



## Biobjective route planning for a fleet of UAVs: Exact and heuristic approaches

Büşra Bişkin<sup>1,2</sup>, Diclehan Tezcaner Öztürk<sup>1\*</sup>, Ceren Tuncer Şakar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Engineering Faculty, Hacettepe University, 06800, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Engineering Faculty, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

### Highlights:

- Biobjective routing of a fleet of UAVs tasked with reconnoitring targets with different importance levels
- Mixed integer linear programming and genetic algorithm approaches
- Good approximation results and low computational requirements with the genetic algorithm

### Keywords:

- Unmanned aerial vehicles
- Route planning
- Multiobjective optimization
- Genetic algorithm

### Article Info:

Research Article

Received: 03.09.2021

Accepted: 13.10.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.990791

### Correspondence:

Author: Diclehan Tezcaner Öztürk  
e-mail: diclehanozturk@hacettepe.edu.tr  
phone: +90 312 297 8950

### Graphical/Tabular Abstract

This study addresses the route planning problem for a fleet of homogeneous unmanned aerial vehicles (UAVs) tasked with exploring a terrain. The terrain contains numerous target points, each with a different level of importance. The routes are formed considering two objectives: minimization of the total distance traveled and maximization of the total importance of visited targets. The nondominated frontier of a problem instance with three UAVs and 15 targets is given in Figure A.

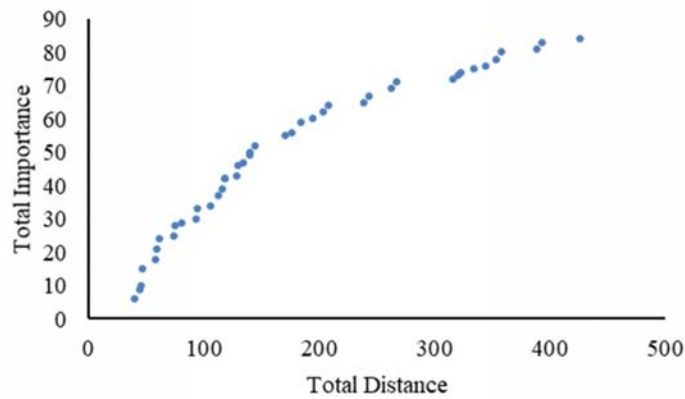


Figure A. The nondominated frontier of a 3-UAV problem

### Purpose:

This study aims to develop time-efficient and computationally easy methods that find or approximate the nondominated frontier of the UAV route planning problem considered.

### Theory and Methods:

A mixed integer linear programming model is developed that finds routes of the UAVs by optimizing the two objectives. Since the computational burden of the mathematical model increases significantly as the problem size increases, a genetic algorithm (GA\_fİHA) that approximates the nondominated frontier is also established.

### Results:

Three problem instances with varying numbers of UAVs and targets are designed, and their nondominated frontiers are generated and approximated using the  $\epsilon$ -constraint method and GA\_fİHA, respectively. GA\_fİHA results in good approximations of the nondominated frontier with an average hypervolume indicator value of 97.38% for 15 different runs. Additionally, it runs in approximately 1.7% of the duration of the exact method.

### Conclusion:

The proposed genetic algorithm GA\_fİHA is time-efficient and approximates the nondominated frontier well. Its computational requirements do not increase substantially as the problem size increases. Considering its computational efficiency and approximation quality, GA\_fİHA can be used in practical operations successfully.



## İki amaçlı İHA filosu rota planlaması: Kesin ve sezgisel yöntemler

Büşra Bişkin<sup>1,2</sup>, Diclehan Tezcaner Öztürk<sup>1\*</sup>, Ceren Tuncer Şakar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06800 Beytepe, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe, Ankara, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Farklı önem seviyelerine sahip hedeflerin keşfi ile görevlendirilmiş bir İHA filosunun iki amaçlı rotalanması
- Karma tamsayı doğrusal programlama ve genetik algoritma yaklaşımları
- Genetik algoritma ile iyi yaklaşık sonuçlar ve düşük hesaplama gereksinimleri

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 03.09.2021

Kabul: 13.10.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.990791

### Anahtar Kelimeler:

İnsansız hava aracı,  
rota planlama,  
çok amaçlı optimizasyon,  
genetik algoritma

### ÖZ

İnsansız hava araçlarının (İHA'ların) askeri ve sivil amaçlarla artan kullanımı ile birlikte İHA rotalama problemi önem kazanmaktadır. İHA'ların sayısı ve özellikleri, rotalama yapılan alanın özellikleri ve kullanılan amaç fonksiyonları gibi faktörlerle değişkenlik gösteren bu problem için literatürde farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada, bir üstten ayrıldıktan sonra farklı önem derecelerine sahip olan hedef noktalarına uğrayarak geri dönmesi gereken özdeş bir İHA filosunun rota planlama problemi ele alınmıştır. Toplam mesafenin minimize edilmesi ve ziyaret edilen hedeflerin toplam önemlerinin maksimize edilmesi şeklinde iki amaç fonksiyonu kullanılmış, tek bir çözüm yerine alternatif etkin çözümler üretilmiştir. Problem matematiksel model ve genetik algoritma yaklaşımları ile çözülmüş, farklı sayıda İHA ve hedef noktaları ile sayısal testler yapılmıştır. İki yöntemle de karar vericilere sunmak üzere amaç uzayının farklı bölgelerinden çözümler elde edilebilmiştir. Ayrıca, genetik algoritma ile çok daha kısa sürelerde kesin çözümlere yakın çözümler bulunabildiği görülmüştür.

## Biobjective route planning for a fleet of UAVs: Exact and heuristic approaches

### HIGHLIGHTS

- Biobjective routing of a fleet of UAVs tasked with reconnoitring targets with different importance levels
- Mixed integer linear programming and genetic algorithm approaches
- Good approximation results and low computational requirements with the genetic algorithm

### Article Info

Research Article

Received: 03.09.2021

Accepted: 13.10.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.990791

### Keywords:

Unmanned aerial vehicles,  
route planning,  
multiobjective optimization,  
genetic algorithm

### ABSTRACT

As the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for military and civilian purposes increases, UAV route planning problem has gained importance. The problem varies according to factors like the number and properties of UAVs, the characteristics of the terrain and the objective functions used; and different approaches have been developed for it in the literature. This study considers route planning for a fleet of homogeneous UAVs that need to collect information from target points with different levels of importance before returning to the base. The two objectives used are minimizing the total distance traveled and maximizing the total importance level of the targets visited, and alternative efficient solutions are generated rather than a single solution. The problem is solved with mathematical modelling and genetic algorithm approaches, and computational tests are made with different number of UAVs and target points. Solutions from different regions of the objective space could be obtained to be presented to the decision makers by both methods. Also, with the genetic algorithm, solutions close to the exact solutions could be obtained in considerably shorter computation times.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : busrabiskin@gazi.edu.tr, \*diclehanozturk@hacettepe.edu.tr, cerents@hacettepe.edu.tr / Tel: +90 312 297 8950

## 1. Giriş (Introduction)

İnsansız hava araçları (İHA'lar), askeri alanda kullanılmak üzere üretilmiş ve sonrasında hem askeri hem sivil uygulamalarda sıkça kullanılmıştır. İHA'ların temel askeri kullanım amaçları gözetim, keşif ve düşman bölgeye saldırı olarak sınıflandırılabilir. Askeri İHA'lar insanlar için zor ve tehlikeli görevleri yerine getirebilmeleri sebebiyle ülkelerin savunma stratejilerinde giderek artan bir öneme sahip olmaktadır. İHA'ların sivil kullanımında ise çevreyi izleyerek sıcaklık, nem gibi veriler toplama, trafik denetleme ve afet yardım operasyonları gibi uygulamalar görülmektedir. Bu uygulamalar da büyük verileri etkin şekilde toplayabilme ve zamanında müdahale şansı tanıma açılarından önem kazanmaktadır.

İHA kullanımındaki temel bir konu optimal rota planlaması yapılmasıdır. Belirli bir görev için kullanılan İHA, çıkış noktasından ayrıldıktan sonra gitmesi gereken noktaları doğru sırada ziyaret ederek görevini en etkin şekilde yerine getirmelidir. Coutinho vd.'nin [1] çalışması, İHA rota planlaması probleminin literatürde artan bir sıklıkla çalışıldığını göstermektedir. Yapılan çalışmalar, tek İHA veya İHA filosu kullanılması, İHA'lar için kapasite kısıtları tanımlanıp tanımlanmaması, problemde tek veya daha fazla kriter olması, rota bölgesinde radar bulunup bulunmaması gibi farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Probleme getirilen çözüm yöntemleri de çeşitlidir. Kesin çözümler elde etmek için tamsayı matematiksel modeller kullanılmakla beraber, rotalama problemi NP-zor sınıfında olduğu için sezgisel algoritmalara da sıklıkla rastlanmaktadır.

Bu çalışmada, aynı özelliklere sahip İHA'lardan oluşan bir filonun belirli bir alanda keşif yapması problemi incelenmiştir. Alanda farklı önem derecelerine sahip hedef noktalar bulunmaktadır. İHA filosu ile olabildiğince fazla noktaya uğranılırken aynı zamanda toplam kat edilen mesafe de kısıtlanmaya çalışılmıştır. Bu iki çelişen kriter göz önüne alınarak farklı toplam mesafe ve önem değerlerine sahip etkin rotaları bulan bir matematiksel model ve ayrıca kesin olarak çözülmesi zor problemler için bir genetik algoritma geliştirilmiştir. Literatürde, farklı önemlere sahip noktalar için İHA filosu rotalamaya yönelik çalışmaların sayısı azdır. İHA'ların kullanıldıkları bölgelerin sürekli genişlediği düşünüldüğünde olası tüm görev noktalarına giden rotalar yerine belirli kısıtlar dahilinde hedefler arası önceliklendirme yapılabilen rotalar önem kazanmaktadır; bu makale bu açıdan literatüre katkı sağlamaktadır. Ek olarak bu çalışma, toplam önem ve kat edilen mesafeyi ayrı kriterler olarak kullanmakta ve probleme iki kriterli bir yaklaşım getirmektedir; İHA filoları için bu şekilde bir çalışmaya rastlanmamıştır. İki kriterde farklı değerlere sahip etkin çözümler ortaya çıkarıldıktan sonra karar vericiler bu alternatif çözümler arasından önceliklerine göre tercih yapabileceklerdir. Bu kapsamda geliştirilen kesin ve sezgisel yöntemler, farklı İHA ve hedef sayıları içeren problemlerde uygulanmıştır. Yapılan uygulamalar sayesinde bu yöntemler çözüm kalitesi ve zamanı açısından detaylı olarak kıyaslanabilmektedir.

Çalışma şu şekilde ilerlemektedir: Bölüm 2'de ilgili İHA rotalama literatürü taranmaktadır. Bölüm 3, incelenen problemin detaylı tanımını yapmakta ve oluşturulan matematiksel modeli sunmaktadır. Geliştirilen genetik algoritmanın detayları Bölüm 4'te verilmekte, iki yaklaşımın farklı İHA ve hedef sayıları içeren problemler için sonuçları Bölüm 5'te sunulmaktadır. Bölüm 6'da çalışmanın genel değerlendirmesi yapılmakta ve gelecek çalışmalar tartışılmaktadır.

## 2. Literatür Taraması (Literature Review)

İHA rotalama literatürünün büyük bir kısmında tek bir İHA ile çalışılmıştır. Sundar ve Rathinam [2], bir İHA'nın tüm hedef noktalarına en az bir kez uğraması gerektiği ve bu esnada farklı

depolardan yakıt alabildiği bir problemi matematiksel olarak modellemiş ve bir yaklaşım algoritmasıyla çözmüştür. Ousingawat [3], rotalama yapılan alanın farklı bölgelerindeki belirsizliği entropi ile ölçmüş ve yüksek belirsizliğe sahip bölgelere ağırlık verecek bir rotalama üzerinde çalışmıştır. Hernández-Hernández vd. [4], tek bir İHA için tehlikeli bölgeleri, zaman ve hız limitlerini de gözeterek üç amaç fonksiyonu ele almıştır. Amaç fonksiyonları harcanan zamanı minimize etmek, kullanılan yakıtı minimize etmek ve kapsanan alanı maksimize etmek olarak belirlenmiştir. Qu vd. [5], bir İHA'nın iki nokta arası tehdit bölgelerinin bulunduğu bir ortamda rotalanması problemini ele almışlardır. Yakıt tüketimi ve tehdit riskini tek bir amaç fonksiyonu olarak temsil etmişler ve çözüm için hibrit Grey Wolf optimizasyon algoritmasını önermişlerdir. Birden fazla amaç fonksiyonu kullanan diğer çalışmalara örnek olarak Tezcaner Öztürk ve Köksalan [6] kat edilen mesafeyi minimize etmeyi ve radara yakalanma riskini minimize etmeyi aynı anda göz önüne alarak karar vericinin tercih ettiği çözümü bulmak için bir interaktif algoritma geliştirmiştir. Tezcaner Öztürk ve Köksalan [7] bu iki amaç fonksiyonuyla çalışırken İHA'nın sürekli uzayda rotalanabileceği şekilde problemi geliştirmiş, Türeci [8] bu problem için interaktif algoritmalar önermiştir. Daşdemir vd. [9] de tek bir İHA için radar riski ve mesafeyi minimize etmek üzerine çalışmış ve referans noktası bazlı arama yapan çok amaçlı evrimsel bir algoritma geliştirmiştir.

Korkmaz vd.'nin [10] belirttiği gibi, İHA'ların önemli bir avantajı takım olarak koordine olmuş bir biçimde uçabilmeleri ve bu şekilde büyük alanları kısa zamanda tarayabilmeleridir. Bu sebeple İHA'ların filo halinde rotalanması da literatürde artan bir önemle çalışılmaktadır ve bu çalışmalar tek veya çok amaçlı olabilmektedir. Lamont vd. [11] İHA'ları sürüler halinde ele almış, maliyet ve riski minimize etmeyi amaçlayan kapsamlı görev planlamaları yapmıştır. Peng ve Gao [12], İHA filosunun stokastik gözlemler yaptığı keşif problemini bir evrimsel algoritma ile çözmüştür. Çalışmada keşif süresi, İHA sayısı ve İHA'ların toplam rota süresinin minimizasyonu amaçlanmıştır. Levy vd. [13] İHA'lara yakıt kısıtları eklemiş ve rotalarda yakıt ikmali yapılabilecek depo noktaları kullanmıştır. Amaç fonksiyonu olarak kullanılan yakıt miktarı minimize edilmiş, problem komşuluk araması yapan metasezgiseller ile çözülmüştür. Wu vd.'nin [14] çalışmasında İHA'lar keşif, çatışma ve vuruş olarak üç tip görevle ayrılmıştır. Tüm İHA'lar tarafından kat edilen toplam mesafe minimize edilirken İHA'lar bazında güzergâh uzunluğuna kısıtlar getirilmiştir. Problem bir genetik algoritma ile çözülmüştür. Uçar ve İşleyen [15] hareketli hedefleri etkisiz hale getirmeyi hedefleyen heterojen bir İHA filosu rotalama problemini ele almıştır. Hedefler ve vurucular Analitik Hiyerarşi Süreci ile önceliklendirilmiş, tüm hedeflere minimum sayıda İHA kullanarak gidecek rotalar bu önceliklendirmeye bağlı bir sezgisel algoritma ile oluşturulmuştur. Gencer ve Yılmaz [16] çalışmalarına İHA'ların sensör görüş yeteneklerini de eklemiş ve gidilen mesafenin minimize edilmesini amaçlamıştır. Problem için hem doğrusal hem de iki aşamalı bir sezgisel yöntem önerilmiştir. Liu et al [17], gerçek zamanlı yol gözetleme probleminde kullanılan İHA sayısını ve kat edilen toplam mesafeyi minimize eden bir evrimsel algoritma geliştirmiştir. Semiz ve Polat [18] ise, bir İHA filosu tarafından kapsanarak korunması gereken bir bölgede zaman pencereli rotalama problemini ele almıştır. Toplam mesafenin minimize edildiği problemdeki noktalar kümelenecek her küme için kesin çözümler bulunmuştur.

Literatürdeki bazı çalışmalarda İHA rotaları ile kapsanan hedef noktaların sayısı maksimize edilmeye çalışılmış, bu esnada uçuş menzili ve zaman gibi faktörler kısıt olarak ele alınmıştır. Karakaya [19], önceden belirlenen sayıda ve uçuş menzili sınırlı İHA ile kapsanabilecek maksimum hedefi bulmak için bir karınca kolonisi algoritması önermiştir. Alotaibi vd. [20] kapsanan hedef noktaların sayısını optimize ederken askeri tehdit noktalarına maruz kalma

derecesini de göz önüne almıştır. İHA'ların görev süresinin ve toplam tehdit seviyesinin sınırlandırıldığı problem dal-kesme-fiyat metodolojisi ile çözülmüştür. Yakıcı'nın [21] çalışması, hedef noktalara farklı ödül değerleri ataması ile farklılaşmaktadır. Probleme oryantiring bakış açısı ile yaklaşmış, toplanan ödül miktarı maksimize edilirken ödüller arasında gezen İHA'lar için uçuş zamanı kısıtları getirilmiştir. Ergezer ve Leblebicioğlu [22], bir İHA filosunun kısıtlı zamanda en fazla bilgiyi alacak rotalarının planlamasına çalışmışlardır. Problemlerinde, hedeflerdeki bilginin zamanla azaldığını ve girilmemesi gereken bölgeler olduğunu varsaymışlardır. Rotayı, belli kurallar çerçevesinde yerlerini belirledikleri ar-noktaların birleşimi olarak oluşturmuşlardır. Daha yeni bir çalışmada Daşdemir vd. [23], tek bir İHA'nın radar tehdidi olan bir alanda başlangıç üssünden bitiş üssüne giderken farklı noktalardan bilgi topladığı problemi ele almıştır. Her nokta için farklı olabilen bilgi miktarlarının zamana bağlı olarak değiştiği düşünülmüş, problemi çözmek için kesin ve sezgisel yaklaşımlar önerilmiştir.

Yukarıda yapılan literatür taramasının ışığında, bu makalede yapılan çalışma farklı öneme sahip hedef noktalarını keşfeden bir İHA filosu için iki amaç gözeterek rotaların planlanması olarak tanımlanabilir. Bilgimiz dahilinde İHA filoları rotalaması üzerine bu şekilde tanımlanan bir çalışma bulunmamaktadır. Problemden, uçuş menzili kısıtı olan özdeş İHA'lar kullanılmakta, ulaşılan noktaların toplam önem seviyesi maksimize edilirken aynı anda toplam kat edilen mesafe de minimize edilmektedir. Bu iki faktör ayrı amaçlar olarak ele alınmakta, karar vericiye tek bir çözüm sunmak yerine etkin çözümler kümesi sunulmaktadır. Çözüm yöntemi olarak tamsayılı bir matematiksel model ve bir genetik algoritma önerilmiştir. Geliştirilen yöntemler üç farklı boyuttaki problem örnekleri ile kapsamlı olarak test edilmiştir.

### 3. Problem Tanımı (Problem Definition)

Bu bölümde, incelenen problemin ve geliştirilen matematiksel modelin detayları verilmiştir.

#### 3.1. Problemin Özellikleri (Problem Characteristics)

Problemin özellikleri, İHA filosu, uçuş alanı, ve kullanılan amaç fonksiyonları başlıklarında anlatılmıştır.

##### 3.1.1. İHA filosu ve uçuş alanı özellikleri (Characteristics of the UAV fleet and the terrain)

Problemden rota planlaması yapılan filo aynı uçuş özellikleri ve yakıt kapasitelerine sahip İHA'lardan oluşmaktadır. İHA'ların uçuş hızları görev boyunca sabittir ve bu nedenle her birinin görev boyunca gidebileceği maksimum mesafe eşittir. İHA'lar başlangıçta aynı üste konumlanmışlardır ve görev sonunda tekrar başlangıç üssüne dönmeleri gerekmektedir. Hedefleri ziyaret etmek için gerekli sayıda İHA üsten ayrılabilir.

Uçuş alanında farklı önem derecelerine sahip hedef noktaları bulunmaktadır. Bu hedef noktalarının konumları görev süresi boyunca sabittir ve başlangıçta bilinmektedir. İHA'ların alanda her noktaya ulaşabildikleri varsayılmıştır.

##### 3.1.2. Amaç fonksiyonları (Objective functions)

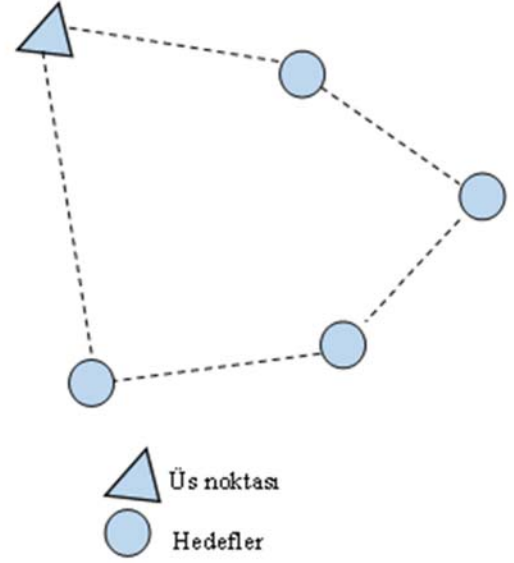
İHA rotaları oluşturulurken, iki amaç fonksiyonu gözetilmektedir: İHA filosunun toplam kat ettiği mesafe minimize edilirken gidilen hedeflerin toplam önem seviyesi maksimize edilmektedir. Toplam mesafe minimizasyonu ve genellikle buna bağlı olarak gelişen yakıt kullanımı ve görev süresi minimizasyonu, literatürde İHA rotalama problemleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Edinilen toplam

bilginin veya toplanan ödülün maksimizasyonu ise, daha önce bahsedildiği gibi az sayıda çalışmada yer almıştır.

İHA'lar tüm alanda hareket edebildikleri için hedefler arası en kısa mesafeli yolu kullanmaktadırlar (Şekil 1). Bu durumda, Kartezyen koordinatları  $(x, y)$  ile gösterilen  $k$  ve  $l$  hedefleri arasında gidilen mesafe  $(d_{kl})$ , Eş. 1 ile hesaplanmaktadır.

$$d_{kl} = \sqrt{(x_k - x_l)^2 + (y_k - y_l)^2} \quad (1)$$

Çalışmada kullanılan ikinci amaç fonksiyonunda, her hedefin önem derecesi diğerlerine göreceli değer olacak şekilde bir tamsayı ile temsil edilmektedir ve bu önem derecesi görev süresi boyunca sabittir.



Şekil 1. Hedefler arası olası bir İHA rotası (A possible UAV route between targets)

#### 3.2. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Matematiksel modelde kullandığımız kümeler, değişkenler ve açıklamaları aşağıda verilmiştir.

*Kümeler:*

$U$  : İHA kümesi  
 $H$  : Hedef noktaları ve üs noktasından oluşan küme (üs noktası  $\{0\}$  ile temsil edilmiştir.)

*Parametreler:*

$d_{ij}$  : Nokta  $i \in H$  ve  $j \in H$  arası en kısa mesafe  
 $p_i$  : Nokta  $i \in H$ 'nin önemi  
 $d_{maks}$  : İHA'ların uçuş menzili

*Karar Değişkenleri:*

$x_{iju}$  : 1 eğer İHA  $u \in U$ ,  $i \in H$  ve  $j \in H$  noktaları arası giderse, 0 aksi durumda

*Matematiksel Model:*

$$\text{Min } \sum_{i \in H} \sum_{j \in H} \sum_{u \in U} d_{ij} x_{iju} \quad (2)$$

$$\text{Maks } \sum_{i \in H} \sum_{j \in H} \sum_{u \in U} p_i x_{iju} \quad (3)$$

$$\sum_{j \in H \setminus \{0\}} x_{0ju} \leq 1, u \in U \quad (4)$$

$$\sum_{i \in H, i \neq j} x_{iju} = \sum_{i \in H, i \neq j} x_{jiu}, j \in H, u \in U \quad (5)$$

$$\sum_{i \in H} \sum_{j \in H} d_{ij} x_{iju} \leq d_{maks}, u \in U \quad (6)$$

$$\sum_{i \in H} \sum_{u \in U} x_{iju} \leq 1, j \in H \setminus \{0\} \quad (7)$$

$$u_i - u_j + (|H| - 1)x_{iju} \leq |H| - 2, i, j \in H \setminus \{0\}, i \neq j, u \in U \quad (8)$$

$$1 \leq u_i \leq |H| - 1, i \in H \setminus \{0\} \quad (9)$$

$$x_{iju} \in \{0,1\}, i, j \in H, u \in U \quad (10)$$

Problemin amaç fonksiyonları sırasıyla, toplam gidilen mesafenin minimizasyonu (Eş. 2) ve toplam önemin maksimizasyonudur (Eş. 3). İHA'lar üstten en fazla bir kez çıkabilirler (Eş. 4) ve her varılan hedeften çıkış da yapılmalıdır (Eş. 5). Üsten çıkan İHA'ların tekrar üsse dönmesi de Eş. 5 ile sağlanmıştır. Eş. 6'da tanımlanan kısıt ile her İHA'nın gidebileceği maksimum mesafe tanımlanmıştır. Her hedeften en fazla bir İHA geçebilir (Eş. 7). Eş. 8 ve Eş. 9 ile altturlar elenmiştir. Karar değişkenlerinin alabilecekleri değerler Eş. 10 ile gösterilmiştir.

Yukarıda verilen matematiksel model çözülerek etkin çözümler bulunmaya çalışılır. İki amaç fonksiyon değeri sırasıyla  $(M_x, O_x)$  olan bir  $x$  çözümünün etkin olması için,  $M_y \leq M_x, O_y \geq O_x$ , ve  $M_y < M_x$  veya  $O_y > O_x$  koşullarını sağlayan başka bir çözüm  $y$ 'nin bulunmaması gerekmektedir. Etkin çözüm  $x$ 'e denk gelen amaç fonksiyon vektörü  $(M_x, O_x)$  baskın nokta olarak adlandırılır. Baskın noktaların tümü baskın sınırı oluşturur.

Matematiksel modelin çözümünde, çok amaçlı optimizasyon için geliştirilen  $\varepsilon$ -kısıt yöntemi uygulanmıştır [24]. Bu yöntemde, problemin amaç fonksiyonlarının bir tanesi amaç olarak tutulurken diğerleri kısıt olarak ifade edilmekte ve alabilecekleri değerler  $\varepsilon$  ile sınırlanmaktadır. Bu şekilde  $\varepsilon$  değerleri sistematik bir şekilde değiştirilerek tüm etkin çözümler bulunabilir. Bu çalışmada, toplam önem kısıt olarak değerlendirilmiş ve Eş. 11'deki amaç fonksiyonu Eş. 4-Eş. 10 ve Eş. 12 kısıtlarıyla çözülmüştür.

$$\text{Min } \sum_{i \in H} \sum_{j \in H} \sum_{u \in U} d_{ij} x_{iju} - \rho \sum_{i \in H} \sum_{j \in H} \sum_{u \in U} p_i x_{iju} \quad (11)$$

$$\sum_{i \in H} \sum_{j \in H} \sum_{u \in U} p_i x_{iju} \geq \varepsilon \quad (12)$$

Burada  $\rho$  çok küçük pozitif bir sayıdır. Amaç fonksiyonu (Eş. 11) ile toplam kat edilen mesafe minimize edilmiş, ikincil önem derecesinde de toplam önem maksimize edilmiştir. Bu ikinci terim ile etkin çözümlere ulaşılması garantilenmiştir. Eş. 12'de tanımlanan kısıt ile toplam önem belirli bir değerin üzerinde tutulmuştur.

Model çözümünde, ilk olarak  $\varepsilon$  değerine 1 verilmektedir. Bu modelin optimal çözümünde edinilen toplam önem değerinin  $P$  olduğu varsayıldığında, modelin bir sonraki çözümünde  $\varepsilon = P + 1$  olarak güncellenmektedir. Önem değerleri tamsayı olduğu için bu yöntemle etkin çözümlerin hepsi bulunabilmektedir. Her  $\varepsilon$  değeri için çözülen model, her İHA'nın hangi hedeflere hangi sırayla gideceğini belirler.

Matematiksel model, az sayıda hedef ve İHA olması durumunda kısa zamanda çözüm vermektedir. Hedef ve İHA sayısı arttıkça modelin çözümü zorlaşmaktadır. Büyük boyutlu İHA rotalama problemleri için alternatif bir çözüm yöntemi olarak bir genetik algoritma

geliştirilmiştir. Bir sonraki bölümde bu yöntemin detayları verilmektedir.

#### 4. Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)

Genetik algoritmalar, en yaygın olarak kullanılan metasezgisel yaklaşımların içinde yer almaktadır. Genetik algoritmalar genel olarak, bir çözüm popülasyonunun jenerasyonlar boyunca iyileşmesi ve giderek daha iyi bireyler üretmek için optimal çözüme doğru yakınsaması mantığı üzerine kuruludur. Her jenerasyonda çözüm kalitesi yüksek ebeveynler seçilir ve bunların çaprazlanmasından oluşan yüksek kaliteli bireyler bir sonraki jenerasyona taşınır. Mutasyon operatörleri ile de desteklenen bu sürecin belirli sayıda iterasyon sonrası optimal çözüme yakın sonuçlar üretmesi beklenir. Bu çalışmada kullanılan genetik algoritmanın detayları aşağıda verilmiştir.

##### 4.1. Mekanizmalar (Mechanisms)

Kullanılan temel genetik algoritma ve algoritmada kullanılan mekanizmalar aşağıda detaylandırılmıştır.

##### 4.2. Genetik Algoritma (The Genetic Algorithm)

Bu makalede geliştirilen ve aşağıda açıklanan mekanizmalar, literatürde bulunan çok amaçlı genetik algoritmalarda kullanılabilir. Bu çalışmada, mekanizmalar Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)'ye [25] entegre edilmiştir.

NSGA-II, baskınlık ölçütünü kullanan ve iyi çözümleri saklayan çok amaçlı bir genetik algoritmadır. Algoritmanın en önemli ayırt edici özelliği, çözüm seçiminde kullandığı yöntemdir. Bu yöntemde, tüm çözümler öncelikle sınırlara ayrılırlar. İlk sınırı baskın çözümler oluşturur. İkinci sınırı, ilk sınırdaki çözümler göz ardı edilirken kalan çözümler arasından baskın olanlar oluşturur. Üçüncü sınır benzer şekilde, hem birinci hem ikinci sınır göz ardı edilerek bulunur. Algoritma ilk sınırdaki çözümlerden başlayarak bir sonraki jenerasyona çözüm seçer. Eğer jenerasyondaki boş yer sayısı, alınması planlanan sınırdaki çözüm sayısından fazla ise daha az kalabalık bölgelerdeki çözümler seçilmeye çalışılır. Bunun için kalabalıklık mesafesi ölçütü kullanılır. Bir kriterde tüm çözümler değerlerine göre sıralanır. Bir çözümün bir önceki ve bir sonraki çözümünün bu kriterdeki farkı hesaplanır. Tüm kriterlerde hesaplanan bu farkların toplamı o çözümün kalabalıklık mesafesi değeri eşit olur. Uç çözümlerin kalabalıklık mesafesi değerleri ise sonsuz olarak atanır. Kalabalıklık mesafesi değerleri fazla olan çözümler ile jenerasyondaki kalan yerler doldurulur.

##### 4.3. Çözüm Temsili (Solution Representation)

Algoritmada her birey bir çözümü, yani İHA'ların hangi hedeflere hangi sırayla gittikleri bilgisini içeren rotaları temsil eder. Birden çok İHA'nın rotası bir dizinde tutulmaktadır. Bir sonraki İHA'nın rotasına geçildiği bilgisi aradaki 0 değeri ile sağlanmaktadır. Üç İHA'lı bir problem için bir çözüm örneği Şekil 2'de verilmiştir. Burada ilk İHA 10. hedefe gider ve üsse geri döner. İkinci İHA ise sırasıyla 13-2-7-3 hedeflerine gider ve üsse döner. Son İHA ise 5-4-12 numaralı hedeflere bu sırayla gider.

Kromozom: 10 0 13 2 7 3 0 5 4 12

İHA1: 0 10 0

İHA2: 0 13 2 7 3 0

İHA3: 0 5 4 12 0

**Şekil 2.** Kromozom gösterimi (Chromosome representation)

#### 4.4. Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması (Generating the Initial Population)

Popülasyondaki tüm üyeler ( $N$  tane) rassal bir şekilde oluşturulur. Her bireyde, ilk olarak tüm hedefler rastgele sıralanır. İHA'ların rotalarını ayıracak şekilde, İHA sayısından bir eksik sayıda 0 değeri bu sıralamada rastgele yerlere konur. Daha sonra, aşağıda anlatılan düzenleme ve onarım operatörleri ile her İHA'nın rotası düzenlenir.

#### 4.5. Ebeveyn Popülasyonu Seçimi (Parent Population Selection)

Ebeveyn seçiminde ikili turnuva seçimi [26] kullanılmıştır. Bu yöntemde öncelikle popülasyondaki tüm çözümlerin bir kopyası üretilir.  $2N$  boyutlu bu yeni popülasyondaki üyeler ikiye gruplanır. Her gruptan bulunduğu sınır daha iyi olan çözüm ebeveyn popülasyonuna seçilir. Eğer iki çözümün de buldukları sınır aynı ise kalabalıklık mesafesi değeri daha yüksek olan çözüm turnuvayı kazanır.

#### 4.6. Çaprazlama (Crossover)

İki ebeveynden iki çocuk oluşturan bir çaprazlama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde öncelikle her ebeveynden birer İHA'nın rotası rastgele seçilir. Ardından, seçilen İHA'ların rotalarında çaprazlamanın yapılacağı hedefler seçilir. Bu hedefler ve sonrasında gidilecek hedeflerin, diğer çözümdeki İHA'nın rotasındaki çaprazlama yapılacak hedeflerle yerleri değiştirilir. Şekil 3'te üç İHA ve 15 hedef içeren bir problem için örnek bir çaprazlama gösterilmiştir. İki ebeveynde de ikinci İHA çaprazlama için seçilmiştir. İlk çözümdeki 9. hedef ve sonrası, ikinci çözümdeki 13. hedef ve sonrası yerine taşınmıştır. Benzer şekilde ikinci çözümün 2. İHA'sının rotası da güncellenmiştir.

#### 4.7. Mutasyon (Mutation)

Mutasyon operatörü ile her İHA'nın ziyaret ettiği hedeflerin sayısının artırılması hedeflenmiştir. Her İHA için 0-1 arasında rastgele bir sayı üretilir. Bu sayı mutasyon olasılığından azsa ziyaret edilmeyen bir hedef rastgele seçilir ve bu İHA'nın rotasında rastgele bir yere eklenir.

#### 4.8. Düzenleme Operatörü (Rearrangement Operator)

İHA'ların hedeflerine varış sıraları rassal olarak belirlendiği için çoğu durumda İHA'ların uçuş menzili kısıtı aşılmaktadır. Bu nedenle rotaların düzenlenmesi ve uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, her İHA'nın rotasındaki hedeflere gidiş sırası, En Yakın Komşu (EYK) Sezgisel Yöntemi ile düzenlenmektedir. Bu yöntemde, öncelikle bir İHA'nın gideceği hedeflerden biri rastgele seçilir ve bu hedef ilk sıraya atanır. En son atanan hedefi en yakın komşusu takip edecek şekilde kalan hedefler rotaya eklenir. Her yeni çözüm üretimi sonrası (başlangıç popülasyonunun oluşturulması, çaprazlama ve mutasyon sonrası) eğer İHA'lardan birinin ya da birkaçının rotası uçuş menzili kısıtını aşıyorsa düzenleme operatörü kullanılır.

Ebeveyn 1:	2 0 9 0 7
Ebeveyn 2:	4 0 12 13 3 0 15 5 1
Ebeveyn 1 – Seçilen İHA ve Çaprazlama Hedefi:	9
Ebeveyn 2 – Seçilen İHA ve Çaprazlama Hedefi:	12 13 3
Çocuk 1:	2 0 13 3 0 7
Çocuk 2:	4 0 12 9 0 15 5 1

Şekil 3. Çaprazlama örneği (Crossover example)

#### 4.9. Onarım Operatörü (Repair Operator)

Düzenleme operatörü sonrası bazı İHA'ların rotalarının uzunluğu hala uçuş menzilinden fazla olabilir. Bu durumda, rotaların uzunluğunu uçuş menzilinden kısa yapacak şekilde onarım operatörü çalıştırılır. Bu operatör, rota uzunluğu uçuş menzilinden uzun olan İHA rotalarında gidilecek hedefleri rastgele seçerek rotadan siler. Her hedefin silinmesi sonrası rota tekrar düzenleme operatörü ile güncellenir. Rota uygun hale gelene kadar hedef silinmeye devam edilir.

#### 4.10. Bir Sonraki Jenerasyonun Oluşturulması (Forming the Next Generation)

Bir sonraki jenerasyon oluşturulurken öncelikle çocuk ve asıl popülasyon birleştirilir. Bu birleşimdeki çözümler sınırlara ayrılır. Öncelik en iyi sınırdan olmak üzere bir sonraki popülasyonun kapasitesi dolana kadar çözümler bir sonraki jenerasyona aktarılır. Eğer bir sınırdan bulunan çözüm sayısı, jenerasyonda kalan kapasiteden daha fazla ise o sınırdaki çözümlerin kalabalıklık değerlerine bakılır ve kalabalıklık değerleri yüksek olan çözümler jenerasyonda kalan yerlere kopyalanır.

Geliştirilen mekanizmaların NSGA-II içinde kullanılışı Şekil 4'te özetlenmiştir. Bundan sonraki bölümlerde, genetik algoritmanın bu versiyonundan GA\_fİHA (İHA Filosu için Genetik Algoritma) olarak bahsedilecektir.

### 5. Sayısal Sonuçlar (Computational Results)

Bu bölümde, geliştirilen iki farklı yaklaşımın sonuçları verilmiştir. Yaklaşımlar, farklı boyutlardaki problemlerde uygulanmış ve çözüm süreleri ve çözüm kaliteleri karşılaştırılmıştır. Matematiksel model, CPLEX Studio IDE 20.1.0 ile çözülmüştür. Kullanılan donanım bilgisi 3.40 GHz Intel Core i5 7500 CPU, 8 GB RAM'dir. Genetik algoritma ise R version 3.6.0 İstatistik Programı ile yazılmıştır. Kullanılan donanım bilgisi 3.40 GHz Intel Core i5 7500 CPU, 8 GB RAM'dir.

Üç farklı boyutta problem tasarlanmıştır. Her problemde  $100 \times 100$  km<sup>2</sup>'lik bir alanda farklı sayılarda hedefler rastgele konumlandırılmıştır. İlk problemde 15 hedef noktası, ikinci problemde 20 hedef noktası ve üçüncü problemde 25 hedef noktası, koordinatları için [0, 100] arasında kesikli tekdüze dağılım kullanılarak yerleştirilmiştir. Alanın orta bölgesinde üs konumlandırılmıştır ve problemlerde sırasıyla 3 İHA, 4 İHA ve 5 İHA kullanılmıştır. Her hedef noktasının önem derecesi ise [1,10] değerleri arasından kesikli tekdüze dağılım ile atanmıştır. Tüm İHA'ların uçuş menzili EUROUVS [27] sınıflandırmasına göre taktiksel mini İHA'nın dayanıklılık süresi ve maksimum erişebileceği hız baz alınarak 150 km olarak belirlenmiştir.

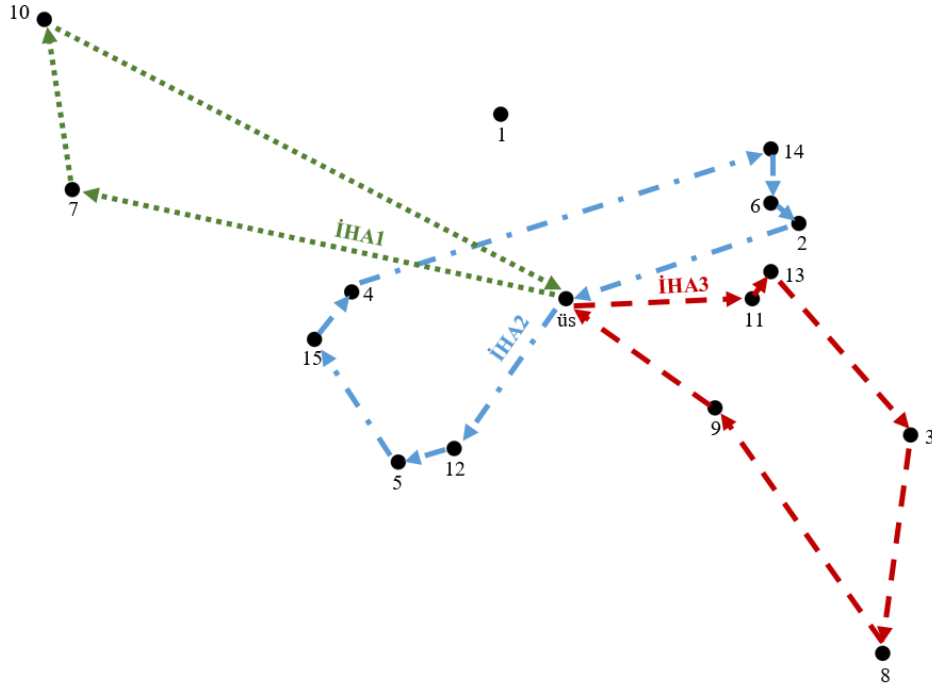
GA-fİHA sonuçlarının kesin yöntemle karşılaştırılmasında hiperhacim ölçütü [28] kullanılmıştır. Bu ölçütün hesabında öncelikle

**algoritma GA\_fİHA**

Başlangıç popülasyonu için  $N$  tane çözüm üret  
 Çözümleri *düzenleme operatörü* ile düzenle  
 Çözümleri *onarım operatörü* ile düzenle  
 $i = 1$ 'den jenerasyon sayısına kadar  
 Ebeveyn popülasyonunu ikili turnuva seçimi ile oluştur  
 Çocuk popülasyonunu oluştur  
 Çaprazlama ile çocuk popülasyonu üret  
 Çocuk popülasyonuna *mutasyon* uygula  
*Düzenleme ve onarım operatörleri* ile çocuk popülasyonunu düzenle  
 Çocuk ve asıl popülasyonları birleştir, birleşimdeki en iyi çözümlerle bir sonraki jenerasyonu oluştur

**bitir algoritma**

**Şekil 4.** GA\_fİHA Yöntemi (GA\_fİHA Method)



**Şekil 5.** 3İ\_15H problemi uç çözümü  $(M, O) = (446,52, 86)$  (Extreme solution of 3İ\_15H problem  $(M, O) = (446.52, 86)$ )

tüm çözümlerin amaç fonksiyon değerleri  $[0,1]$  aralığında ölçeklendirilir. Ölçeklendirme için GA-fİHA sonuçları ve etkin çözümler arasında en küçük  $(M_{min}, O_{min})$  ve en büyük değerleri  $(M_{maks}, O_{maks})$  kullanılır. İki amaç fonksiyonu  $(M_k, O_k)$  olan Çözüm  $k$ 'nin ölçeklendirilmiş değeri  $(M'_k, O'_k)$  Eş. 13 ile bulunur.

$$(M'_k, O'_k) = \left( \frac{M_k - M_{min}}{M_{maks} - M_{min}}, \frac{O_{maks} - O_k}{O_{maks} - O_{min}} \right) \quad (13)$$

Amaç fonksiyonu uzayında, baskılanan bölgede seçilen bir referans noktasına kadar tanımlanan bölge içinde, etkin çözümlerin ve genetik algoritma sonucunda elde edilen çözümlerin baskıladığı hacimler ayrı olarak bulunur. Genetik algoritma sonuçlarının baskıladığı hacmin etkin çözümlerin baskıladığı hacme oranı, hiperhacim ölçütü değerini verir. Bu ölçütün değerinin bire yaklaşması, genetik algoritma sonucu elde edilen çözümlerin etkin çözümlere amaç fonksiyonu uzayında yaklaştığını gösterir.

**5.1. Üç İHA-15 Hedef İçeren Problem – 3İ\_15H**  
 (3 UAV-15 Target Problem – 3İ\_15H)

İlk problemde 15 hedef noktası bulunmaktadır ve üç İHA görevlendirilmiştir. Hedef noktaların koordinatları ve önem seviyeleri Tablo 1'de verilmiştir. Öncelikle tüm etkin çözümler  $\epsilon$ -kısıt yöntemi ile bulunmuştur. GA-fİHA probleme uygulanırken jenerasyon sayısı 500 olarak tutulmuş ve başlangıç besleme noktası değiştirilerek beş kez çözüm yapılmıştır. Popülasyon sayısı 45 olarak belirlenmiştir. Problemin iki uç çözümünden mesafe değeri en az olan çözümde bir İHA 6 önem derecesine ( $O$ ) sahip bir hedefe gitmiş ve toplam 40 km ( $M$ ) kat etmiştir. Diğer uç çözümde ise edinilen toplam önem ( $O$ ) 86 birimdir ve kat edilen mesafe ( $M$ ) 446,52 km'dir. Bütün İHA'ların 150 km'lik uçuş menzili kısıtlayıcı olmuştur ve 1. hedef dışındaki tüm hedeflere gidilmiştir. Bu çözüm için İHA'ların rotaları Şekil 5'te verilmiştir. Problemin GA-fİHA ile çözümünde, ilk sayısal denemeler sonucunda çaprazlama olasılığı 0,7 ve mutasyon olasılığı 0,6 olarak

belirlenmiştir. GA-fİHA, farklı başlangıç besleme noktalarıyla beşer kez çalıştırılmıştır.

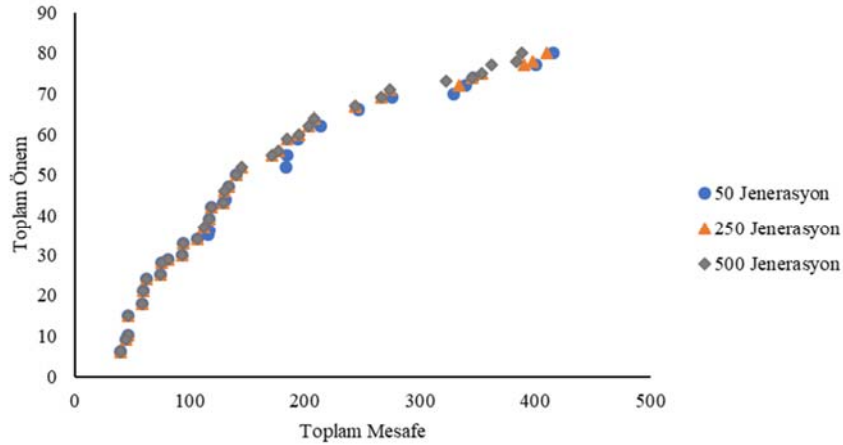
**Tablo 1.** 3İ\_15H problemi - hedef nokta özellikleri (3İ\_15H problem - target properties)

Hedef	x-koordinatı	y-koordinatı	Önem Derecesi
1	49	85	3
2	81	69	6
3	93	38	8
4	33	59	10
5	38	34	2
6	78	72	3
7	3	74	7
8	90	6	6
9	72	42	5
10	0	99	9
11	76	58	6
12	44	36	3
13	78	62	9
14	78	80	4
15	29	52	8
Üs noktası	56	58	

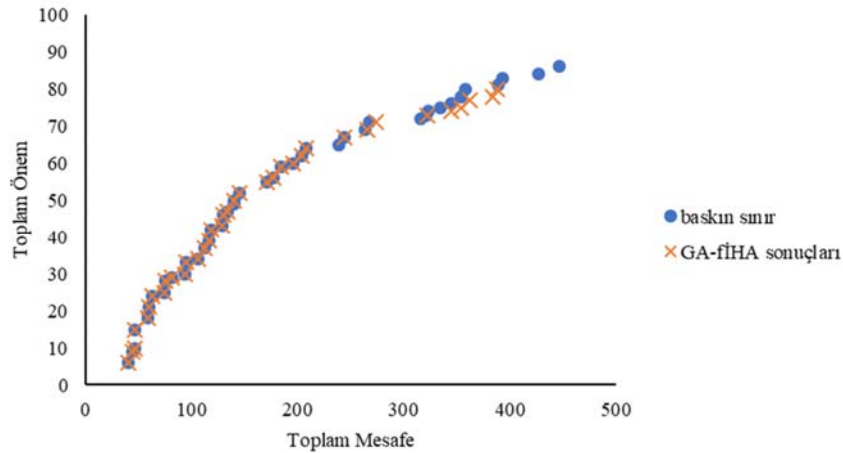
GA-fİHA’da çözümlerin nasıl ilerlediğini görme amaçlı bir çalışma için 50., 250., ve 500. jenerasyonlarında elde edilen birinci sınır çözümlerinin grafiği Şekil 6’da görülmektedir. 50. jenerasyon sonunda hiperhacim ölçütü 0,9502 iken, 250. jenerasyon sonunda bu değer 0,9763’e çıkmıştır. 500. jenerasyona gelindiğinde hiperhacim ölçütü 0.9831 değerini almış ve toplam önemin en yüksek olduğu çözümler bölgesi daha iyi temsil edilmiştir. Algoritma sonunda elde edilen çözümlerin gerçek baskın sınır ile karşılaştırması Şekil 7’de verilmiştir. Tüm çalışmaların sonuçları Tablo 2’de özetlenmiştir. Tabloda birinci ve ikinci sütunlar, GA-fİHA’nın beş farklı çalışmasından elde edilen çözüm süresi değerlerini, üçüncü ve dördüncü sütunlar ise hiperhacim ölçütü değerlerini vermektedir. Kullanılan  $\epsilon$ -kısıt yöntemi ile tüm etkin çözümlerin bulunması 395 CPU saniye sürmüştür. GA-fİHA kullanılarak bulunan çözümler, etkin çözümlere amaç fonksiyonu uzayında oldukça yakındır ve bu çözümlere ulaşılması için geçen süre  $\epsilon$ -kısıt yönteminin yaklaşık %3’üne denk gelmektedir.

**5.2. Dört İHA-20 Hedef İçeren Problem – 4İ\_20H**  
(4 UAV-20 Target Problem – 4İ\_20H)

İkinci ürettiğimiz problemde 20 hedef noktasını ziyaret etmek için dört İHA görevlendirilmiştir. Hedef noktaların yerleşimi ve önem seviyeleri Tablo 3’te verilmiştir.



**Şekil 6.** GA-fİHA sonuçları – 3İ\_15H problemi (GA-fİHA results – 3İ\_15H problem)

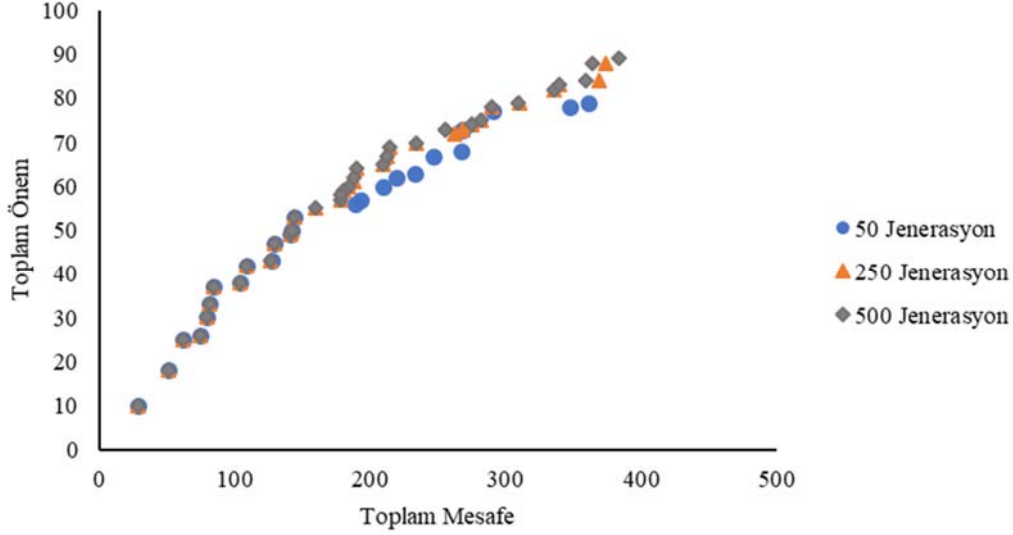


**Şekil 7.** GA-fİHA sonuçları ile baskın sınırın karşılaştırılması – 3İ\_15H problemi (Comparison of GA-fİHA results and nondominated frontier – 3İ\_15H problem)



**Tablo 2.** GA-fİHA sonuçları – 3İ\_15H problemi (GA-fİHA results – 3İ\_15H problem)

Çözüm Süreleri (CPU saniye)		Hiperhacim Ölçütü	
Ortalama	[Min - Maks]	Ortalama	[Min - Maks]
13,51	[3,33 – 20,25]	0,9829	[0,9577 – 0,9963]



**Şekil 8.** GA-fİHA sonuçları – 4İ\_20H problemi (GA-fİHA results – 4İ\_20H problem)

**Tablo 3.** 4İ\_20H problemi - hedef nokta özellikleri (4İ\_20H problem - target properties)

Hedef	x-koordinatı	y-koordinatı	Önem Derecesi
1	49	85	5
2	81	69	3
3	93	38	2
4	33	59	8
5	38	34	7
6	78	72	3
7	3	74	9
8	90	6	7
9	72	42	1
10	0	99	10
11	76	58	4
12	44	36	8
13	78	62	6
14	78	80	2
15	29	52	4
16	64	91	4
17	10	7	3
18	16	56	5
19	46	48	10
20	70	20	4
Üs noktası	56	58	

Bu problemde 50 farklı etkin çözüm 2829 CPU saniyede  $\epsilon$ -kısıt yöntemi ile bulunmuştur. Mesafenin en kısa olduğu uç çözümde bir İHA 10 birimlik öneme ( $O$ ) sahip bir hedefe gitmiştir. Bilginin en fazla olduğu uç çözümde ise dört İHA 20 hedeften 19'una gitmiştir. GA-fİHA kullanılırken, 3İ\_15H problemine benzer şekilde çaprazlama olasılığı 0,7, mutasyon olasılığı 0,6 olarak belirlenmiş, problem boyutuyla orantılı şekilde popülasyon sayısı 80'e çıkarılmıştır.

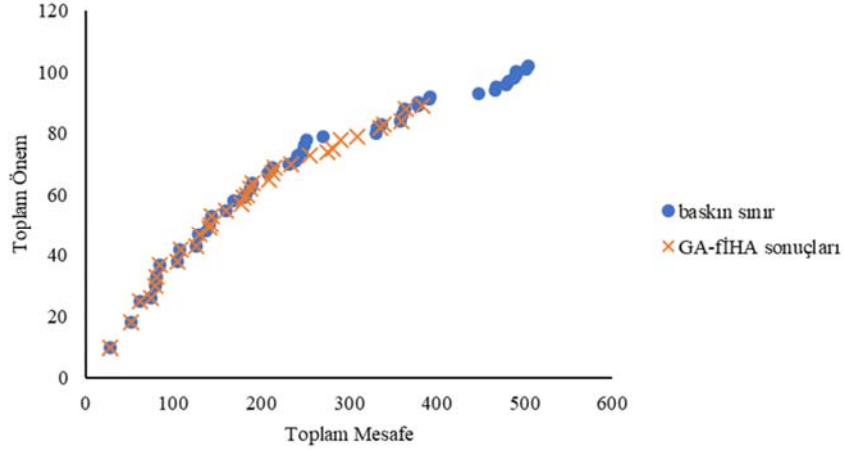
Beş farklı çalıştırmanın birinde çözümlerin jenerasyonlarla değişimi Şekil 8'de verilmiştir. 50. jenerasyon sonunda hiperhacim ölçütü 0,8864'tür ve toplam önemin yüksek olduğu çözümler yeterince iyi temsil edilmemiştir. 250. jenerasyon sonunda hiperhacim ölçütü 0,9588'e çıkmış ve çözümler iyileşmiştir. 500. jenerasyonda ise hiperhacim ölçütü 0,9960 değerini almış ve özellikle yüksek öneme sahip çözümlerde iyileşmeler gözlenmiştir. 500. jenerasyon sonunda bulunan çözümlerle gerçek baskın sınır karşılaştırması Şekil 9'da verilmiştir. Bu problemde, toplam önemin fazla olduğu kısımlardaki çözümlerin GA-fİHA ile bulunması daha zorlaşmış, diğer uç çözüme yakın ve orta bölgelerdeki çözümlerle ise etkin çözümlere amaç fonksiyonu uzayında oldukça yakınlaşmıştır.

GA-fİHA sonuçları, 3İ\_15H problemi sonuçlarına benzer yapıda Tablo 4'te özetlenmiştir. GA-fİHA'nın çözüm süresi,  $\epsilon$ -kısıt yönteminin yaklaşık %1,4'üdür ve etkin çözümlerin baskıladıkları bölge alanının yaklaşık %96'sı GA-fİHA sonuçları ile de baskılanmıştır.

### 5.3. Beş İHA-25 Hedef İçeren Problem – 5İ\_25H (5 UAV-25 Target Problem – 5İ\_25H)

Son ürettiğimiz problemde beş İHA ve 25 hedef noktası bulunmaktadır. Hedef noktaların yerleşimi ve önem seviyeleri Tablo 5'te verilmiştir. Bu problemde 76 farklı etkin çözümün  $\epsilon$ -kısıt yöntemi ile bulunması 25183 CPU saniye sürmüştür. Mesafenin en kısa olduğu uç çözümde bir İHA 3 birimlik öneme sahip ( $O$ ) bir hedefe gitmiştir. Önemin en fazla olduğu uç çözümde ise beş İHA ile 25 hedeften 24'üne gidilmiştir. GA-fİHA'da önceki problemlerde kullanılan ayarlardan farklı olarak popülasyon sayısı 125'e çıkarılmıştır.

Bir çalıştırmadaki çözümlerin jenerasyonlarla ilerleyişi Şekil 10'da verilmiştir. Önceki problemlerdeki gibi 50. jenerasyondan 500. jenerasyona ilerlerken çözümler iyileşmiştir. Hiperhacim ölçütü 50.,



**Şekil 9.** GA-fİHA sonuçları ile baskın sınırın karşılaştırılması – 4İ\_20H problemi  
(Comparison of GA-fİHA results and nondominated frontier – 4İ\_20H problem)

**Tablo 4.** GA-fİHA sonuçları – 4İ\_20H (GA-fİHA results – 4İ\_20H)

Çözüm Süreleri (CPU saniye)		Hiperhacim Ölçütü	
Ortalama	[Min - Maks]	Ortalama	[Min - Maks]
38,99	[37,57 – 40,74]	0,9592	[0,9448 – 0,9706]

250., ve 500. jenerasyonlar için sırasıyla 0,9126, 0,9657, ve 0,9709 değerlerini almıştır. Yüksek öneme sahip çözümlerde jenerasyonlar boyu iyileşme görülse de gerçek baskın sınırla karşılaştırılınca uç çözümlerin tamamının bulunamadığı, Şekil 11’de verildiği üzere, görülmüştür.

**Tablo 5.** 5İ\_25H problemi - hedef nokta özellikleri  
(5İ\_25H problem - target properties)

Hedef	x-koordinatı	y-koordinatı	Önem Derecesi
1	49	85	6
2	81	69	4
3	93	38	8
4	33	59	10
5	38	34	9
6	78	72	5
7	3	74	1
8	90	6	1
9	72	42	1
10	0	99	4
11	76	58	8
12	44	36	8
13	78	62	2
14	78	80	7
15	29	52	5
16	64	91	8
17	10	7	3
18	16	56	2
19	46	48	3
20	70	20	10
21	48	44	10
22	13	23	2
23	89	92	2
24	6	20	1
25	74	8	7
Üs noktası	56	58	

GA-fİHA’nın sonuçları, önceki problemlerde kullanılan tablolarla benzer yapıda Tablo 6’da özetlenmiştir. Genetik algoritmanın çözüm süresi, ε-kısıt yönteminin yaklaşık %0,29’u civarındadır ve etkin çözümlerin baskıladıkları bölge alanının yaklaşık %98’i genetik algoritma sonuçları ile de baskılanmıştır.

**Tablo 6.** GA-fİHA sonuçları – 5İ\_25H (GA-fİHA results – 5İ\_25H)

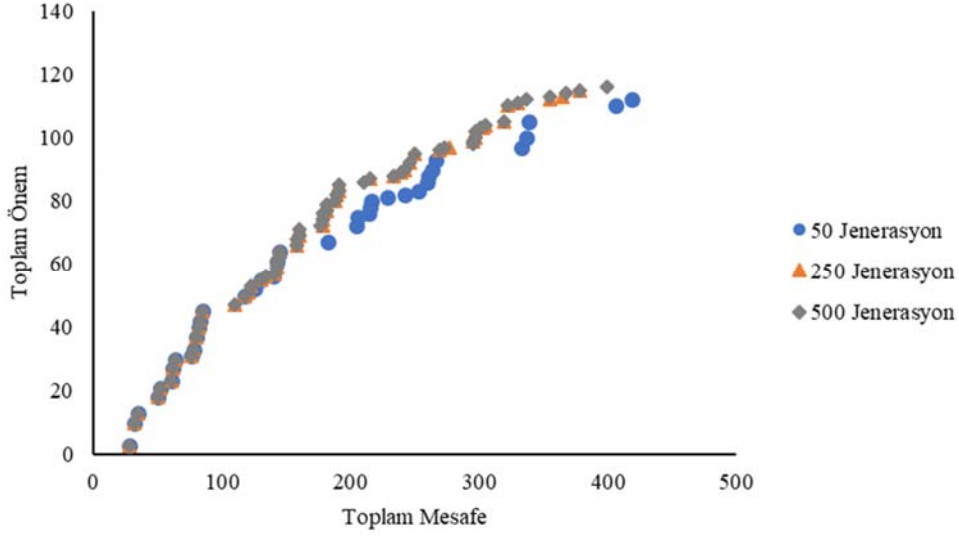
Çözüm Süreleri (CPU saniye)		Hiperhacim Ölçütü	
Ortalama	[Min - Maks]	Ortalama	[Min - Maks]
73,23	[53,77 – 82,41]	0,9793	[0,9710 – 0,9899]

Üç problem boyutu için de GA\_fİHA’nın baskın noktalara yeterince yakın çözümler bulduğu görülmektedir. 5İ\_25H problemi hiperhacim değerinin 4İ\_20H problemi hiperhacim değerinden büyük olmasının sebebi büyük problemin popülasyon sayısının küçük problemden fazla olması ile açıklanabilir. İHA ve hedef sayısı arttıkça her iki çözüm yöntemi için beklenildiği üzere çözüm süresinin arttığı görülmekte, bu artışın matematiksel modele kıyasla GA\_fİHA ile makul seviyelerde olduğu söylenebilmektedir. İHA’lara atanan görevlerin aciliyeti ve dinamik yapısı göz önüne alındığında, GA\_fİHA’nın özellikle büyük ölçekli problemlerde çözüm süreleri ve çözüm kalitesi göz önünde bulundurularak tercih edilebileceği görülmektedir.

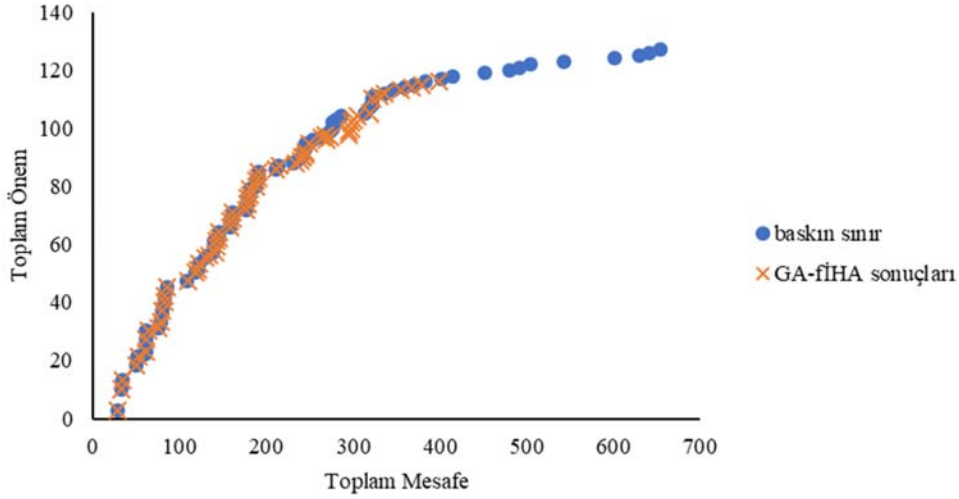
## 6. Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar (Conclusions and Future Studies)

Bu çalışmada, farklı derecelerde öneme sahip hedeflerin olduğu bir arazide alan keşfi yapan bir İHA filosunun rota planlaması ele alınmıştır. Problemde, özdeş İHA’ların gidebileceği rotalar iki amaç gözetilerek bulunmuştur. Amaçlardan ilki İHA’ların kat edeceği toplam mesafenin minimizasyonu, ikincisi ise gidilen hedeflerin toplam öneminin maksimizasyonudur. İHA’ların uçuş menzilleri problem öncesinde belirlenmiş ve bir kısıt olarak problemde ifade edilmiştir.

Problemin çözümü için, ilk olarak, birbiriyle çelişen bu iki amaç fonksiyonunu eniyileyen etkin çözümleri bulan bir tamsayı



Şekil 10. GA-fİHA sonuçları – 5İ\_25H problemi (Comparison of GA-fİHA results – 5İ\_25H problem)



Şekil 11. GA-fİHA sonuçları ile baskın sınırın karşılaştırılması – 5İ\_25H problemi (Comparison of GA-fİHA results and nondominated frontier – 5İ\_25H problem)

matematiksel model geliştirilmiştir. Hedef ve İHA sayıları arttıkça bu modelin çözümünün zorlaştığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, ikinci olarak, büyük problemlerin çözümünde kullanılabilecek çok amaçlı genetik algoritma mekanizmaları geliştirilmiştir. Mekanizmaların NSGA-II algoritmasına uyarlanmasıyla GA\_fİHA algoritması oluşturulmuştur.

3İHA-15Hedef, 4İHA-20Hedef ve 5İHA-25Hedef içeren problem setleri oluşturulmuş ve çözüm yöntemleri bu problemlerde denenmiştir. GA\_fİHA ile etkin çözümleri amaç fonksiyonu uzayında oldukça yakın temsil eden çözümlere çok daha kısa sürelerde ulaşılabileceği görülmüştür. Ayrıca GA\_fİHA'nın çözüm süreleri, artan problem boyutuyla anlamlı bir artış göstermemiştir. Algoritmanın kısa çalışma süreleri ve baskın sınıra yakın çözümler bulması sayesinde gerçek hayat uygulamalarında kullanılabilir olduğu değerlendirilmiştir. Çalışmanın geliştirilebileceği farklı yönler bulunmaktadır. Çalışmada filonun özdeş İHA'lerden oluştuğu varsayılmıştır. Daha genel bir versiyon olarak filonun farklı

İHA'lerden oluştuğu durum düşünülebilir. Etkin çözümlerin fazlalığı nedeniyle algoritmanın tüm çözümleri bulmak için harcayacağı zaman, sadece karar vericinin tercih edeceği çözümleri bulmaya yönlendirilebilir. Bunun için karar vericiden referans noktaları alınabilir, ya da karar vericiye algoritma süresince elde edilen küme gösterilerek tercihleri doğrultusunda aranan çözüm kümesi güncellenebilir.

#### Kaynaklar (References)

1. Coutinho, W.P., Battarra, M., Fliege, J., The unmanned aerial vehicle routing and trajectory optimisation problem, a taxonomic review, Computers & Industrial Engineering, Comput. Ind. Eng., 120, 16–128, 2018.
2. Sundar, K., Rathinam, S., Algorithms for Routing an Unmanned Aerial Vehicle in the Presence of Refueling Depots, IEEE Trans. Autom. Sci. Eng., 11, 287–294, 2014.
3. Ousingawat, J., UAV Path Planning for Maximum Coverage Surveillance of Area with Different Priorities, The 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Thailand, 2006.

4. Hernández-Hernández, L., Tsourdos, A., Shin, H.-S., Waldoek, A., Multi-objective UAV routing, International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 534–542, 2014.
5. Qu, C., Gai, W., Zhang, J., Zhong, M., A Novel Hybrid Grey Wolf Optimizer Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Path Planning, Knowledge-Based Systems, 194, 105530, 2020.
6. Tezcaner Öztürk, D., Köksalan, M., An interactive approach for biobjective integer programs under quasiconvex preference functions, Ann. Oper. Res., 244, 677–696, 2016.
7. Tezcaner Öztürk, D., Köksalan, M., Biobjective Route Planning of an Unmanned Air Vehicle in Continuous Space, Transportation Research Part B: Methodological, 168, 151-169, 2023.
8. Türeci, H., Interactive Approaches for Bi-Objective UAV Route Planning in Continuous Space, M.S. Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, 2017.
9. Daşdemir, E., Köksalan, M., Tezcaner Öztürk, D., A Flexible Reference Point-based Multi-objective Evolutionary Algorithm: An Application to the UAV Route Planning Problem, Computers & Operations Research, 114, 104811, 2020.
10. Korkmaz, Y., İyibilgin, O., Fındık, F., Geçmişten Günümüze İnsansız Hava Araçlarının Gelişimi, SAÜ Fen Bilim. Enstitüsü Derg., 20, 103, 2015.
11. Lamont, G.B., Slear, J.N., Melendez, K., UAV Swarm Mission Planning and Routing using Multi-Objective Evolutionary Algorithms, IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multicriteria Decision Making, 10–20, 2007.
12. Peng, X., Gao, X., A Multi-objective Optimal Approach for UAV Routing in Reconnaissance Mission with Stochastic Observation Time, Foundations of Intelligent Systems, ISMIS, 246–255, 2008.
13. Levy, D., Sundar, K., Rathinam, S., Heuristics for Routing Heterogeneous Unmanned Vehicles with Fuel Constraints, Math. Probl. Eng, 2014.
14. Wu, W., Wang, X., Cui, N., Fast and Coupled Solution for Cooperative Mission Planning of Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles, Aersp. Sci. Technol., 79, 131–144, 2018.
15. Uçar, U. Ü., İşleyen, S. K., Hareketli Hedefli – Heterojen Filolu İHA Rotalama Problemi için Yeni bir Çözüm Yaklaşımı, Politeknik Dergisi, 22 (4), 999-1016, 2019.
16. Yılmaz N., Gencer C.T., 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.
17. Liu, X., Ma, J., Chen, D., Zhang, L.-Y., Real-time Unmanned Aerial Vehicle Cruise Route Optimization for Road Segment Surveillance using Decomposition Algorithm, Robotica, 39 (6), 1007-1022, 2021.
18. Semiz, F., Polat, F., Solving the Area Coverage Problem with UAVs: A Vehicle Routing with Time Windows Variation, Robotics and Autonomous Systems, 126, 103435, 2020.
19. Karakaya, M., UAV Route Planning for Maximum Target Coverage, Comput. Sci. Eng. An Int. J., 4 27–34, 2014.
20. Alotaibi, K.A., Rosenberger, J.M., Mattingly, S.P., Punugu, R.K., Visoldilokpun, S., Unmanned Aerial Vehicle Routing in the Presence of Threats, Comput. Ind. Eng., 115, 190–205, 2018.
21. Yakıcı, E., Solving Location and Routing Problem for UAVs, Comput. Ind. Eng., 102, 294–301, 2016.
22. Ergezer, H., Leblebicioğlu, K., Online Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles to Maximize Instantaneous Information, International Journal of Advanced Robotic Systems, 18 (3), 2021.
23. Daşdemir, E., Batta, R., Köksalan, M., Tezcaner Öztürk, D., UAV Routing for Reconnaissance Mission: A Multi-objective Orienteering Problem with Time-dependent Prizes and Multiple Connections, Computers & Operations Research, 145, 105882, 2022.
24. Chankong, V., Haimes, Y.Y., Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology, North-Holland, New York, 1983.
25. Deb, K., A., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm, NSGA-II, IEEE Trans. Evol. Comput., 6, 182–197, 2002.
26. Deb, K., Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, Wiley, 235, 2001.
27. Bento, M. D. F., Unmanned Aerial Vehicles: An Overview, Inside GNSS, 3 (1), 54–61, 2008.
28. Shang, K., Ishibuchi, H., He, L., Pang, L.M., A Survey on the Hypervolume Indicator in Evolutionary Multiobjective Optimization, IEEE Trans. Evol. Comput., 25 (1), 2021.