

BÖLGESEL KEŞİF YAPAN HAVA ARAÇLARI İÇİN İKİ AMAÇLI GÖREV PLANLAMASI

Ayşegül ATAK *^{ID}
Diclehan TEZCANER ÖZTÜRK *^{ID}

Alınma: 05.10.2023 ; düzeltme: 16.02.2024 ; kabul: 11.06.2024

Öz: İnsanlı veya insansız hava araç sistemleri ile birlikte keşif ve gözetleme, kara ve sınır güvenliği, arama ve kurtarma operasyonları gibi önemli faaliyetler yürütülür. Özellikle insansız hava araçlarının kullanımı ile hem sivil hem askeri uygulamalarda bilgi edinilmesi ve müdahale edilmesi kolaylaşmaktadır. İyi bir görev planlama yapılması faaliyetlerin başarı ile yürütülmesi için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada bölgesel gözetleme yapan hava keşif araçları için görev planlaması yapılmıştır. Bir hava aracı kalkış noktasından göreve başlayarak hedef bölgeleri gözetlemekte ve kalkış noktasına dönmektedir. Çalışmada hedefler, literatürdeki genel yaklaşım olan düğüm ile temsil edilmenin aksine, dikdörtgen alanlar olarak temsil edilmiştir. Bu alanların içeri şeritler halinde tarayarak hedeften bilgi edinilmektedir. Rotalar oluşturulurken birbiri ile çelişen iki amaç gözetilmiştir. Birincisi uğranılan hedeflerden elde edilen toplam bilgiyi maksimize etmek ikincisi ise görev boyunca kat edilen toplam mesafeyi minimize etmektir. Etkin çözümlerin bulunması için iki amaçlı karma tam sayılı programlama modeli geliştirilmiş ve epsilon-kısıt yöntemi ile çözülmüştür. Büyük boyutlu problemler için de bir sezgisel çözüm yöntemi önerilmiştir. Tüm çözüm yöntemleri farklı boyutlardaki problemlerde karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çok Amaçlı Optimizasyon, Görev Planlama, Hava Araçları, Oryantiring Problemi

Biobjective Mission Planning For Aerial Vehicles Tasked with Regional Reconnaissance

Abstract: Manned and unmanned aerial vehicle systems are used for important tasks such as reconnaissance and surveillance, land and border security, and search and rescue operations. Especially with the use of unmanned aerial vehicles, obtaining information and intervention become easier in both civilian and military applications. To carry out all these tasks successfully, a good mission planning is of great importance. In this study, we consider the mission planning of aerial vehicles tasked with conducting regional reconnaissance. An aircraft takes off from a base, visits the target areas, and returns back to the base. In contrast with the majority of the studies in the literature that represent the targets with nodes, we represent the targets with rectangular regions in this study. These areas are searched in strips to acquire information. Two conflicting objectives are considered in forming the routes. The first objective is maximizing the total information obtained from the targets visited, and the second is minimizing the total distance traveled during the mission. To find the efficient solutions, a biobjective mixed integer programming model is developed and solved using the ϵ -constraint method. A heuristic solution method is also proposed for larger problem instances. Both solution methods are tested on different-sized problems.

Keywords: Multiobjective Optimization, Mission Planning, Aerial Vehicles, Orienteering Problem

* Hacettepe Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara, Türkiye

İletişim Yazarı: Diclehan Tezcaner Öztürk (diclehanozturk@hacettepe.edu.tr)

1. GİRİŞ

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte ülkeler, ekonomik ve dinamik şekilde uygulanabilecek modern sistemleri envanterlerine katmaktadır. Bu modern sistemlere hava araç sistemleri örnek olarak gösterilebilir.

İnsanlı veya insansız kullanılabilen hava araç sistemleri hem askeri hem sivil operasyonların yürütülmesinde önemli rol oynamaktadır. İnsanlı veya insansız hava araç sistemleriyle birlikte keşif ve gözetleme, istihbarat, kara ve sınır güvenliği, arama ve kurtarma, trafik izleme ve denetleme, yangın tespiti gibi birçok faaliyet yürütülmektedir. Özellikle insansız hava araçları riskli veya tehlikeli bölgelere rahatlıkla ulaşabilmekte ve bu araçların kullanımı ile askeri uygulamalarda bilgi edinme, tespit ve müdahale etme hızı artmaktadır.

Bu çalışmada havadan keşif yapan araçlar için çok amaçlı görev planlaması yapılmıştır. Gözetleme ve keşif amaçlı bir hava aracı bir kalkış noktasından göreve başlamaktadır. Hedeflerden bir kısmına giderek onları gözetlemekte ve kalkış noktasına geri dönmektedir. Çalışmada hedefler, literatürdeki genel yaklaşımın aksine, düğüm yerine dikdörtgen bölgeler ile temsil edilmektedir. Bu bölgelerin içi şartlar halinde taranarak bilgi toplanır ve içi ne kadar detaylı gezilirse hedeflerden o kadar çok bilgi elde edilir. Problemden birbiri ile çelişen iki amaç ele alınmıştır. Amaçlardan birincisi, elde edilecek toplam bilgiyi maksimize etmektir. İkincisi ise, görev boyunca dolaşılacak toplam mesafeyi minimize etmektir. Problem genel hatlarıyla oryantiring problemine benzerlik göstermektedir.

Çalışmanın kalanı şu şekilde planlanmıştır; ikinci kısımda ilgili konu üzerine yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Üçüncü kısımda problem tanımı ve geliştirilen matematiksel model verilmiş, dördüncü kısımda ise geliştirilen sezgisel yöntem anlatılmıştır. Beşinci kısımda sayısal test sonuçları verilmiş ve altıncı kısımda makale sonlandırılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde insanlı veya insansız hava araçlarının rota planlaması için birçok çalışma yapılmıştır. Bu kısımda bölgesel hava taraması ve gözetleme faaliyeti yapan çalışmalara yer verilmiştir.

John ve diğ. (2001), geçiş izni olmayan bölgeler bulunan bir alanda gözetim için görev planlaması yapmışlardır. Optimum uçuş rotasını belirlemek ve görev boyunca dolaşılacak toplam mesafeyi minimize etmek için bir matematiksel model ve bir genetik algoritma geliştirmişlerdir. Ng ve Sancho (2009) askeri bir operasyon için bölgesel gözetleme çalışması yapmışlardır. Uçağa takılan bir radar cihazı ile hedeflerin tespit edilme olasılığını belli bir değerin üstünde tutmaya çalışırken bölgelerin en kısa sürede aranması planlanmıştır. Problemin çözümü için bir dinamik programlama formülasyonu geliştirmişlerdir. Karasakal (2016), Ng ve Sancho'nun (2009) problemini genişletmiş ve probleme özgü matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Modellerden ilki hedef tespit edilme olasılığını belli bir değer üstünde tutarken toplam mesafeyi minimize ederken ikinci model mesafe kısıtı altında hedef tespit etme olasılığını maksimize etmektedir. Jiao ve diğ. (2010) konveks bir bölge içinde en az dönüş sayısı ile nasıl gidilmesi gerektiği üzerine bir yöntem geliştirmişlerdir. Nedjati ve diğ. (2016) deprem sonrası bölge gözetleme problemi için bir İHA filosunun rotasını bulmaya çalışmışlardır. En uzun rota süresini minimize etmek için iki farklı matematiksel model geliştirmişlerdir. Vasquez-Gomez ve diğ. (2018) birden fazla bölgeyi en kısa mesafede gözetleme problemi için iki aşamalı bir yöntem geliştirmişlerdir. İlk aşamada bölgelere gidiş sırası bulunurken, ikinci aşamada bölge içlerinin nasıl taranacağı belirlenmiştir. Vazquez-Carmona ve diğ. (2022) ise bir İHA ile bölge temizleme/spreyleme üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bölge içinde gidilecek noktaları ara nokta olarak belirledikten sonra bölge dışına çıkmayacak şekilde İHA'nın rotasını oluşturmuşlardır. Munoz ve diğ. (2021), birden fazla İHA için hem alan tarayacak hem de gidilmesi gereken noktalara giderken engellerle çakışmayacak rotaları kısa zamanda oluşturacak bir algoritma geliştirmişlerdir. Yuan ve diğ. (2022), bir İHA'nın alan taramasında

kullanılabilecek genetik algoritma tabanlı bir algoritma geliştirmişlerdir. Kyriakakis ve diğ. (2022), bir İHA filosu ile arama kurtarma yapılması problemini ele almışlardır. Alanda gidilmesi gereken noktalar belirleyerek rotalar oluşturmuş ve bu noktalara gecikmeyi minimize etmeyi amaçlamışlardır. Çözüm yöntemi olarak bir matematiksel model ve bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Chen ve diğ. (2022) heterojen bir İHA filosu için alan kapsama problemini çalışmışlardır. Bu problem için hem kesin hem de kümeleme-tabanlı bir sezgisel yöntem kullanmışlardır. Cho ve diğ. (2022) ise denizcilikte arama kurtarma çalışmalarında bir alanın İHA filosu ile taranması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Geliştirdikleri matematiksel modeli farklı boyutlardaki problemlerde uygulamışlardır. Chen ve diğ. (2023) bir İHA filosunun bir alana yayılmış hedef bölgeleri ziyareti problemini çalışmaktadır. Bölgelerin ziyareti için merkez noktaya gidilmesi yetmekte, bu şekilde problem klasik araç rotalama problemine dönüştürülerek çözülmektedir.

Problemde birden çok kriter gözetilen çalışmalar da bulunmaktadır. Wang ve diğ. (2018) birden fazla hava aracı için iki amaçlı görev planlaması problemi üzerine çalışmıştır. Bölgesel hedefler daha küçük dairelere bölünmüş ve her hedefin ziyareti için içerdiği küçük daireler ziyaret edilmekte ve bu şekilde elde edilen bilgi maksimize edilmektedir. Problemin amacı görev boyunca ziyaret edilen hedeflerdeki toplam bilgiyi maksimize etmektir. Çözüm için bir evrimsel algoritma geliştirmişler ve çözüm sonuçlarını karar vericiye sunmak için ağırlıklı toplam yöntemini kullanmışlardır. Karasakal ve diğ. (2020) iki amaçlı havadan gözetleme problemi üzerine çalışmışlardır. Sensörlerle donatılmış hava aracı bir kalkış noktasından göreve başlamakta, dikdörtgen şeklindeki hedefleri şeritler halinde tarayarak kalkış noktasına geri dönmektedir. Problemde iki amaç fonksiyonu gözetilmiştir. Bunlar, görev boyunca dolaşılacak mesafenin minimizasyonu ve en küçük hedef tespit olasılığının maksimizasyonudur. Problemin optimal çözümü için epsilon-kısıt yöntemi, iki sezgisel yöntem ve etkileşimli çözüm prosedürü önermişlerdir. Zuo ve diğ. (2020) birden fazla hava aracı için gözetleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Bölgesel hedeflerin ziyareti için bölge içlerinde gidilmesi gereken noktaları belirlemişlerdir. Problemde hedeflerin kapsama alanı ve kapsama süresinin maksimize edilmesi amaçlanmıştır. Çözüm için iki aşamalı algoritma geliştirmişlerdir. Tarakçı (2021), birden çok özdeş İHA için görev planlaması yapmıştır. İHA'lar bir kalkış üssünden göreve başlamakta, dikdörtgen şeklindeki hedefler belirli bir hedef tespit olasılığını sağlayacak şekilde taranmaktadır. Her bir İHA için uçuş süresi sınırlandırılmış ve İHA'lar için oluşturulan turların mesafesi minimize edilmeye çalışılmıştır. Çözüm için bir matematiksel model ve sezgisel algoritmalar önermiştir. Majeed ve Hwang (2021) rota uzunluğunu da içeren dört amaç gözeterek bir alanda bulunan tüm bölgelerin ziyaret edildiği problemi ele almışlardır. Hem bölge içlerini hem bölgeler arasını minimum mesafede gezmeyi hedefleyen karınca kolonisi algoritması temelli bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Le ve diğ. (2022) bir grup İHA'nın engel içeren bir alan keşfinde kullanacakları rotayı belirleyen bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Problemin hem tek kriterli (mesafe) hem de iki kriterli (mesafe ve İHA'ların yaptıkları dönüşler) versiyonunu ele almışlardır.

Çalışılan problemlerin geneline bakıldığında bölgesel hedeften bilgi edinilmesi için belli şekillerde taranması gerektiği ve bu taramaların ya çözüm sürecinde ya da çözüm öncesinde belirlendiği söylenebilir. Genelde katedilen toplam mesafe minimize edilmeye çalışılırken çalışmaların çoğu bu kritere ek olarak bilgi maksimizasyonunu gözetmiştir. Tanımlanan problemlere kesin ve sezgisel yöntemler geliştirilmiştir.

Çalışmamızda, bir hava aracının birden çok hedef bölgeye uğradığı çok amaçlı görev planlaması problemi üzerine çalışılmıştır. Karasakal ve diğ. (2020) tarafından geliştirilen iki amaçlı havadan gözetleme probleminde tüm hedef bölgelere gidilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada ise hava aracının görev sırasında en fazla bilgi edinecek şekilde hangi hedef bölgelere gideceğini ve hedef bölgelerine hangi noktalardan giriş ve çıkış yapacağını belirleyen toplam mesafeyi minimize eden rotalar bulunmuştur. Problemimizde, iki farklı amaç fonksiyonu ve

bölge şeklinde tanımlanmış hedefler bulunmaktadır. Bilgimiz dahilinde çalışmamız bu kapsamda literatürde yapılmış ilk çalışma olacaktır.

3. PROBLEM TANIMI

Bu kısımda problem yapısı detaylandırılacak ve problemin matematiksel modeli anlatılacaktır.

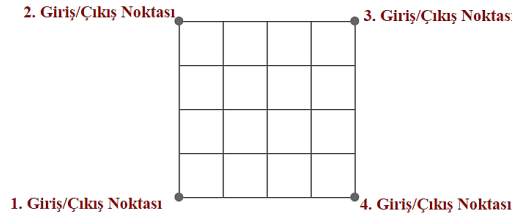
3.1. Hedef Bölgeler

Problemimizde hava aracının uğrayabileceği hedefler, dikdörtgen şeklinde bölgeler ile temsil edilmiştir. Literatürde yaygın olarak kullanılan yöntem hedeflerin nokta olarak tanımlanmasıdır. Problemimizde ise hedefler iki boyutlu bir alan ile temsil edilmiş, bu da problemi daha kompleks hale getirmiştir.

Hava aracı hedeflerin belli bir kısmına uğrayıp başlangıç noktasına geri dönmekle görevlendirilmiştir. Bu hedeflerden hangilerine uğrayacağına ve uğradığı hedefleri nasıl tarayacağına karar verilmektedir.

3.2. Giriş – Çıkış Noktaları ve Arama Desenleri

Problemimizde bir hava aracı, bir hedefi ziyaret ederek hedeften bilgi elde etmektedir. Bunun için ziyaret ettiği hedefe bir giriş noktasından girmekte, bölgede şeritler halinde ilerleyerek tarama yapmakta ve bir çıkış noktasından çıkmaktadır. Bu çalışmada hedefin köşelerinin giriş-çıkış noktaları olarak kullanılabilirliği varsayılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1:

Bir hedefin giriş/çıkış noktaları

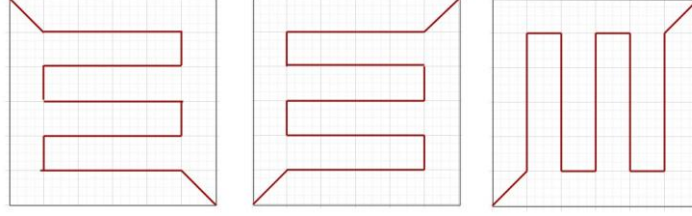
Hava aracı bir hedefi ne kadar çok tararsa, hedeften o kadar çok bilgi elde etmektedir. Hava aracının hedef içinde izlediği yol “arama deseni” olarak ifade edilmiştir. Farklı arama desenleri ile hedeflerden edinilen bilgi değişmektedir; bölge daha detaylı arandıkça edinilen bilgi artmakta, bunun yanı sıra gidilen mesafe de artmaktadır. Şekil 2’de bir hedefte farklı giriş ve çıkış noktaları kullanılarak elde edilebilecek üç arama deseni verilmiştir. Hedef içine eş aralıklı kesikli çizgiler çizilmiş, bu çizgiler kullanılarak arama desenleri oluşturulmuştur.

Çalışmada, her giriş-çıkış noktası kombinasyonu için tek arama deseni olduğu varsayılmıştır. Bu desen olabilecek en detaylı arama desenidir, yani araç gittiği çizgide gidebileceği kadar gider ve çizgi sonunda dönüş yaparak olabilecek en yakın çizgide aramasına devam eder.

3.3. Problemin Amaçları

Problemde birbiriyle çelişen iki amaç fonksiyonu gözetilmiştir. İlk amaç, kat edilen toplam mesafenin minimizasyonu, ikincisi ise rota boyunca elde edilen bilginin maksimizasyonudur. Daha fazla hedefe uğrandıkça ve arama deseni sıklaştıkça toplam edinilen bilgi artmakta iken aynı zamanda kat edilen mesafe de artmaktadır. Bu kısımda kullanılacak indisler aşağıda

özetlenmiştir. Toplam hedef sayısı N ile gösterilmektedir. Hava aracının bulunduğu kalkış noktası $i = 1$ indeksi ile belirtilmiştir.



Şekil 2:

Bir hedef için farklı giriş/çıkış noktaları kullanılarak elde edilen arama desenleri

İndisler:

i, j : Hedef indeksi ($i, j = 1, 2, 3, \dots, N$)

k, m : Dikdörtgen giriş/çıkış noktası indeksi ($k, m = 1, 2, 3, 4$)

3.3.1. Birinci Amaç: Görev Boyunca Dolaşılan Toplam Mesafe

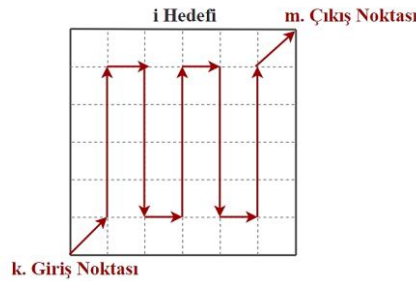
Hava araçları için görev süresi boyunca dolaşılan mesafe veya süre önemli bir kriterdir. Hayati tehlike oluşmaması, yakıt ihtiyacı gibi kısıtlar nedeniyle operasyonların kısa sürede tamamlanması gerekmektedir. Bu nedenle problemimizde ilk amaç olarak hava aracının görev boyunca dolaştığı toplam mesafe (TM) minimize edilmiştir. Hava aracının görev boyunca dolaştığı toplam mesafe (TM), hedef bölgeler içinde kat edilen mesafe (M_1) ve hedefler arasında giderken kat edilen mesafenin (M_2) toplamı olarak hesaplanmıştır.

$$\text{Amaç 1: } \text{Min } TM = M_1 + M_2 \quad (1)$$

M_1 ve M_2 değerlerinin hesaplanması aşağıda detaylı olarak anlatılmaktadır.

M_1 Mesafesinin Hesaplanması

Hava aracı bir hedefe (i) bir giriş noktasından girmekte (k), birim adımlar ile ilerleyerek hedefi taramakta ve çıkış noktasından (m) hedefi terk etmektedir. Hedef içerisinde kat ettiği mesafe içeride gidilen toplam mesafe olarak hesaplanmaktadır. Şekil 3'te bir hedef içerisinde gidilen örnek bir yol gösterilmiştir.



Şekil 3:

Bir hedefin içerisinde k ve m noktaları arası kat edilen mesafe

M_2 Mesafesinin Hesaplanması

Hava aracı hedefler dışında bilgi toplayamamaktadır. Bu nedenle hedeflerden çıkış yaptıktan sonra bir sonraki hedefe girene kadar en kısa mesafeli yolu kullanır. Bu nedenle hedefler arası uçarken kat ettiği mesafe (M_2) ardışık hedeflerin çıkış ve giriş noktaları arasındaki Öklid mesafe olarak hesaplanmıştır.

3.3.2. İkinci Amaç: Toplam Bilgi

Hava araçları birçok görevde keşif ve gözetleme amacıyla kullanılır. Bu faaliyetler ile hedeflerden bilgi elde etmeye çalışılır. Hedefler hakkında ne kadar fazla bilgi edinilirse görevin başarı ile sonuçlanma ihtimali o kadar artmaktadır. Buradan esinlenerek, çalışmada ikinci amaç olarak hedef bölgelerden elde edilen toplam bilgi (TB) maksimize edilmiştir.

$$\text{Amaç 2: Maks } (TB) \quad (2)$$

3.4. Matematiksel Model

Problemde hangi hedeflere uğranacağı ve uğranılan hedeflerin nasıl taranacağı olmak üzere iki temel karar verilmektedir. Çalışmada bu kararları alan ve iki amacı optimize eden bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modelde, Karasakal ve diğ. (2020) geliştirdikleri iki amaçlı havadan gözetleme probleminin matematiksel modeli referans alınmıştır.

Parametreler:

C_{ikm} : i hedefinin k noktasından girilip m noktasından çıktığında kat edilen mesafe

F_{ikjm} : i hedefinin k noktası ile j hedefinin m noktası arasındaki Öklid mesafesi

P_{ikm} : i hedefinin k noktasından m noktasına uçulduğunda elde edilen bilgi

Karar Değişkenleri:

z_{ikm} : Eğer i hedefinin k noktasından m noktasına uçulursa 1, aksi halde 0

y_{ikjm} : Eğer i hedefinin k noktasından j hedefinin m noktasına uçulursa 1, aksi halde 0

Yardımcı Değişken:

u_i : Alt tur oluşumunu engelleyen yardımcı değişken

Matematiksel Model:

$$\text{Maks } TB = \sum_{ikms} P_{ikm} z_{ikm} \quad (3)$$

$$\text{Min } TM = \sum_{ikm} C_{ikm} z_{ikm} + \sum_{ikjm} F_{ikjm} y_{ikjm} \quad (4)$$

s.t.

$$\sum_{jkm} y_{ikjm} \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$\sum_{ikm} y_{ikjm} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$\sum_{ik} y_{ikjm} = \sum_k z_{jmk} \quad j = 2, \dots, N \quad m = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

$$\sum_k z_{ikm} \leq \sum_{jk} y_{imjk} \quad i = 2, \dots, N \quad m = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

$$u_i - u_j + N \sum_{km} y_{ikjm} \leq N - 1 \quad i = 2, \dots, N \quad j = 2, \dots, N \quad i \neq j \quad (9)$$

$$\sum_{kjm} y_{1kjm} = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{ikm} y_{ik1m} = 1 \quad (11)$$

$$y_{ikjm} \in \{0,1\} \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad k, m = 1, 2, 3, 4 \quad (12)$$

$$z_{ikm} \in \{0,1\} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad k, m = 1, 2, 3, 4 \quad (13)$$

$$u_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

Modelin amaç fonksiyonları (3) ve (4) eşitliklerinde gösterilmektedir. (3) eşitliğinde tüm hedeflerden elde edilecek bilgi maksimize edilir. (4) eşitliğinde görev boyunca kat edilen toplam mesafe minimize edilir. (5) eşitliği ile hava aracının her hedeften en fazla bir çıkış noktasından çıkması, (6) eşitliği ile ise her hedefe en fazla bir giriş noktasından girmesi sağlanmaktadır. (7) eşitliğiyle hava aracının bir hedefe girmesi durumunda o hedeften çıkması da sağlanır. (8) eşitliğiyle bir hedefin bir noktasından çıkılıyorsa, başka bir hedefe devam edilmesi sağlanır. (9) eşitliğiyle alt tur oluşumu engellenir. (10) eşitliğiyle hava aracının başlangıç noktasından başka bir hedefe gitmesi, (11) eşitliğiyle ise görev sonunda başlangıç noktasına dönüş yapması sağlanır. (12), (13), ve (14) eşitlikleri karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır.

3.5. Değiştirilmiş Epsilon-Kısıt Yöntemi

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde birbiriyle çelişen amaçlar nedeniyle tek bir optimal çözüm yerine “etkin çözümler” bulunmaktadır. Bir etkin çözüm, herhangi başka bir etkin çözüm ile karşılaştırıldığında en az bir kriterde daha iyi değer almaktadır. Literatürde etkin çözümlerin bulunması için kullanılan yöntemlerden biri değiştirilmiş epsilon-kısıt yöntemidir (Chankong ve Haimes, 1983). Bu yöntemde amaç fonksiyonlarından biri optimize edilirken diğerleri kısıta indirgenir. Bu yöntem problemimize aşağıdaki gibi uyarlanmıştır:

$$Maks T = (\sum_{ikm} P_{ikm} z_{ikm}) - \rho (\sum_{ikm} C_{ikm} z_{ikm} + \sum_{ikjm} F_{ikjm} y_{ikjm}) \quad (15)$$

$$\sum_{ikm} C_{ikm} z_{ikm} + \sum_{ikjm} F_{ikjm} y_{ikjm} \leq \varepsilon \quad (16)$$

(5) ve (14) arasındaki eşitlikler

Modelde kat edilen toplam mesafe amacı (TM) kısıta indirilmiş ve ε değeri ile kısıtlanmıştır. Amaç fonksiyonu olarak toplam bilginin maksimize edilmesi bırakılmış, bu fonksiyona küçük ve pozitif bir tamsayı olan ρ katsayısı ile TM değeri çarpılarak eklenmiştir. Bu sayede toplam bilgi değerleri aynı olan çözümler arasından, toplam mesafe değeri daha az olan etkin çözüm bulunmaktadır. Model farklı ε değerleri için çözüldüğünde farklı etkin çözümler bulunur.

Oryantiring problemlerinde amaç belli bir bölgede zaman/mesafe kısıtı altında en fazla bilgiyi toplamaktır. Literatürde çokça çalışılmış olan bu problem için güncel bir tarama Vansteenwegen ve Gunawan'ın (2019) çalışmasıdır. Çözdüğümüz problem de bu haliyle toplam mesafe kısıtı altında en fazla bilgiyi elde eden rotayı bulmaya çalışmakta, yani tek amaçlı oryantiring problemine dönüşmektedir.

Küçük boyutlu problemlerde optimal kısa zamanda bulunabiliyorken büyük boyutlu problemlerin çözümünde çözümler zorlanmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada büyük problemlere çözüm bulabilecek bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir.

Literatürde oryantiring problemi için geliştirilmiş sezgisel yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri Tsiligirides'e (1984) aittir. Oryantiring probleminin bir versiyonu olan zaman pencereli oryantiring problemi üzerine çalışmıştır. Zaman pencereli oryantiring probleminde hedeflere gidiş için belli zaman aralığı, hedeflerde belli bir hizmet süresi ve elde edilecek kazanç değeri verilerek belirlenen zaman kısıtı altında en çok kazancın elde edileceği tur aranmaktadır. Tsiligirides (1984) çözüm yöntemi için iki farklı yaklaşım önermiştir. Bunlar stokastik ve deterministik yaklaşımlardır. Golden ve diğ. (1987) oryantiring probleminin büyük boyutları için bir ağırlık merkezi sezgiseli geliştirmişlerdir. Bu sezgiselde düğüm şeklinde olan hedeflere değerler atanmıştır. Ağırlık merkezleri hesaplanarak ağırlık merkezine yakın olan hedefler seçilerek uygun rotalar oluşturulmuştur. Golden ve diğ. (1988) oryantiring probleminin çözümü için çok yönlü bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde tek bir rota oluşturmak için ağırlıklı toplam yöntemini uygulamışlardır. Hedeflerin skor ölçüsü olarak, ağırlık merkezine olan mesafe ölçüsü ve başlangıç-bitiş noktalarına olan toplam mesafe ölçüsünün konveks kombinasyonu hesaplanarak birer değer atanmıştır. En yüksek değere sahip hedeflerden biri rassal olarak seçilerek rotaya eklenmiş ve belirlenen süre kısıtını aşmayacak şekilde final rotalar oluşturulmuştur. Bu sezgisel yöntemi, önceki çalışmalarla kıyaslamışlar ve daha hızlı şekilde optime yakın çözümler bulunduğunu ifade etmişlerdir. Sokkappa (1990) maliyet kısıtlı oryantiring problemi üzerine çalışmıştır. Problemin çözümü için kesin ve sezgisel çözüm yöntemleri kullanmıştır. Kesin yöntemlerde dal sınır algoritmasına benzeyen kısıtlı bir atama problemini kullanan bir yöntem geliştirmiştir. Sezgisel algoritmada, Golden ve diğ. (1988)'nin geliştirdiği sezgiseli kullanmıştır. Algoritmaya hedef seçim kriteri eklemiş ve algoritmanın performansını iyileştirmiştir.

Çalışmamızda, Golden ve diğ. (1988) tarafından geliştirilen sezgisel yöntem temel alınarak bölgesel hedeflerin ziyaretinde kullanılmak üzere bir sezgisel geliştirilmiştir. Bu sezgiselin temel alınmasının sebebi, oryantiring problemi özelinde geliştirilmiş olması ve elimizdeki probleme uyarlanışının kolaylığıdır. Yakın zamanda, Patel ve diğ. (2020), oryantiring problemi için geliştirdikleri genetik algoritmayı Golden ve diğ. (1988)'nin çalışmasını da içeren literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırmışlardır. Benzer bir karşılaştırmayı Lo ve diğ. (2010) de oryantiring problemi için geliştirdikleri algoritma için yapmışlardır. Szwarc ve Boryczka (2022) ise oryantiring problemi için geliştirdikleri çözüm yönteminde gidilecek düğümlere skor ölçüsü atarken Golden ve diğ. (1988)'nin yaklaşımından esinlenmişlerdir. Benzer şekilde, Evers ve diğ. (2014) de geliştirdikleri yöntemde düğüm değeri hesaplanırken Golden ve diğ. (1988)'nin geliştirdikleri skor ölçüsünü kullanmışlardır.

Bir sonraki kısımda Golden ve diğ. (1988) tarafından geliştirilen algoritmanın detayları ve bu çözüm yöntemini bölge şeklinde tanımlanan hedeflerin olduğu oryantiring problemine nasıl uyarladığımız anlatılmıştır.

4. SEZGİSEL ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Golden, Wang ve Liu'nun Yöntemi (GWL Yöntemi) (Golden ve diğ., 1988) oryantiring probleminin çözümü için geliştirilmiş sezgisel bir yöntemdir.

GWL yönteminde her iterasyonda bir düğüm eklenerek rotalar oluşturulur. Henüz gidilmemiş düğümlere bir değer verilir ve bu değeri en yüksek beş düğüm arasından biri rastgele seçilerek rotaya eklenir. Düğümlerin değerleri, düğümün kazanç/bilgi değerinin bir fonksiyonu olan skorunun, başlangıç ve bitiş noktasına uzaklığının ve ağırlık merkezine uzaklığının konveks kombinasyonu olarak bulunur. Başlangıçta kullanılan ağırlık merkezi, bir rota oluşturulduktan sonra o rotanın ağırlık merkezi olarak güncellenir ve yeni rota oluşturulurken bu güncel ağırlık merkezine uzaklığa bakılır. Beş farklı ağırlık merkezi ile başlanır ve her biri güncellenerek 20 rota oluşturulur. Toplam 100 rotadan en yüksek toplam bilgi değerine sahip rota en iyi rota olarak seçilir. Algoritmada ayrıca öğrenme ölçütü ile

düğümün skor değerleri güncellenir. Bir düğüm ne kadar fazla rotada kullanılıyorsa, skoru o kadar yükselir. Her rota üretildikten sonra 2-opt kullanılarak düzenlenir.

Düğümün skor ölçüsü hesabı (SM_a) (17) eşitliği ile gösterilmiştir. Burada a ve b düğümün indisini, A düğüm setini, I_a a düğümünün kazanç/bilgi değerini, t_{ab} a ve b düğümleri arasındaki mesafeyi ve μ azaltma katsayısını göstermektedir. Bir düğüm için skor ölçüsü hesaplanırken hem kendi bilgi değeri hem de o düğümünden ulaşılacak diğer tüm düğümlerin bilgi değerleri (I_b) kullanılır. Düğümün kendi bilgi değeri ve ondan ulaşılacak düğüm bilgi değerleri düğümler arası mesafenin (t_{ab}) indirgenmiş fonksiyonu ile çarpılarak toplanır.

$$SM_a = \sum_{b \in A} I_b * e^{-\mu * t_{ab}} \quad (\forall a \in A) \quad (17)$$

Düğümün değerleri (W_a) (18) eşitliği ile gösterilmiştir. Burada CM_a a düğümünün ağırlık merkezine uzaklığını, EM_a ise başlangıç-bitiş noktalarına uzaklığını temsil etmektedir. α , β , ve γ ise ağırlıklı toplam alırken kullanılan katsayılar ve toplamaları 1'dir.

$$W_a = \alpha * SM_a + \beta * CM_a + \gamma * EM_a \quad (\forall a \in A) \quad (18)$$

Bu çalışmada ele alınan probleme GWL yöntemi direk uygulanamamaktadır. Bu yöntem hedeflerin düğüm/nokta şeklinde tanımlandığı problem için geliştirilmiştir ve her hedefin bir bilgi değeri (I_a) vardır. Bu çalışmada ele alınan problemde ise hedefler dikdörtgen bölgeler şeklinde temsil edilmekte ve farklı taranmaları ile farklı bilgi değerlerine ulaşılmaktadır. Yaklaşımımızda hedeflerin düğüm olarak düşünülmesi yerine, hedeflerin köşe noktaları (giriş-çıkış noktaları) düğüm olarak ele alınmıştır. Hava aracının gidebileceği toplam mesafenin ε olduğu durum için bilgiyi maksimize edecek rota aranmıştır.

Geliştirilen yöntem GWL yöntemini (Golden vd., 1988) temel almaktadır. Her iterasyonda tura bir düğüm eklenmekte, bu yapılırken de düğümlerin değerleri gözetilmektedir. Değer hesabında GWL yönteminde kullanılan üç ölçüye ek olarak bir önceki düğüme olan mesafe de eklenmiş, bu dört ölçünün konveks kombinasyonu ile düğümün değeri hesaplanmıştır. Düğüm eklenirken hedeflere giriş ya da çıkış yapılmasına bağlı olarak bir sonraki düğüme karar verilmiştir. Bulunan turun daha iyileştirilmesi için hedeflere giriş çıkış noktaları yer değiştirmiş, bu şekilde mesafenin azaltılması sağlanmıştır. Yöntemin bölgesel tarama problemine uyarlanmış versiyonu bir sonraki kısımda detaylarıyla anlatılmıştır.

4.1. Geliştirilen Algoritma Adımları

Algoritmaya başlanırken, bir hava aracı için belirli bir uçuş mesafesi (ε) belirlenir. ε değerleri değiştirilerek aşağıdaki algoritma adımları uygulanır ve her ε için bir çözüm elde edilir.

Adım 1. Bir ağırlık merkezi seçin.

Algoritmanın başlangıcında, GWL yöntemindeki gibi beş farklı ağırlık merkezi oluşturulur. Ağırlık merkezleri için bütün hedefleri çevreleyecek bir dikdörtgen çizilir. Daha sonra bu dikdörtgen dört eşit boyutlu küçük dikdörtgene bölünür. Ana dikdörtgenin merkez noktası ve bu küçük dikdörtgenlerin merkez noktaları başlangıç ağırlık merkezleri olarak kullanılır. Bu ağırlık merkezlerinden bir tanesi ile başlanır.

Adım 2. Seçilen ağırlık merkezi için t farklı çözüm üretin.

Adım 2.1. Hedeflerdeki tüm düğümlerin bilgi değerlerini (I_a) bulun.

Algoritmanın bu basamağında hedeflerdeki bütün düğümler için düğüm bilgi değeri (I_a) hesaplanır. Bu hesap yapılırken öncelikle a düğümü ile aynı bölgede bulunan düğümlerden

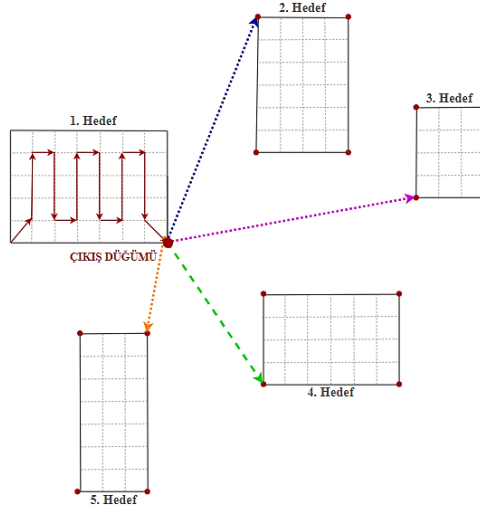
oluşan B_a kümesi oluşturulur. I_a değeri a düğümünden kendi bölgesinde gidilebilecek tüm düğümlere gidilmesi ile elde edebileceği bilginin ortalamasıdır. I_a değeri hesaplanması için (19) eşitliği kullanılır. Burada P_{ab} , a giriş noktasından b çıkış noktasına gidilirken elde edilen bilgi değeridir.

$$I_a = \frac{\sum_{b \in B_a} P_{ab}}{|B_a|} \quad (\forall a \in A) \quad (19)$$

Adım 2.2. Tüm düğümlerin düğüm durumuna göre (giriş veya çıkış düğümü) skor ölçüsünü (SM_a) bulun.

Bu basamakta tura eklenecek düğümün giriş ya da çıkış düğümü olmasına göre skor ölçüsü hesaplanır. Eğer tura giriş düğümü ekleniyorsa, eklenecek düğümün skor ölçüsü kendi bilgi değeri ve kendi bölgesinde gidilebilecek düğümlerin indirgenmiş bilgi değerlerinin toplamıdır. Eğer tura çıkış düğümü ekleniyorsa, eklenecek düğümün skor ölçüsü kendi bilgi değeri ve kendi bölgesi dışında gidilebileceği düğümlerin indirgenmiş bilgi değerlerinin toplamıdır. Bir çıkış düğümünden gidilebilecek tüm düğümler Şekil 4'te gösterilmiştir. Düğümler için skor ölçüsü (20) eşitliği ile hesaplanır.

$$SM_a = I_a + \sum_{b \in B_a} I_b * e^{-\mu * t_{ab}} \quad (\forall a \in A) \quad (20)$$



Şekil 4:

Bir çıkış düğümündeki hava aracı için farklı hedeflere gidişte izleyeceği yollar

Adım 2.3. Bütün düğümler için ağırlık merkezine olan mesafeyi (CM_a) hesaplayın.

Bu adımda (a_x, a_y) koordinatında bulunan a düğümü ile seçilen ağırlık merkezi arasındaki mesafe (21) eşitliği ile hesaplanır.

$$CM_a = \sqrt{(a_x - CM_x)^2 + (a_y - CM_y)^2} \quad (\forall a \in A) \quad (21)$$

Adım 2.4. Dğümler için başlangıç ve bitiş noktalarına olan mesafe toplamlarını (EM_a) hesaplayın.

Bütün hedeflerdeki dğümlerin başlangıç ve bitiş noktalarına olan mesafe toplamı (22) eşitliği ile hesaplanır. Burada (S_x, S_y) başlangıç noktasının (F_x, F_y) ise bitiş noktasının koordinatlarıdır.

$$EM_a = \sqrt{(a_x - S_x)^2 + (a_y - S_y)^2} + \sqrt{(a_x - F_x)^2 + (a_y - F_y)^2} \quad (\forall a \in A) \quad (22)$$

Adım 2.5. Dğümler için kendinden önce ziyaret ettiği dğüme olan mesafe ölçüsünü (YM_a) hesaplayın.

Bu adımda dğümlerin kendinden önce ziyaret edilen dğüme olan mesafesi (YM_a) hesaplanır.

Adım 2.6. Dğümlerin SM_a , CM_a , EM_a ve YM_a değerlerini 0-1 arasında doğrusallaştırın.

Skor ölçüsünü (SM_a) doğrusallaştırmak için (23) eşitliği kullanılır.

$$SM_a = \frac{SM_a * n}{\max_b\{SM_b\}} \quad (\forall a \in A) \quad (23)$$

Ağırlık merkezi olan mesafe ölçüsünü (CM_a) doğrusallaştırmak için (24) eşitliği kullanılır.

$$CM_a = \frac{\min_b\{CM_b\} * n}{CM_a} \quad (\forall a \in A) \quad (24)$$

Başlangıç ve bitiş noktaları olan mesafe ölçüsünü (EM_a) doğrusallaştırmak için (25) eşitliği kullanılır.

$$EM_a = \frac{\min_b\{EM_b\} * n}{EM_a} \quad (\forall a \in A) \quad (25)$$

Ziyaret edilen bir önceki dğüm ile aradaki mesafe ölçüsünü (YM_a) doğrusallaştırmak için (26) eşitliği kullanılır.

$$YM_a = \frac{\min_b\{YM_b\} * n}{YM_a} \quad (\forall a \in A) \quad (26)$$

Adım 2.7. Dğümler için konveks kombinasyon değerini (W_a) hesaplayın.

Bütün dğümler için konveks kombinasyon değeri hesaplanır. Hesaplama için (27) eşitliği kullanılır.

$$W_a = \alpha * SM_a + \beta * CM_a + \gamma * EM_a + \theta * YM_a \quad (\forall a \in A) \quad (27)$$
$$\alpha + \beta + \gamma + \theta = 1$$

Adım 2.8. Bulunan W_a değerlerini büyükten küçüğe sıralayın. En yüksek değere sahip üç dğümü belirleyin.

Adım 2.7’de bulunan konveks kombinasyon değerleri (W_a) değerleri büyükten küçüğe sıralanır. En yüksek değere sahip üç dğüm belirlenir.

Adım 2.9. Düşümlerden rastgele birini seçin ve seçilen düğümü rotaya ekleyin.

En yüksek değere sahip düşümlerden eşit olasılıkla biri seçilir ve rotaya eklenir.

Adım 2.10. Bir önceki hedef için giriş/çıkış noktalarını güncelleyin.

Bir önceki hedef bölgeye giriş ve çıkış noktaları değiştirilerek daha kısa bir mesafe elde edilebiliyorsa, o hedef bölgenin giriş ve çıkış noktaları değiştirilir.

Adım 2.11. Yeni düğüm eklenmesiyle toplam mesafenin (ϵ) aşılp aşılmadığını kontrol edin. Aşılmıyorsa Adım 2.1'e geri dönün. Aşılyorsa düğümün durumuna göre (giriş veya çıkış düğümü) rotayı güncelleyip sonlandırın.

Bu adımda son düğümün rotaya eklenmesiyle çözümün uygun olup olmadığı kontrol edilir. Bunun için toplam mesafenin (ϵ) aşılp aşılmadığı incelenir. Çözümün uygunluk kontrolü, düğümün giriş ya da çıkış düğümü olmasına göre farklılaşmaktadır. Eğer son eklenen düğüm giriş düğümüyse, düğümün elemanı olduğu hedefte kendisine ve bitiş noktasına toplam mesafesi en az olan düğümünden çıkış yapılarak rotanın sonlanması durumunda toplam mesafe (ϵ) değerinin aşılp aşılmadığı kontrol edilir. Eğer en kısa yol kullanıldığında bile toplam mesafe kısıtı aşılyorsa bu düğüm rotaya eklenmez. Eğer son eklenen düğüm çıkış düğümüyse, bu düğümünden bitiş noktasına direk gidilmesi ile toplam mesafe kısıtının aşılp aşılmadığına bakılır. Eğer aşılyorsa, ilgili dikdörtgenin giriş düğümünden gidebileceği başka bir çıkış noktası bulunur ve rotaya o çıkış noktası son düğüm olarak eklenir.

Adım 2.12. Tur sonlandırıldıysa ağırlık merkezini güncelleyin. Eğer t farklı çözüm bulunduysa Adım 3'e geçin.

Bu adımda her rota hesabından sonra ağırlık merkezi o rotanın ağırlık merkezi olarak güncellenir ve bir sonraki tur için Adım 2.3'te güncellenmiş ağırlık merkezine olan mesafe kullanılır. Tur tamamlandıktan sonra düşümlerin skorları Golden vd. (1988)'nin geliştirdiği öğrenme ölçüsüyle güncellenir. Bu ölçüde, bir düğüme toplam bilgi değeri yüksek rotalarda gidiliyorsa o düğümün skor ölçüsü artırılırken toplam bilgi değeri düşük rotalarda gidildiğinde skor ölçüsü azaltılır. Eğer t çözüm bulunduysa, Adım 3'e geçilir.

Adım 3. Tüm ağırlık merkezleri değerlendirildiyse algoritmayı sonlandırın. Aksi durumda ağırlık merkezini değiştirip Adım 2'ye dönün.

Bu adımda bir sonraki ağırlık merkezine geçilir ve Adım 2'ye dönülür.

Adım 4. Oluşturulan ($5 * t$) farklı çözüm rotasından en yüksek bilgiye sahip rotayı algoritma çözümü olarak seçin.

Tüm ağırlık merkezleri için toplam ($5 * t$) farklı çözüm rotası oluşturulduktan sonra listelenir. En yüksek bilgi değerine sahip rota bulunur ve algoritma çözümü olarak seçilir. Bu koşulu sağlayan birden fazla rota varsa toplam mesafesi en az olan çözüm olarak seçilir. Algoritmanın adımlarından 2.1 ve 2.10 problemde bölgesel hedefler bulunması nedeniyle GWL yönteminden (Golden vd, 1988) farklılaşmaktadır. Ayrıca düğüm değerine yeni bir ölçü eklenmiş (Adım 2.7) ve Adım 2.8'de beş yerine üç farklı en yakın düğümünden biri seçilerek tura eklenmiştir. 2-opt kullanarak rotaların düzenlenmesi yerine de Adım 2.10'da gidilen hedeflerin giriş çıkış noktaları değiştirilerek tur mesafelerinde iyileşme yapılmıştır.

5. SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde, çok amaçlı görev planlaması probleminin çözümü için geliştirilen matematiksel model ve geliştirilen sezgisel yöntemin performansları değerlendirilmiştir. Bu iki yöntem farklı boyutta test problemlerine uygulanmış ve sonuçları verilmiştir. Matematiksel model GAMS 23.3'te, sezgisel algoritma ise MATLAB R2022b'de yazılmıştır. Çalışmalar Intel

Core i7-4720HQ CPU 2.60 GHz işlemci 12 GB RAM özelliklerine sahip bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

Test problemlerinde iki boyutlu 100x100 birim²'lik bir alana, 5 ve 7 birim kenar ölçülerine sahip 5, 10, 20, 40 ve 60 adet hedef birbirleri ile çakışmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Uçuş için başlangıç ve bitiş noktaları (0,0) olarak belirlenmiştir. Hava aracının hedef bölgeyi tararken kat ettiği mesafe ile doğru orantılı olacak şekilde bilgi değeri atanmıştır. Test problemlerinde kullanılan parametrelerin değerleri Tablo 1'de belirtilmiştir.

Golden ve diğ. (1988)'nin önerisi doğrultusunda α , β , γ , ve θ ağırlık katsayıları için (0,7, 0,05, 0,05, 0,2) değerleri kullanılmıştır. Tekrar sayısı (t) ise 100 olarak belirlenmiş, bu durumda 5 ağırlık merkezi için toplamda 500 çözüm üretilmiştir.

Tablo 1. Test problemlerinde kullanılan parametreler

Parametre	Değer
μ	100
ρ	0,01
α	0,70
β	0,05
γ	0,05
θ	0,20
t	100

5.1. 5-Hedefli Problem

İlk problemde, dört hedef ve bir başlangıç noktası (toplamda beş hedef), 100x100 birim²'lik bir alana hedefler çakışmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Farklı uçuş mesafe değerleri (ϵ) için epsilon-kısıt yöntemi ve geliştirilen sezgisel yöntem uygulanmış ve elde edilen çözümlerin toplam bilgi (TB) ve toplam mesafe (TM) değerleri, ve algoritmaların çalışma süreleri (CPU) Tablo 2'de verilmiştir. Fark sütununda, sezgisel yöntemin bilgi değerinin epsilon-kısıt yönteminin bilgi değeri ile arasındaki farkın optimal çözüme oranı yüzde olarak gösterilmiştir.

150 dışındaki tüm ϵ değerleri için sezgisel yöntemle optimal sonuçlara ulaşılmıştır. 150 değerinde ise iki problemin sonucu arasında küçük bir fark bulunmaktadır. İki yöntemin çözüm süreleri birbirlerine çok yakındır.

Tablo 2. 5-Hedefli Problemin Sonuçları

ϵ	ϵ -Kısıt Yöntemi			Sezgisel Yöntem			Fark
	TB	TM	CPU (sn)	TB	TM	CPU (sn)	
200	309,96	160,56	0,04	309,96	160,56	0,12	%0,00
150	300,96	149,03	0,05	296,71	143,82	0,12	%1,41
125	269,71	124,37	0,13	269,71	124,38	0,18	%0,00
100	154,98	87,48	0,83	154,98	87,48	0,11	%0,00
75	132,73	68,39	0,04	132,73	68,40	0,11	%0,00
50	73,24	49,75	0,04	73,24	49,76	0,05	%0,00

5.2. 20-Hedefli Problem

İkinci problemde ise 19 hedef ve bir başlangıç noktası 100x100 birim²'lik bir alana hedefler çakışmayacak şekilde yerleştirilmiştir. İki çözüm yönteminin sonuçları Tablo 2'ye benzer yapıdaki Tablo 3'te sunulmuştur.

Sezgisel yöntemin bulduğu çözümler ile kesin yöntemin optimal çözümleri arasında en fazla %14'lük bir fark görülmüştür. Küçük ε değerlerinde optimal çözüm bulunurken büyük ε değerlerinde optimal ile farklar oluşmuştur. Orta ε değerlerinde ise optimalden daha fazla uzaklaşmıştır. Burada yapılan karşılaştırmada sadece bilgi değeri kullanılmıştır, çünkü mesafe değeri sezgisel yöntemde amaç fonksiyonuna katılmamış, sadece kısıt olarak kullanılmıştır. Genel olarak iki yöntemin bulduğu çözümler birbirine yakın, çözüm süreleri ise sezgisel yöntem için oldukça kısadır.

Tablo 3. 20-Hedefli Problemin Sonuçları

ε	ε -Kısıt Yöntemi			Sezgisel Yöntem			Fark
	TB	TM	CPU	TB	TM	CPU (sn)	
800	1472,31	654,20	7,16 sn	1400,07	704,38	1,51	%4,91
600	1424,07	596,41	23,43 dk	1280,08	596,46	1,36	%10,11
400	976,11	399,79	13,12 dk	843,38	399,33	1,06	%13,60
200	438,44	197,96	2,76 dk	386,94	198,55	0,68	%11,75
100	154,98	91,84	1,72 dk	154,98	87,47	0,16	%0,00
50	73,24	49,74	0,31 sn	73,24	49,74	0,06	%0,00

5.3. 40-Hedefli Problem

Üçüncü problemde ise 39 hedef 100x100 birim²'lik bir alana yerleştirilmiştir. Sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Bu kısımda, çözüm sürelerinin oldukça uzun olmasından dolayı epsilon-kısıt yönteminin süresi 8 saat ile sınırlandırılmıştır. Bu nedenle, epsilon-kısıt çözümlerinin optimal çözüm ile aralarındaki fark bilgisi tabloya eklenmiştir. Sezgisel yöntem kısmındaki fark ise kesin çözümde bulunan en iyi uygun çözüm ile sezgisel yöntem sonucunun bilgi değeri arasındaki farktır.

Epsilon-kısıt yöntemi iki problemde kısa zamanda çözüme ulaşırken kalan problemlerde en fazla %4 farklarla durmuştur. Sezgisel yöntem sonuçları ile kesin yöntem arası farklar en fazla %15 civarına çıkmakta, küçük boyutlu problemlerde ise sezgisel yöntem ile optimal çözüm yakalanmaktadır. Bunun yanı sıra, sezgisel yöntemin en fazla 8 CPU saniye gibi bir sürede çözüme ulaşabildiği görülmüştür.

Tablo 4. 40-Hedefli Problemin Sonuçlar

ε	ε -Kısıt Yöntemi				Sezgisel Yöntem			ε -Kısıt Çözümü ile Fark
	TB	TM	CPU	Optimal ile Fark	TB	TM	CPU (sn)	
1200	2961,63	1199,92	8 sa	%0,34	2634,39	1198,86	8,08	%11,05
1000	2564,66	999,98	8 sa	%0,22	2218,44	989,34	7,48	%13,50
800	2063,22	799,88	8 sa	%0,35	1754,01	780,98	7,50	%14,98
600	1536,54	598,60	8 sa	%0,69	1296,83	594,04	5,66	%15,60
400	911,12	398,90	8 sa	%2,65	843,89	388,89	3,91	%7,37
200	438,44	197,95	8 sa	%4,42	380,94	191,84	1,42	%13,11
100	154,98	87,47	309,62 sn	-	154,98	87,47	0,70	%0,00
50	73,24	49,74	2,63 sn	-	73,24	49,74	0,41	%0,00

5.4. 60-Hedefli Problem

Son problemde 59 hedef 100x100 birim²'lik bir alana yerleştirilmiştir. Sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir. Bu kısımda da matematiksel modelin çözüm süresi 8 saat ile sınırlandırılmıştır.

Tablo 5. 60-Hedefli Problemin Sonuçlar

ϵ	ϵ -Kısıt Yöntemi				Sezgisel Yöntem			
	TB	TM	CPU	Optimal ile Fark	TB	TM	CPU (sn)	ϵ -Kısıt Yöntemi ile Fark
2000	4571,91	1922,34	8 sa	%0,00	4140,17	1933,44	26,00	%9,44
1750	4409,19	1748,66	8 sa	%0,32	3732,46	1747,62	25,53	%15,35
1500	3889,23	1499,99	8 sa	%0,43	3251,05	1488,97	22,42	%16,41
1250	3254,82	1249,57	8 sa	%0,52	2736,87	1241,30	21,17	%15,91
1000	2604,40	999,84	8 sa	%0,53	2235,94	983,99	18,41	%14,15
750	1937,23	749,98	8 sa	%1,39	1611,54	743,63	14,87	%16,81
500	1268,81	499,93	8 sa	%2,19	1076,36	493,42	10,69	%15,17
250	584,93	248,43	8 sa	%5,82	502,18	243,86	3,17	%14,15
100	154,98	87,47	1599,52 sn	-	150,73	79,31	1,25	%2,74

Epsilon-kısıt yöntemi ile 8 saatte sadece uçuş mesafesinin 100 birim olduğu problemin optimal çözümü bulunabilmiştir. Kalan problemler için küçük farklarla problem sonlanmıştır. Sezgisel yöntem ile elde edilen çözümlerin epsilon-kısıt ile bulunan çözümlere farkı en fazla %17 civarındadır. Çözüm süreleri ise 8 saate kıyasla oldukça az, en kötü durumda 26 saniyedir.

Tüm çözümlere bakıldığında, epsilon-kısıt yöntemine göre sezgisel yöntemin bulduğu çözümler arasındaki farkın çok küçük ve çok büyük mesafe kısıtı değerlerinde daha az, ara mesafe kısıtı değerlerinde ise daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak, mesafenin çok kısıtlayıcı değerlerinde çok çözüm alternatifinin bulunmaması ve bu sayede optimale yakın çözümler bulunması, büyük değerlerde ise mesafenin kısıtlayıcı olmaması ve mesafe gözetilmeden bilginin maksimize edildiği çözümün aranması düşünülebilir.

Tüm örneklerde hava aracının menziline tüm bölgeleri gezmeye yeteceği varsayılmıştır. Uygulamalarda, epsilon değeri en fazla hava aracının menziline kadar artırılmalı ve uygun çözümler aranmalıdır.

6. SONUÇ

Bu çalışmada bir hava aracı için birden çok hedefin gezilip bilgi toplanacağı çok amaçlı görev planlaması problemi ele alınmıştır. Bu problemin literatürde çokça çalışılan çok amaçlı oryantiring probleminden farkı hedeflerin noktasal yerine bölgesel tanımlanması, ve bölgelerin içinin de gezilmesinin gerekliliğidir. Problemden iki amaç fonksiyonu gözetilmiştir. İlk amaç fonksiyonu, hava aracının hedef içerisinde ve hedefler arasında kat edeceği toplam mesafenin minimize edilmesidir. İkincisi ise hava aracının hedefleri ziyaret ederken toplayacağı bilginin maksimize edilmesidir. Problemin matematiksel modeli geliştirildikten sonra etkin çözümlerin bulunması için değiştirilmiş epsilon-kısıt yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemle gidilecek toplam mesafe kısıt olarak değerlendirilmiş ve bu mesafede hava aracının hedeflerden elde edebileceği maksimum bilgi değeri aranmıştır. Ayrıca büyük boyutlu problemlere hızlı çözüm bulmak adına Golden ve diğ. (1988) tarafından geliştirilen sezgisel yöntem probleme uyarlanmıştır. Algoritmada hava aracının ziyaret edeceği hedeflerin köşe noktaları (giriş-çıkış) düğümler olarak ele alınmıştır. Verilen bir uçuş mesafesi için ilgili giriş-çıkış düğümleri seçilerek hava aracının maksimum bilgi elde edeceği uygun rotalar oluşturulmuştur. Problemin çözümü için geliştirilen bu iki yöntem farklı boyuttaki test problemleri üzerinde uygulanmıştır. Küçük

boyutlu problemlerde epsilon-kısıt yöntemi ile optimal çözümler, sezgisel yöntem ile ise optimal ya da optimale yakın sonuçlar elde edilmiştir. Büyük boyutlu problemlerde epsilon-kısıt yöntemi ile sekiz saatlik çalışma süresi içinde optimal çözüm ile farkı en fazla %6 olan çözümler elde edilirken sezgisel yöntem ile yarım dakika çalışma süresinde, epsilon-kısıt yönteminden en fazla %17 farklı çözümler bulunmuştur. Bunun yanı sıra geliştirilen sezgisel yöntemin çözüm süreleri matematiksel modelin çözüm sürelerine küçük problemlerde yakın, büyük problemlerde ise çok daha kısadır. Genel olarak, epsilon-kısıt yöntemine göre sezgisel yöntemin bulduğu çözümler arasındaki fark çok küçük ve çok büyük mesafe kısıtı değerlerinde daha az, ara mesafe kısıtı değerlerinde ise daha fazladır. Tüm sonuçlara bakıldığında geliştirilen sezgisel yöntem ile kısa zamanda uygun çözümlere ulaşılabileceği ve zaman kısıtı bulunmayan küçük problemlerde ise problemin kesin yöntem ile çözülebileceği söylenebilir.

Çalışma farklı yönlerde geliştirilebilir. İlk olarak oryantiring problemi için geliştirilmiş farklı çözüm yöntemleri bu probleme uyarlanabilir ve algoritmalar arası performans karşılaştırması yapılabilir. Problem, birden çok hava aracının bulunduğu versiyona genişletilebilir ve algoritmalar bu probleme uyarlanabilir. Problemin çözümü için metasezgisel algoritmalara başvurulabilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar(lar), bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Ayşegül Atak: Çalışmanın Kavramsal ve Tasarım Süreçlerinin Belirlenmesi, Veri Toplama, Veri Analizi ve Yorumlama, Makale Taslağının Oluşturulması, Son Onay ve Tam Sorumluluk

Diclehan Tezcaner Öztürk: Çalışmanın Kavramsal ve Tasarım Süreçlerinin Belirlenmesi, Çalışmanın Kavramsal ve Tasarım Süreçlerinin Yönetimi, Veri Analizi ve Yorumlama, Fikirselleştirme İçeriğinin Eleştirel İncelemesi, Son Onay ve Tam Sorumluluk

KAYNAKLAR

1. Chankong, V. ve Haimes, Y.Y. (1983) *Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology*, North-Holland, New York.
2. Chen, J., Du, C., Zhang, Y., Han, P., ve Wei, W. (2022) A Clustering-Based Coverage Path Planning Method for Autonomous Heterogeneous UAVs. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23 (12), 25546-25556. doi: 10.1109/TITS.2021.3066240
3. Chen, J., Zhang, R., Zhao, H., Li, J. ve He, J. (2023) Path Planning of Multiple Unmanned Aerial Vehicles Covering Multiple Regions Based on Minimum Consumption Ratio. *Aerospace*, 10, 93. doi: 10.3390/aerospace10020093
4. Cho, S.-W., Park, J.-H., Park, H.-J., ve Kim, S. (2022) Multi-UAV Coverage Path Planning Based on Hexagonal Grid Decomposition in Maritime Search and Rescue. *Mathematics*, 10 (83). doi: 10.3390/math10010083
5. Evers, L., Glorie, K., Van Der Ster, S., Barros, A. I., ve Monsuur, H. (2014) A two-stage approach to the orienteering problem with stochastic weights. *Computers & Operations Research*, 43, 248-260. doi: 10.1016/j.cor.2013.09.011
6. Golden, B.L., Levy, L. ve Vohra, R. (1987) The orienteering problem, *Naval Research Logistics*, 34:3, 307 – 318.

7. Golden, B.L., Wang, Q. ve Liu, L. (1988) A multifaceted heuristic for the orienteering problem, *Naval Research Logistics*, 35:3, 359-366.
8. Jiao, Y. S., Wang, X. M., Chen, H. ve Li, Y. (2010) Research on the coverage path planning of uavs for polygon areas. In *2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 1467-1472, IEEE. doi: 10.1109/ICIEA.2010.5514816
9. John, M. Panton, D. ve White, K. (2001) Mission planning for regional surveillance, *Annals of Operations Research*, 108, 157–173. doi: 10.1023/A:1016063129217
10. Karasakal, O. (2016) Minisum and maximin aerial surveillance over disjoint rectangles, *TOP*, 24, 705–724. doi: 10.1007/s11750-016-0416-1
11. Karasakal, O., Karasakal, E. ve Maraş, G. (2020) Multiobjective aerial surveillance over disjoint rectangles, *Computers & Industrial Engineering*, 148. doi: 10.1016/j.cie.2020.106732
12. Kyriakakis, N. A., Marinaki, M., Matsatsinis, N. ve Marinakis, Y. (2022) A cumulative unmanned aerial vehicle routing problem approach for humanitarian coverage path planning, *European Journal of Operational Research*, 300 (3), 992-1004. doi: 10.1016/j.ejor.2021.09.008
13. Le, W., Xue, Z., Chen, J. ve Zhang, Z. (2022) Coverage Path Planning Based on the Optimization Strategy of Multiple Solar Powered Unmanned Aerial Vehicles, *Drones*, 6, 203. doi: 10.3390/drones6080203
14. Lo, M. H., Liang, Y. C. ve Hsieh, J. C. (2010) A modified variable neighborhood search algorithm for orienteering problems. *The 40th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, Awaji, Japan, 2010, 1-6. doi: 10.1109/ICCIE.2010.5668224
15. Majeed, A. ve Hwang, S.O. (2021) A Multi-Objective Coverage Path Planning Algorithm for UAVs to Cover Spatially Distributed Regions in Urban Environments. *Aerospace*, 8, 343. doi: 10.3390/aerospace8110343
16. Muñoz, J., López, B., Quevedo, F., Monje, C.A., Garrido, S. ve Moreno, L.E. (2021) Multi UAV Coverage Path Planning in Urban Environments. *Sensors*, 21 (21):7365. doi: 10.3390/s21217365
17. Nedjati, A., Izbirak, G., Vizvari, B. ve Arkat, J. (2016) Complete Coverage Path Planning for a Multi-UAV Response System in Post-Earthquake Assessment, *Robotics*, 5(4), 26. doi: 10.3390/robotics5040026
18. Ng, K.Y.K, ve Sancho, N.G.F. (2009) Regional surveillance of disjoint rectangles: a travelling salesman formulation, *Journal of the Operational Research Society*, 60:2, 215-220. doi: 10.1057/palgrave.jors.2602507
19. Sockkappa, P. (1990) The cost-constrained traveling salesman problem, *The Degree of Doctor of Philosophy*, Stanford University.
20. Szwarc, K., ve Boryczka, U. (2022) A novel approach to the Orienteering Problem based on the Harmony Search algorithm. *PLoS ONE* 17(2): e0264584. doi: 10.1371/journal.pone.0264584
21. Patel, N., Narayanaswamy, N.S. ve Joshi, A. (2020) Hybrid Genetic Algorithm for Ridesharing with Timing Constraints: Efficiency Analysis with Real-World Data. In: *Proceedings of the 2020 Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO'20*, 1159–1167. doi:10.1145/3377930.3389804
22. Tarakçı, K. (2021) Vehicle routing for aerial surveillance with a homogeneous fleet, *The Degree of Master of Science in Industrial Engineering*, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.

23. Tsiligirides, T. (1984) Heuristic Methods, *Applied to Orienteering*, *Journal of the Operational Research Society*, 35, 797–809. doi: /10.1057/jors.1984.162
24. Vansteenwegen, P., & Gunawan, A. (2019). Orienteering problems. *EURO Advanced Tutorials on Operational Research*, Springer.
25. Vasquez-Gomez, J. I., Herrera-Lozada, J. C., ve Olguin-Carbajal, M. (2018) Coverage path planning for surveying disjoint areas, *In 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 899-904, IEEE. doi: 10.1109/ICUAS.2018.8453386
26. Vazquez-Carmona E. V., Vasquez-Gomez, J. I., Herrera-Lozada J. C., Antonio-Cruz M. (2022) Coverage path planning for spraying drones, *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108125. doi: 10.1016/j.cie.2022.108125
27. Wang, Y., Kirubarajan, T., Tharmarasa, R., Zargani, R. ve Kashyap, N. (2018) Multiperiod coverage path planning and scheduling for airborne surveillance, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 54:5. doi: 10.1109/TAES.2018.2812538
28. Yuan, J., Liu, Z., Lian, Y., Chen, L., An, Q., Wang, L. ve Ma, B. (2022) Global Optimization of UAV Area Coverage Path Planning Based on Good Point Set and Genetic Algorithm, *Aerospace*, 9, 86. doi:10.3390/aerospace9020086
29. Zuo, Y., Tharmarasa, R., Zargani, R., Kashyap, N., Thiyagalingam, J. ve Kirubarajan, T. (2020) MILP formulation for aircraft path planning in persistent, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 56:5, 3796-3811. doi: 10.1109/TAES.2020.2983532