuştur. Yani kullanılan parametre değerleri gerçek veriler değil gerçek verileri yansıtacak şekilde üretilmiş değerlerdir. Bu parametrelerin üretimi için kullanılan dağılım ve değerler Tablo 4'te verilmiştir.

Üs sayısı, İHA tipi, sensör tipi ve silah tipi sayısı küçük boyutlu problemlerde 2, orta boyutlu problemlerde 3, büyük boyutlu problemlerde ise 4 olarak belirlenmiştir. İrtifa seviyesi ise her problemde 2 olarak sabit tutulmuştur. Bunun nedeni gerçek hayat uygulamalarında İHA'ların görevleri alçak ve orta irtifada gerçekleştirilmesidir. İhtiyaca ve isteğe bağlı olarak irtifa seviyeleri de artırılabilir fakat bunun problemin boyutunu büyüteceği unutulmamalıdır. Modelin test edilmesi için parametre ve kısıt sayısının sistematik bir şekilde arttığı 9 farklı senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryolara ait test problemlerinin detayları Tablo 5'te verilmiştir.

4.3. Modelin Uygulanması ve Test Problemlerinin Çözümü (Implementation of the Model and Solution of Test Problems)

Oluşturulan test problemleri, Windows 10 işletim sistemi altında, GAMS 24.1 programında kodlanarak Intel Core i7-9700 CPU 3.00 GHz işlemcili, 16 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda, en fazla 24 saat çalıştırılmıştır. Test problemlerinin çözümü ile ulaşılan sonuçlara ait rota ve irtifa planları ile toplam maliyet Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 4. Parametre Değerleri (Value of Parameters)

Parametre	Dağılım/Değer
dm_i	Uniform (15-30) bilgi akışı
d_i	Uniform (30-60) hasar
Q_k	İHA 1 = 750 kg İHA 2 = 1000 kg İHA 3 = 1250 kg İHA 4 = 1500 kg
h_k	İHA 1 = 8 adet İHA 2 = 10 adet İHA 3 = 12 adet İHA 4 = 14 adet
en_k	İHA 1 = 18 sa İHA 2 = 20 sa İHA 3 = 22 sa İHA 4 = 24 sa
f_k	İHA 1 = 1000 pb İHA 2 = 3000 pb İHA 3 = 5000 pb İHA 4 = 10000 pb
fec_k	İHA 1 = 0,01 pb İHA 2 = 0,02 pb İHA 3 = 0,05 pb İHA 4 = 0,1 pb
V_k	İHA 1 = 150 km/sa İHA 2 = 180 km/sa İHA 3 = 210 km/sa İHA 4 = 240 km/sa
w_s	Sensör 1 = 50 kg Sensör 2 = 70 kg Sensör 3 = 100 kg Sensör 4 = 150 kg
wc_g	Silah 1 = 30 kg Silah 2 = 70 kg Silah 3 = 120 kg Silah 4 = 200 kg
p_s	Sensör 1 = 10 pb Sensör 2 = 25 pb Sensör 3 = 40 pb Sensör 4 = 60 pb
pr_g	Silah 1 = 20 pb Silah 2 = 60 pb Silah 3 = 90 pb Silah 4 = 120 pb
a_{is}	Sensör 1 = 5 bilgi akışı/adet Sensör 2 = 15 bilgi akışı/adet Sensör 3 = 25 bilgi akışı/adet Sensör 4 = 40 bilgi akışı/adet
ad_{ig}	Silah 1 = 20 hasar/adet Silah 2 = 45 hasar/adet Silah 3 = 60 hasar/adet Silah 4 = 90 hasar/adet
e_i	Uniform (0,5) sa
la_i	Uniform (16,24) sa
se_i	Uniform (0,1) sa
ww_{ikl}	Uniform (0,0.5) sa
bee_{ijh}	Görevlerin %80'i orta irtifada ($l = 2$) gerçekleştirilebilir. Görevlerin ancak %60'ı alçak irtifada ($l = 1$) gerçekleştirilebilir.
m	Her senaryoda düşük öncelikli görev sayısının yarısının ziyaret edilmesi gerekmektedir.

Geliştirilen modelin test edilmesi için küçük, orta ve büyük olmak üzere 3 kategoride oluşturulan 9 ayrı senaryonun 7 tanesinde optimal çözüme ulaşılmıştır. Yalnızca en büyük boyutlu 2 problem için optimal çözüme belirli oranlarda yakın çözümler üretilmiştir. Tablodaki GAP değeri tahmini olarak bulunabilecek en iyi çözüme yakınlığın ne kadar olduğunu gösteren ve GAMS programı tarafından verilen değerdir. Senaryo 8 ve Senaryo 9'un optimal çözümüne ulaşmak amacıyla model 50 saatin üzerinde çalıştırılmış fakat sonuca ulaşamamıştır. Böylece 28 düğümden daha fazla sayıda düğümün olduğu problemler için uygun çözüm zamanlarında optimal sonuca ulaşamayacağı değerlendirilmiştir.

Araç rotalama probleminin NP-Hard problem sınıfına girdiği bilinmektedir [88]. Çalışmada geliştirilen modelin temeli de yine araç rotalama probleminin modeline benzemektedir. Klasik araç rotalama problemi modelinin üzerine problemin kendisine özgü varsayım ve özelliklerin eklenmesiyle elde edilmekte ayrıca rotalamanın yanında farklı problemlere de çözüm üretmektedir. Bu yüzden geliştirilen modelin de NP-Hard problem sınıfına dahil olduğu söylenebilir. NP-Hard problem sınıfına sahip modellerde problemin boyutu ve karmaşıklığı arttıkça optimale çözüme ulaşma süresi üstel bir şekilde artmaktadır [89]. Büyük boyutlu problemlerden 2 tanesine uygun zamanlarda çözüm bulunamamasının nedeninin düğüm sayısının artmasından kaynaklı problemin boyutunun büyümesi ve amaç

fonksiyonunun 4 farklı maliyet kaleminden oluşan karmaşık yapısı olduğu düşünülmektedir.

Tablo 6'daki ulaşılan sonuçlar incelendiğinde problemin gereksinimlerine uygun çözümler geliştirildiği görülmektedir. Küçük boyutlu problemler sınıfındaki ilk 3 senaryonun çözümüne bakıldığında ilk senaryo için 1 İHA'nın görevlerin yapılması için yeterli olduğu görülürken diğer 2 senaryoda var olan 2 İHA tipi de görevlere atanmakta, farklı silah ve sensörlerle donatılarak görev planlaması gerçekleştirilmektedir. Diğer tüm test problemlerinde var olan İHA'ların tamamı kullanılmaktadır. Kullanılan İHA'lar için üretilen faydalı yük planı Tablo 7'de verilmiştir.

Faydalı yük planları incelendiğinde tüm görevlerin gerçekleştirilmesi için gereken hasar ve bilgi işleme taleplerinin karşılandığı anlaşılmaktadır. Sonuçlar detaylı analiz edildiğinde orta boyutlu ve yüksek boyutlu problemlerde Silah 3 ve Silah 4'ün; yine yüksek boyutlu problemlerde Sensör 4'ün faydalı yük planlamasına dâhil edilmemesi göze çarpmaktadır. Bunun nedeninin bu silah ve sensörlerin diğerlerine göre daha maliyetli olması ve daha az maliyetli ikameleriyle görevlerin gerçekleştirilebilmesi olduğu görülmektedir. Optimal çözüme ulaşılan en büyük boyutlu problem olan Senaryo 7'nin optimal yol planı Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 5. Test Problemlerinin Detayları (Details of Test Problems)

Ölçek	Senaryo	DS	DÖİN	YÖİN	TN	Üs Sayısı	İHA Tipi Sayısı	Sensör Tipi Sayısı	Silah Tipi Sayısı	İrtifa Sayısı	Ziyaret Edilecek DÖİN Sayısı
Küçük Boyutlu	1	8	2	2	2	2	2	2	2	2	1
	2	11	3	3	3	2	2	2	2	2	1
	3	14	4	4	4	2	2	2	2	2	2
Orta Boyutlu	4	18	5	5	5	3	3	3	3	2	2
	5	21	6	6	6	3	3	3	3	2	3
	6	24	7	7	7	3	3	3	3	2	3
Yüksek Boyutlu	7	28	8	8	8	4	4	4	4	2	4
	8	31	9	9	9	4	4	4	4	2	4
	9	34	10	10	10	4	4	4	4	2	5

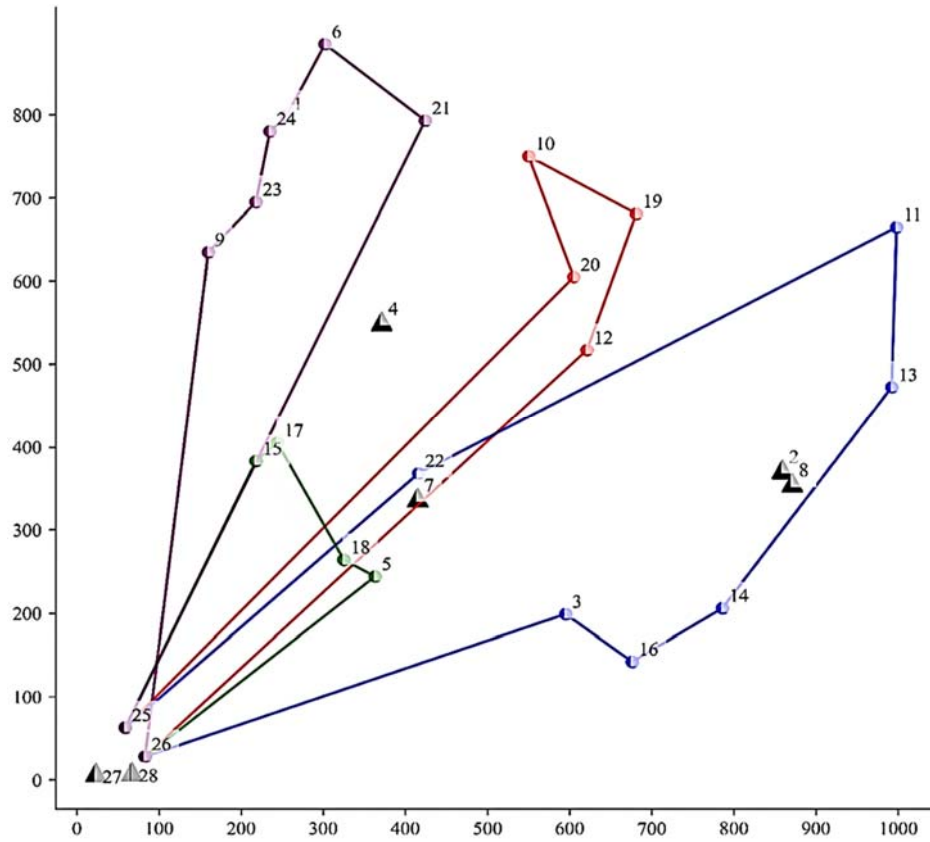
*DS: Düğüm sayısı, DÖİN: Düşük öncelikli istihbarat noktası, YÖİN: Yüksek öncelikli istihbarat noktası, TN: Taarruz noktası

Tablo 6. Test Problemleri için Yol ve İrtifa Planları (Path and Altitude Plans for Test Problems)

Ölçek	Senaryo	Toplam Maliyet	İHA Tipi	Rota	İrtifa	Optimal mi?	GAP	Çözüm Zamanı
Küçük Boyutlu	1	1255,0424	İHA 1	7-6-5-3-4-1-8	1-1-2-2-2-2	✓	0	0,33 sn
	2	4305,0735	İHA 1 İHA 2	11-8-5-1-9-10 11-4-7-6-10	1-1-2-2-1-1 1-1-2-2-2	✓	0	1,86 sn
	3	4470,0845	İHA 1 İHA 2	14-5-12-11-8-13 13-10-3-7-6-9-14	1-2-2-1-1-1 1-1-2-1-2-2-2	✓	0	18,09 sn
Orta Boyutlu	4	9535,3051	İHA 1 İHA 2 İHA 3	16-8-11-13-18 18-12-14-10-7-4-16 18-5-6-15-9-16	1-2-2-1-1 1-1-2-2-2-1-1 1-2-2-2-1-1	✓	0	5,41 dk
	5	9660,3788	İHA 1 İHA 2 İHA 3	19-11-13-8-16-20 19-1-4-7-18-17-20 20-9-15-14-12-3-10-19	1-1-1-2-2-2 1-2-2-2-1-1-1 1-2-2-1-1-2-2-2	✓	0	1,03 sa
	6	9765,3932	İHA 1 İHA 2 İHA 3	22-11-8-13-14-10-6-9-23 24-18-7-21-15-17-23 23-16-19-12-3-20-22	1-1-1-2-2-2-1-1-1 1-2-2-2-1-1-1 1-1-2-2-1-1-1	✓	0	5,94 sa
Büyük Boyutlu	7	19831,4055	İHA 1 İHA 2 İHA 3 İHA 4	25-20-10-19-12-26 26-3-16-14-13-11-22-25 25-15-17-18-5-26 26-9-23-24-1-6-21-25	1-1-2-2-2-2 1-1-1-2-2-1-1-1 1-2-2-2-2-2 1-2-2-1-1-1-2-2	✓	0	18,32 sa
	8	19886,5115	İHA 1 İHA 2 İHA 3 İHA 4	29-14-11-13-25-28 28-8-26-16-3-20-29 29-9-17-18-21-22-27-28 29-15-23-4-10-19-12-24-28	1-1-2-2-2-2 1-2-2-2-1-1-1 1-2-2-1-1-1-2-2 1-1-1-2-2-2-2-1-1	X	%1,68	> 50 sa
	9	20126,6553	İHA 1 İHA 2 İHA 3 İHA 4	34-4-30-18-15-17-24-33 32-25-16-2-11-29-14-3-34 31-12-28-13-26-19-33 34-27-21-22-20-7-23-9-33	1-1-2-2-2-1-1-1 1-2-2-2-1-1-1-2-2 1-1-2-2-2-1-1 1-1-1-2-2-2-2-1-1	X	%3,04	> 50 sa

Tablo 7. Test Problemleri için Faydalı Yük Planı (Payload Plan for Test Problems)

Ölçek	Senaryo	İHA Tipi	Sensör 1	Sensör 2	Sensör 3	Sensör 4	Silah 1	Silah 2	Silah 3	Silah 4
Küçük Boyutlu	1	İHA 1	1	5	-	-	0	2	-	-
	2	İHA 1	2	2	-	-	4	0	-	-
		İHA 2	2	3	-	-	3	0	-	-
	3	İHA 1	2	2	-	-	3	1	-	-
Orta Boyutlu		İHA 2	2	4	-	-	2	2	-	-
	4	İHA 1	1	1	0	-	6	0	0	-
		İHA 2	2	2	1	-	5	0	0	-
		İHA 3	2	2	1	-	3	0	0	-
	5	İHA 1	1	1	1	-	5	0	0	-
		İHA 2	2	1	2	-	5	0	0	-
		İHA 3	3	2	2	-	5	0	0	-
	6	İHA 1	1	2	5	-	0	0	0	-
Yüksek Boyutlu		İHA 2	1	1	0	-	7	1	0	-
		İHA 3	0	2	1	-	9	0	0	-
	7	İHA 1	1	1	1	0	3	1	0	0
		İHA 2	2	3	2	0	2	0	0	0
		İHA 3	2	2	0	0	5	0	0	0
		İHA 4	2	2	1	0	7	0	0	0
	8	İHA 1	1	3	1	0	2	0	0	0
		İHA 2	3	3	0	0	4	0	0	0
		İHA 3	2	4	0	0	4	1	0	0
		İHA 4	4	3	1	0	6	0	0	0
	9	İHA 1	0	0	4	0	3	1	0	0
		İHA 2	2	2	3	0	2	1	0	0
		İHA 3	3	3	0	0	6	0	0	0
		İHA 4	2	2	1	0	8	1	0	0

**Şekil 1.** Senaryo 7'nin Optimal Yol Plan Gösterimi (Optimal Path Planning Representation of Scenario 7)

Rotaların gösterimi incelendiğinde ilk dikkat çeken şey Üs 3 ve Üs 4'ün kullanılmamasıdır. Görevlerin yerleri incelendiğinde bu iki üssün diğer üslere göre daha arkada kaldığı ve uzaklığın artmasından dolayı rotada yer almadığı anlaşılmaktadır. Düşük öncelikli istihbarat görevlerinden DÖİN1, DÖİN3, DÖİN5 ve DÖİN6 yapılmakta DÖİN2, DÖİN4, DÖİN7 ve DÖİN8 ise yapılmamaktadır. Bunun nedeni senaryoda düşük öncelikli istihbarat görevlerinden 4 tanesinin yapılmasının istenmesidir. Model amaç fonksiyonuna uygun bir şekilde rota uzunluğundan kaynaklanan yakıt maliyeti ile görevin gerçekleştirilmesi için kullanılan sensörün maliyetinin toplam maliyeti ne kadar artırdığını analiz ederek istenen sayıda düşük öncelikli istihbarat noktasında görevi gerçekleştirmektedir. Tüm görevlerin gerçekleştirilmesi için elde bulunan 4 İHA'da kullanılmaktadır. 4 İHA'nın da rota planının kapalı bir tur şeklinde

olması ve zigzag şeklinde yollar içermemesi ulaşılan çözümlerin rota uzunluğu bakımından da en kısa rotalar olduğu sonucunu doğurmaktadır. Bunların yanında ulaşılan çözümler görevlerin gerçekleştirilmesi gereken zaman aralıklarına da sıkı sıkıya bağlı kalmakta ve gerçekleştirilmesi gereken hiçbir görev bu zaman aralığının dışında yapılmamaktadır. Rotadaki görevlerin gerçekleştirilme zamanlarına yönelik ulaşılan sonuçlar Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tüm görevler için en erken başlama ve en geç tamamlanma zamanlarına uyulduğu, bunun yanında İHA'lar için maksimum havada kalma süresini aşmayan sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir. Yapılan tüm incelemeler sonucu geliştirilen modelin problemin gereksinimlerini karşıladığı değerlendirilmektedir.

Tablo 8. Senaryo 7'de Görevlerin Gerçekleştirilme Zamanları (Task Execution Times in Scenario 7)

Görev	En Erken Gerçekleştirme Zamanı	En Geç Gerçekleştirme Zamanı	Görevin Gerçekleştirildiği Zaman
DÖİN1	1	21	6,465
DÖİN3	1	19	3,149
DÖİN5	1	17	5,204
DÖİN6	1	23	6,877
YÖİN1	2	19	2,549
YÖİN2	5	19	6,132
YÖİN3	5	18	10,403
YÖİN4	2	24	10,290
YÖİN5	2	18	8,064
YÖİN6	4	18	5,707
YÖİN7	2	17	2,506
YÖİN8	5	19	5,383
TN1	1	17	2,699
TN2	4	19	3,770
TN3	0	19	7,668
TN4	3	18	4,625
TN5	0	17	8,514
TN6	0	21	15,077
TN7	2	20	4,245
TN8	3	16	5,056

Tablo 9. Minimum Uzaklıklı Yol ve İrtifa Planları (Minimum Distance Path and Altitude Plans)

Ölçek	Senaryo	Toplam Uzaklık	İHA Tipi	Rota	İrtifa	Optimal mi?	Çözüm Zamanı
Küçük Boyutlu	1	635,51	İHA 1	7-6-5-3-4-1-8	1-1-2-2-2-2	✓	0,27 sn
	2	847,76	İHA 1	10-6-11	2-2-2	✓	1,19 sn
	3	966,48	İHA 2	11-4-7-8-5-1-9-10	1-1-2-2-2-2-1-1	✓	13,71 sn
			İHA 1	14-9-6-7-4-13	1-1-2-2-2-1		
Orta Boyutlu	4	1501,07	İHA 2	14-5-12-11-8-10-13	1-2-2-2-1-1-1	✓	2,63 dk
			İHA 1	16-9-4-7-10-18	2-2-1-1-1-2		
			İHA2	16-8-11-14-13-18	2-2-2-2-1-2		
			İHA3	18-15-6-5-12-16	1-1-1-2-2-2		
	5	2096,38	İHA 1	19-10-12-14-11-20	1-1-2-2-2-2	✓	44,56 dk
			İHA 2	19-13-8-16-6-20	1-1-1-2-2-2		
			İHA 3	20-9-17-18-7-4-1-15-19	2-2-2-1-1-1-1-2-2		
			İHA 1	22-20-3-12-7-18-23	1-1-1-2-2-2-2		
	6	2226,61	İHA 2	24-9-21-16-19-11-8-23	1-1-2-2-2-1-1-1	✓	2,04 sa
			İHA 3	23-17-25-5-10-14-13-24	2-2-2-2-1-1-1-1		
Büyük Boyutlu	7	4496,82	İHA 1	26-16-14-8-13-11-25	1-1-1-2-2-2-2	✓	5,42 sa
			İHA 2	25-18-22-20-19-26	1-1-2-2-2-1		
			İHA 3	25-15-17-9-23-24-26	1-1-1-1-1-2-2		
			İHA 4	25-1-21-10-12-7-5-26	1-2-2-1-1-1-2-2		
	8	4819,14	İHA 1	28-24-12-19-14-29	2-2-2-2-1-1	✓	14,98 sa
			İHA 2	28-10-4-5-23-15-29	2-2-1-2-1-1-1		
			İHA 3	28-25-13-11-8-26-16-29	2-2-2-1-1-1-2-2		
			İHA 4	29-27-17-18-21-7-22-20-28	1-1-1-1-1-2-2-2-2		
			İHA 1	34-4-30-18-15-7-23-9-33	1-1-1-2-2-2-2-1-1		
			İHA 2	33-24-17-20-22-21-27-34	1-2-2-2-1-1-1-2		
			İHA 3	33-19-13-26-28-12-31	1-2-2-2-1-1-1		
			İHA 4	34-14-29-3-2-11-16-25-32	1-1-2-2-2-1-2-1-1		
	9	5311,6				X	24 sa

4.4. Duyarlılık Analizi ve Karşılaştırma (Sensitivity Analysis and Benchmarking)

Model üzerinde duyarlılık analizi gerçekleştirmek için amaç fonksiyonu Eş. 23 ile değiştirilmiştir.

$$\min z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in U} \sum_{l \in L} \sum_{h \in L} d_{ijlh} X_{ijklh} \quad (23)$$

Amaç minimum maliyet değil minimum uzunluklu rotaların bulunması olarak tekrar kurgulanmıştır. Amaç fonksiyonu değiştirilen model, Tablo 5'te ayrıntıları verilen test problemleri üzerinde Tablo 4'te verilen parametre değerleri ile tekrar çözülmüştür. Ulaşılan sonuçlar Tablo 9'da sunulmuştur.

Amaç fonksiyonunun değiştirilmesiyle Senaryo 9 hariç oluşturulan tüm test problemleri için optimal çözüme ulaşılmıştır. Çalışmada geliştirilen modelin 4 farklı kalemden meydana gelen toplam maliyeti minimize etmeye çalışan amaç fonksiyonu problemin karmaşıklığını arttırdığı için Senaryo 8 ve Senaryo 9'da uygun zamanlarda optimal çözüme ulaşılamazken, sadece katedilen mesafeyi minimize etmeye çalışan amaç fonksiyonu ile Senaryo 8 için optimal çözüm elde edilmiş fakat Senaryo 9 için yine optimal çözüme ulaşılamamıştır.

Test problemlerinin çözümü ile ulaşılan sonuçlar incelendiğinde kullanılan İHA'ların faydalı yük kapasitesi ve asma noktası sınırına dikkat edilerek faydalı yük planlamasının gerçekleştiği, görevlerin hasar ve bilgi akışı taleplerinin karşılandığı, görevlerin zaman pencerelerine uygun olarak gerçekleştirildiği ve İHA'ların maksimum havada kalma sürelerine riayet edildiği görülmüştür.

5. Sonuçlar (Conclusions)

İHA'ların savaşlardaki rolü, can kaybı riskini ortadan kaldırmaları ve yüksek esneklik ile gizlilik kabiliyetleri sayesinde gün geçtikçe artmaktadır. Bu sistemler, düşük maliyetli olmaları ve farklı görevlerde kullanılabilirlikleri nedeniyle modern orduların vazgeçilmez bir parçası haline gelmektedir. Elindeki imkân ve kabiliyetleri daha iyi planlayan ve daha etkin kullanan devletler muharebe sahasında rakiplerine üstünlük sağlamaktadır.

Bu çalışmada olası bir muharebe senaryosu ortamında yapılması gereken istihbarat toplama ve fiziksel saldırı görevlerinin en düşük maliyetle gerçekleştirileceği yol planlamasını ve irtifa seviyelerini bulmak için bir karma tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Önerilen model farklı test parametreleri ve farklı senaryolar altında çalıştırılmış ve ulaşılan sonuçlar incelenmiştir. Sonuçların kurulan modelin doğruluğunu ve tutarlılığını kanıtladığı değerlendirilmektedir. Küçük boyutlu ve büyük boyutlu test problemlerinin hepsinde optimal çözüme ulaşılmış, büyük boyutlu problemlerin ise %33'lük kısmında 24 saatte optimal çözüm üretilirken %66'lık kısmında ise optimal çözüme belli oranlarda yakın uygun çözümler geliştirilmiştir. Çalışmada ele alınan problem NP-Hard problem sınıfına girdiğinden dolayı problemin boyutu arttıkça uygun zamanlarda optimal çözüm bulunamamaktadır. En son 28 düğümlü problem için optimal çözümler elde edilmiş bundan daha büyük boyutlu problemlerde ise optimal sonuçlar bulunamamıştır. Amaç fonksiyonunun değiştirilerek katedilen mesafenin minimize edildiği durumda ise çözilemeyen test problem oranı %33'e düşmüştür.

Geliştirilen bu modelin İHA'ların yol planlamasını yaparken irtifa seviyelerini de modele entegre etmesi, ayrıca eş zamanlı olarak rotadaki görevlerin gereksinimlerine bağlı faydalı yük planlamasını da gerçekleştirmesi nedeniyle literatürdeki ilgili boşluğu dolduracağı ve gelecekteki benzer çalışmalara referans noktası olabileceği

düşünülmektedir. Çalışmada en fazla 28 düğümlü (24 görev) senaryo için optimal çözüm elde edildiğinden dolayı ulaşılan bulgular bu problem boyutlarıyla elde edilen sonuçlar ile sınırlıdır. Her ne kadar gerçek hayat uygulamalarında 24 görev için yapılacak bir planlama yeterli olsa da daha fazla sayıdaki göreve yapılacak planlama uygun çözüm zamanlarında gerçekleştirilememektedir. Problemin ihtiyaçları göz önünde bulundurularak daha büyük boyutlu problemlerin çözümü için optimizasyon yöntemlerinin yerine sezgisel/metasezgisel algoritmalara başvurmak gerekmektedir. Literatürde, İHA rotalama çalışmalarında genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu gibi popülasyon tabanlı metasezgisel algoritmaların diğer tek nokta arama sezgisellerine göre daha iyi çözümler ürettiği vurgulanmaktadır [83]. Gelecek çalışmalarda mevcut problemin daha büyük boyutlarının çözümü için sezgisel/metasezgisel algoritmalar geliştirilebilir. Modele görevlerin zamana bağlı değişen fayda değerleri parametresi eklenerek hem fayda maksimizasyonu hem de maliyet minimizasyonu gerçekleştirecek çok amaçlı bir programlama modeli kurulabilir. İHA'nın dinamik ve kinematik kısıtları da göz önüne alınarak yörünge optimizasyonu gerçekleştirilerek çok daha kapsamlı bir çalışma ortaya konabilir.

Kaynaklar (References)

- Altundaş, A., An integrated approach for ammunition depot location selection and ammunition distribution network design based on P-median and vehicle routing problems, *Computer and Decision Making: An International Journal*, 1 (1), 170-184, 2024.
- Erdal, H., Kurtay, K. G., Dagistanli, H. A., & Altundaş, A., Evaluation of anti-tank guided missiles: An integrated Fuzzy Entropy and Fuzzy CoCoSo multi criteria methodology using technical and simulation data, *Applied Soft Computing*, 137, 110-145, 2023.
- Altundaş, A., Kurtay, K. G., & Erol, S., Sınır güvenliği ve müdahale görevi yapan İHA'ların ÇKKV yöntemleri ile değerlendirilmesi, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 42, 155-185, 2022.
- Savunma Sanayi Başkanlığı. Türkiye insansız hava aracı sistemleri yol haritası (2011-2030). http://ercancinar.com/wpcontent/uploads/2017/10/SSM_İHA_Sistemleri_Yol_Haritası_2012.pdf, Erişim tarihi Haziran 28, 2023
- Rojas Vitoria, D., Solano-Charris, E. L., Muñoz-Villamizar, A., & Montoya-Torres, J. R., Unmanned aerial vehicles/drones in vehicle routing problems: a literature review, *International Transactions in Operational Research*, 28 (4), 1626-1657, 2021.
- Ercan, C., & Gencer, C., A decision support system for dynamic heterogeneous unmanned aerial system fleets, *Gazi University Journal of Science*, 31 (3), 863-877, 2018.
- Kurtay K., Erol S., Facility location selection and distribution network design for ammunition recycling problem, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 40 (1), 29-42, 2024.
- Khoufi, I., Laouiti, A., & Adjih, C., A survey of recent extended variants of the traveling salesman and vehiclerouting problems for unmanned aerial vehicles, *Drones*, 3 (3), 66, 2019.
- Thibbotuwawa, A., Bocewicz, G., Nielsen, P., & Banaszak, Z., Unmanned aerial vehicle routing problems: a literature review, *Applied Sciences*, 10 (13), 4504, 2020.
- Coutinho, W. P., Battarra, M., & Fliege, J., The unmanned aerial vehicle routing and trajectory optimisation problem, a taxonomic review, *Computers & Industrial Engineering*, 120, 116-128, 2018.
- Ryan, J. L., Bailey, T. G., Moore, J. T., & Carlton, W. B., Reactive tabu search in unmanned aerial reconnaissance simulations, *Winter Simulation Conference Proceedings*, 1, 873-879, 1998.
- Chandler, P., Rasmussen, S., & Pachter, M., UAV cooperative path planning, *AIAA Guidance, Navigation, And Control Conference Proceedings*, 4370, 2000.
- Eun, Y., & Bang, H., Cooperative task assignment and path planning of multiple UAVs using genetic algorithm, *AIAA Infotech@ Aerospace 2007 Conference Proceedings*, 2982, 2007.
- Shetty, V. K., Sudit, M., & Nagi, R., Priority-based assignment and routing of a fleet of unmanned combat aerial vehicles, *Computers & Operations Research*, 35 (6), 1813-1828, 2008.
- Akkuş, Y., & Sarıççek, İ., Single allocation p-hub median problem to monitor land borders by using unmanned aircraft, *Technological*

- Developments in Networking, Education and Automation, 237-241, 2010.
16. Pakkan, B., & Ermiş, M., Assignment of a fleet of unmanned aerial vehicles to multi targets using genetic algorithms, *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 4 (3), 77-84, 2010.
 17. Mufalli, F., Batta, R., & Nagi, R., Simultaneous sensor selection and routing of unmanned aerial vehicles for complex mission plans, *Computers & Operations Research*, 39 (11), 2787-2799, 2012.
 18. Ergezer, H., & Leblebicioğlu, M. K., 3D path planning for unmanned aerial vehicles, 21st Signal Processing and Communications Applications Conference Proceedings, 1-4, 2013.
 19. Arıca, N., Cicibaş, H., & Demir, K. A., İnsansız hava araçları için çok kriterli güzergâh planlama modeli, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 11 (1), 251-270, 2012.
 20. Habib, D., Jamal, H., & Khan, S. A., Employing multiple unmanned aerial vehicles for co-operative path planning, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10 (5), 235, 2013.
 21. Ercan, C., Gencer, C., An integer programming model for the heterogeneous UAV fleet routing problems, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 12 (2), 119-144, 2013.
 22. Karakaya, M., A local optimization technique for assigning new targets to the planned routes of unmanned aerial vehicles, *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2 (2), 2014.
 23. Xargay, E., Kaminer, I., Pascoal, A., Hovakimyan, N., Dobrokhodov, V., Cichella, V., & Ghabelloo, R., Time-critical cooperative path following of multiple unmanned aerial vehicles over time-varying networks, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 36 (2), 499-516, 2013.
 24. Han, J., & Chen, Y., Multiple UAV formations for cooperative source seeking and contour mapping of a radiative signal field, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 74, 323-332, 2014.
 25. Evers, L., Dollevoet, T., Barros, A. I., & Monsuur, H., Robust UAV mission planning, *Annals of Operations Research*, 222, 293-315, 2014.
 26. Guerriero, F., Surace, R., Loscri, V., & Natalizio, E., A multi-objective approach for unmanned aerial vehicle routing problem with soft time windows constraints, *Applied Mathematical Modelling*, 38 (3), 839-852, 2014.
 27. Avellar, G. S., Pereira, G. A., Pimenta, L. C., & Iscol, P., Multi-UAV routing for area coverage and remote sensing with minimum time, *Sensors*, 15 (11), 27783-27803, 2015.
 28. Yakıcı, E., Generalization of a UAV location and routing problem by time windows, *Journal of Naval Sciences and Engineering*, 12 (2), 67-78, 2016.
 29. Chow, J. Y., Dynamic UAV-based traffic monitoring under uncertainty as a stochastic arc-inventory routing policy, *International Journal of Transportation Science And Technology*, 5 (3), 167-185, 2016.
 30. Sundar, K., Misra, S., Rathinam, S., & Sharma, R., Routing unmanned vehicles in GPS-denied environments, *International Conference on Unmanned Aircraft Systems Proceedings*, 62-71, 2017.
 31. Manyam, S. G., Rasmussen, S., Casbeer, D. W., Kalyanam, K., & Manickam, S., Multi-UAV routing for persistent intelligence surveillance & reconnaissance missions, *International Conference on Unmanned Aircraft Systems Proceedings*, 573-580, 2017.
 32. Coelho, B. N., Coelho, V. N., Coelho, I. M., Ochi, L. S., Haghazadeh, R., Zuidema, D., & da Costa, A. R., A multi-objective green UAV routing problem, *Computers & Operations Research*, 88, 306-315, 2017.
 33. Türeci, H., Interactive Approaches for Bi-Objective UAV Route Planning in Continuous Space, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı*, Ankara, 2017.
 34. Çavuş, V., & Tuncer, A., İnsansız hava araçları için yapay arı kolonisi algoritması kullanarak rota planlama, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7 (1), 259-265, 2017.
 35. Alotaibi, K. A., Rosenberger, J. M., Mattingly, S. P., Punugu, R. K., & Visoldilokpun, S., Unmanned aerial vehicle routing in the presence of threats, *Computers & Industrial Engineering*, 115, 190-205, 2018.
 36. Elloumi, M., Dhaou, R., Escrig, B., Idoudi, H., & Saidane, L. A., Monitoring road traffic with a UAV-based system, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Proceedings*, 1-6, 2018.
 37. Yılmaz N., Gencer C., Integration of sensor vision capabilities on UAV flight route optimization: A linear model and a heuristic algorithm proposal, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 1917-1928, 2019.
 38. Karabay, N., Real time unmanned air vehicle routing, *Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2018.
 39. Değirmen, S., Çavdur, F., & Sebatlı, A., Afet operasyonları yönetiminde insansız hava araçlarının kullanımı: Gözetleme operasyonları için rota planlaması, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23 (4), 11-26, 2018.
 40. Zhou, T., Zhang, J., Shi, J., Liu, Z., & Huang, J., Multidepot UAV routing problem with weapon configuration and time window, *Journal of Advanced Transportation*, 1, 7318207, 2018.
 41. Zhen, Z., Tao, G., Yu, C., & Xue, Y., A multivariable adaptive control scheme for automatic carrier landing of UAV, *Aerospace Science and Technology*, 92, 714-721, 2019.
 42. Elmas, D. A., İnsansız hava araçlarında araç rotalama problemi, *Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Ankara, 2019.
 43. Koerkamp, N. K., Borst, C., Mulder, M., & Van Paassen, M. M., Supporting humans in solving multi-UAV dynamic vehicle routing problems, *IFAC-PapersOnLine*, 52 (19), 359-364, 2019.
 44. Cicek, C. T., Gultekin, H., Tavli, B., & Yanikomeroglu, H., UAV base station location optimization for next generation wireless networks: Overview and future research directions, *1st International Conference on Unmanned Vehicle Systems-Oman Proceedings*, 1-6, 2019.
 45. Angün, E., & Dündar, U., Intelligent systems for disaster management: Unmanned aerial vehicles' surveillance problem with energy consumption constraints, *Intelligent and Fuzzy Techniques in Big Data Analytics and Decision Making: Proceedings of the INFUS 2019 Conference Proceedings*, 1269-1278, 2020.
 46. Uçar, U., & İşleyen, S., A new solution approach for UAV routing problem with moving target-heterogeneous fleet, *Politeknik Dergisi*, 22 (4), 2019.
 47. Liu, Y., Liu, Z., Shi, J., Wu, G., & Chen, C., Optimization of base location and patrol routes for unmanned aerial vehicles in border intelligence, surveillance, and reconnaissance, *Journal of Advanced Transportation*, 2019(1), 9063232, 2019.
 48. Dhulkefi, E., Durdu, A., & Terzioğlu, H., Dijkstra algorithm using UAV path planning, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8, 92-105, 2020.
 49. Dasdemir, E., Köksalan, M., & Öztürk, D. T., A flexible reference point-based multi-objective evolutionary algorithm: An application to the UAV route planning problem, *Computers & Operations Research*, 114, 104811, 2020.
 50. Daşdemir, E., Çok amaçlı insansız hava aracı rotalama, *Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2021.
 51. Park, Y., Nielsen, P., & Moon, I., Unmanned aerial vehicle set covering problem considering fixed-radius coverage constraint, *Computers & Operations Research*, 119, 104936, 2020.
 52. Ozkan, O., Optimization of the distance-constrained multi-based multi-UAV routing problem with simulated annealing and local search-based metaheuristic to detect forest fires: The case of Turkey, *Applied Soft Computing*, 113, 108015, 2021.
 53. Ozkan, O., & Atli, O., Transporting COVID-19 testing specimens by routing unmanned aerial vehicles with range and payload constraints: the case of Istanbul, *Transportation Letters*, 13 (5-6), 482-491, 2021.
 54. Gerçek, B. B., A milk run distribution system design for hybrid usage of drones, *Yüksek Lisans Tezi, Çankaya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2021.
 55. Qin, W., Shi, Z., Li, W., Li, K., Zhang, T., & Wang, R., Multiobjective routing optimization of mobile charging vehicles for UAV power supply guarantees, *Computers & Industrial Engineering*, 162, 107714, 2021.
 56. Halat, M., & Özkan, Ö., The optimization of UAV routing problem with a genetic algorithm to observe the damages of possible Istanbul earthquake, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27 (2), 187-198, 2021.
 57. Karaköse, E., Sürü İnsansız Hava Araçlarının Görev Paylaşımı için Genetik Algoritma Tabanlı Bir Yaklaşım, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34 (1), 351-360, 2022.
 58. Dasdemir, E., Batta, R., Köksalan, M., & Öztürk, D. T., UAV routing for reconnaissance mission: A multi-objective orienteering problem with time-dependent prizes and multiple connections, *Computers & Operations Research*, 145, 105882, 2022.

59. Puerto, J., & Valverde, C., Routing for unmanned aerial vehicles: Touring dimensional sets, *European Journal of Operational Research*, 298 (1), 118-136, 2022.
60. Kyriakakis, N. A., Marinaki, M., Matsatsinis, N., & Marinakis, Y., A cumulative unmanned aerial vehicle routing problem approach for humanitarian coverage path planning, *European Journal of Operational Research*, 300 (3), 992-1004, 2022.
61. Karagümüş, E., Gözetim ve keşif amaçlı çoklu insansız hava aracı rota planlaması, Yüksek Lisans Tezi, Milli Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2022.
62. Zhang, J., Cui, Y., & Ren, J., Dynamic mission planning algorithm for UAV formation in battlefield environment, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 59 (4), 3750-3765, 2022.
63. Rajan, S., Sundar, K., & Gautam, N., Routing problem for unmanned aerial vehicle patrolling missions-a progressive hedging algorithm, *Computers & Operations Research*, 142, 105702, 2022.
64. Fang, Y., Yao, Y., Zhu, F., & Chen, K., Piecewise-potential-field-based path planning method for fixed-wing UAV formation, *Scientific Reports*, 13 (1), 22-34, 2023.
65. Biskin B., Tezcaner Öztürk D., Tuncer Şakar C., Biobjective route planning for a fleet of UAVs: Exact and heuristic approaches, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (4), 2167-2178, 2023.
66. Aytekin, M., İnsansız hava aracıyla araç rotalama problemine genetik algoritma yaklaşımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2023.
67. Chen, N., Kong, F., Xu, W., Cai, Y., Li, H., He, D. & Zhang, F., A self-rotating, single-actuated UAV with extended sensor field of view for autonomous navigation, *Science Robotics*, 8(76), eade4538, 2023.
68. Shi, J., Cong, P., Zhao, L., Wang, X., Wan, S., & Guizani, M., A two-stage strategy for UAV-enabled wireless power transfer in unknown environments, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 23 (2), 1785-1802, 2023.
69. Wang, T., Du, W., Jiang, C., Li, Y., & Zhang, H., Safety constrained trajectory optimization for completion time minimization for UAV communications, *IEEE Internet of Things Journal*, 1, 1-11, 2024.
70. Naouri, A., Ning, H., Nouri, N. A., Khelloufi, A., Sada, A. B., Naouri, S. & Dhelim, S., Maximizing UAV fog deployment efficiency for critical rescue operations: A multi-objective optimization approach, *Future Generation Computer Systems*, 159, 255-271, 2024.
71. Jasim, A. N., & Fourati, L. C., Guided Genetic Algorithm for Solving Capacitated Vehicle Routing Problem with Unmanned-Aerial-Vehicles, *IEEE Access*, 106333, 2024.
72. Mourtzis, D., Angelopoulos, J., & Panopoulos, N., Unmanned Aerial Vehicle (UAV) path planning and control assisted by Augmented Reality (AR): The case of indoor drones, *International Journal of Production Research*, 62 (9), 3361-3382, 2024.
73. He, Y., & Wang, M., An improved chaos sparrow search algorithm for UAV path planning, *Scientific Reports*, 14 (1), 366, 2024.
74. Zhou, X., Tang, Z., Wang, N., Yang, C., & Huang, T., A novel state transition algorithm with adaptive fuzzy penalty for multi-constraint UAV path planning, *Expert Systems with Applications*, 248, 123481, 2024.
75. Zhou, C., Kadhim, K. M. R., & Zheng, X., Multi-UAVs path planning for data harvesting in adversarial scenarios, *Computer Communications*, 221, 42-53, 2024.
76. Chen, Y., Yu, Q., Han, D., & Jiang, H., UAV path planning: Integration of grey wolf algorithm and artificial potential field, *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, e8120, 2024.
77. Gezer A., Turan Ö., Baklacioğlu T., Path planning based on unmanned aerial vehicle performance with segmented cellular genetic algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 40 (1), 135-154, 2024.
78. Uçar U., İşleyen S., Gökçen H., Experimental analysis of meta-heuristic algorithms for moving customer vehicle routing problem. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 459-476, 2021.
79. Wen, H., Shi, Y., Wang, S., Chen, T., Di, P., & Yang, L., Route planning for UAVs maritime search and rescue considering the targets moving situation, *Ocean Engineering*, 310, 118623, 2024.
80. Caballero, A., Roman-Escorza, F. J., Maza, I., & Ollero, A., A multi-UAV route planning method for fast inspection of electric power transmission lines, *2024 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) Proceedings*, 835-842, 2024.
81. Faiz, T. I., Vogiatzis, C., Liu, J., & Noor-E-Alam, M., A robust optimization framework for two-echelon vehicle and UAV routing for post-disaster humanitarian logistics operations, *Networks*, 84 (2), 200-219, 2024.
82. Li, Y., Wang, S., Zhou, S., & Wang, Z., A mathematical formulation and a tabu search heuristic for the joint vessel-UAV routing problem, *Computers & Operations Research*, 106723, 2024.
83. Jasim, A. N., & Fourati, L. C., Guided genetic algorithm for solving capacitated vehicle routing problem with unmanned-aerial-vehicles, *IEEE Access*, 2024.
84. Borges, N. P., Ghedini, C. G., & Ribeiro, C. H. C., Mitigating Risk in UAV Aid Delivery Missions: A Safe Path Prioritization Approach, *IEEE Access*, 2024.
85. Zhang, W., Peng, C., Yuan, Y., Cui, J., & Qi, L., A novel multi-objective evolutionary algorithm with a two-fold constraint-handling mechanism for multiple UAV path planning, *Expert Systems with Applications*, 238, 121862, 2024.
86. Debnath, D., Vanegas, F., Boiteau, S., & Gonzalez, F., An Integrated Geometric Obstacle Avoidance and Genetic Algorithm TSP Model for UAV Path Planning, *Drones*, 8 (7), 302, 2024.
87. Zhou, X., Tang, Z., Wang, N., Yang, C., & Huang, T., A novel state transition algorithm with adaptive fuzzy penalty for multi-constraint UAV path planning, *Expert Systems with Applications*, 248, 123481, 2024.
88. Al Theeb, N., Abu-Aleqa, M., & Diabat, A., Multi-objective optimization of two-echelon vehicle routing problem: Vaccines distribution as a case study, *Computers & Industrial Engineering*, 187, 109590, 2024.
89. Saxena, N., How Easy Is It to Describe Hard Polynomials?: Technical Perspective, *Communications of the ACM*, 67 (2), 100-100, 2024.

