



A hybrid approach to critical target tracking in time-sensitive sweep coverage with multiple UAVs

Recep Özdağ*

Van Yüzüncü Yıl University, Faculty of Engineering, Computer Engineering, 65080, Van, Türkiye

Highlights:

- UAV-based SC approach for time-sensitive targets
- Priority tracking of critical targets
- Sweep path optimization of multiple UAVs using a hybrid design

Keywords:

- Multiple UAVs
- Sweep coverage
- Critical target tracking
- Crow search algorithm
- Greedy algorithm

Article Info:

Research Article

Received: 12.10.2025

Accepted: 19.07.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1801805

Correspondence:

Author: Recep Özdağ

e-mail: rozdag@yyu.edu.tr

phone: +90 507 565 9699

Graphical/Tabular Abstract

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Sweep Coverage (SC) refers to the process of monitoring or surveilling targets within a given Area of Interest (AoI) by performing patrol operations over them. Due to the limited battery endurance of UAVs, coordinated multi-UAV operations are required to achieve efficient target monitoring. In this context, time-sensitive targets require timely tracking while considering UAV flight constraints and target access times. This study introduces a novel SC problem, termed Priority Tracking of Critical Targets in Time-Sensitive Sweep Coverage with Multiple UAVs (PTC-TS), which focuses on prioritizing critical targets according to their time-sensitive characteristics. The proposed framework employs a Circular Coverage Area (CCA) model to facilitate simultaneous monitoring of multiple targets and a hybrid optimization strategy to support effective multi-UAV sweep coverage (Figure A).

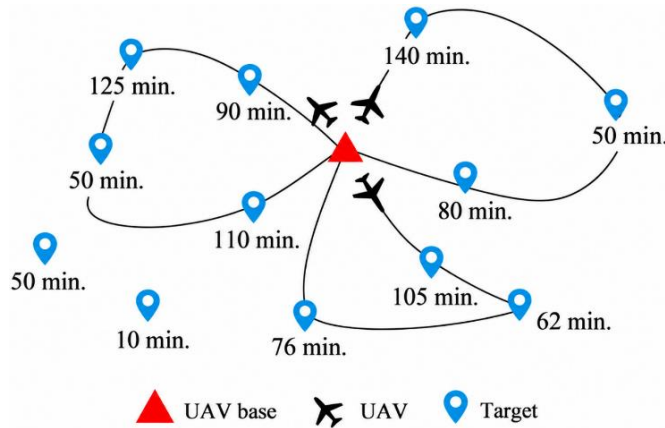


Figure A. SC tracking of time-sensitive targets with multiple UAVs

Purpose: This study introduces a new SC problem classified as NP-hard, termed PTC-TS. The proposed problem considers time-sensitive target access times and synchronized multi-UAV SC under UAV flight constraints. Furthermore, the Circular Coverage Area (CCA) model enables simultaneous monitoring of multiple targets with fewer UAVs. Thus, the proposed approach aims to achieve timely tracking of critical targets.

Theory and Methods: To solve the PTC-TS problem, a hybrid approach named Circular CSA-greedy (C-CSA_{greedy}) is developed by combining the metaheuristic method, the Crow Search Algorithm (CSA), with a heuristic method, the Greedy Algorithm (GA). In addition, a novel multi-parameter cost function is introduced to prioritize critical targets and improve optimization performance.

Results: Monte Carlo simulations demonstrated that the proposed C-CSA_{greedy} algorithm outperformed existing approaches in prioritizing time-sensitive critical targets. Specifically, C-CSA_{greedy} achieved an average tracking time of 4.53, compared with 5.87 for GA, while increasing the coverage ratio within the first 25% of the time interval to 71.55%, compared with 53.79% for GA. The observed improvements were statistically significant at the 1% level ($p < 0.001$).

Conclusion: The results demonstrate that the proposed C-CSA_{greedy} approach provides an effective and statistically reliable solution for prioritizing time-sensitive critical targets within the AoI.



Çoklu İHA'larla zaman hassasiyetli süpürme kapsamasında kritik hedef takibi için hibrit bir yaklaşım

Recep Özdağ*^{ID}

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 65080, Van, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Zaman hassasiyetine sahip hedefler için İHA tabanlı SC yaklaşımı
- Kritik hedeflerin önceliklendirilmiş takibi
- Hibrit tasarım ile çoklu İHA'ların süpürme yolu optimizasyonu

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 12.10.2025

Kabul: 19.07.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1801805

Anahtar Kelimeler:

Çoklu İHA,
süpürme kapsaması,
kritik hedef takibi,
karga arama algoritması,
açgözlü algoritma

ÖZ

Çoklu İnsansız Hava Aracı (İHA) ile gerçekleştirilen süpürme kapsaması (Sweep Coverage – SC), ilgili alan (Area of Interest – AoI) içerisindeki hedeflerin izlenmesini veya gözetlenmesini amaçlayan bir süreçtir. İHA'ların sınırlı batarya ömrü nedeniyle, koordineli çoklu İHA devriyesine dayanan SC yaklaşımı, tüm hedeflerin takibini mümkün kılmaktadır. Yaklaşım, afet ve acil iletişim senaryolarında kullanılabilir. Bu çalışmada, çoklu İHA'lar ile Zaman Hassasiyetli Süpürme Kapsamında Kritik Hedeflerin Öncelikli Takibi (Priority Tracking of Critical Targets in Time-Sensitive Sweep Coverage with Multiple UAVs – PTC-TS) olarak adlandırılan yeni bir SC problemi tanımlanmıştır. Ayrıca, İHA'ların yeryüzünde oluşturduğu Dairesel Kapsama Alanı (Circular Coverage Area – CCA) esas alınarak, daha az sayıda İHA ile çoklu hedeflerin eşzamanlı takibini sağlayan dairesel kapsama modeli uygulanmıştır. Karga Arama Algoritması (Crow Search Algorithm – CSA) ve Açgözlü Algoritma (Greedy Algorithm – GA) temel alınarak Circular CSA-greedy (C-CSAgreedy) adlı yeni bir hibrit yaklaşım geliştirilmiştir. Bunun yanında, problemi çözmek için yeni bir maliyet fonksiyonu önerilmiştir. Monte Carlo simülasyonlarında C-CSAgreedy ile GA karşılaştırılmış ve C-CSAgreedy'nin zaman hassasiyetli kritik hedeflerin öncelikli takibinde üstün performans gösterdiği belirlenmiştir. C-CSAgreedy, kritik hedeflerin ortalama takip süresini 4,53'e (GA: 5,87) düşürmüş ve ilk %25'lik dilimdeki kapsama oranını %71,55'e (GA: %53,79) çıkarmıştır. Elde edilen farklar istatistiksel olarak anlamlıdır ($p < 0,001$).

A hybrid approach to critical target tracking in time-sensitive sweep coverage with multiple UAVs

H I G H L I G H T S

- A UAV-based SC approach for time-sensitive targets
- Priority-based tracking of critical targets
- Sweep path optimization of multiple UAVs via a hybrid design

Article Info

Research Article

Received: 12.10.2025

Accepted: 19.07.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1801805

Keywords:

Multiple UAVs,
sweep coverage,
critical target tracking,
crow search algorithm,
greedy algorithm

ABSTRACT

Sweep Coverage (SC) using multiple Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) is a process aimed at monitoring or surveilling targets within a given Area of Interest (AoI). Due to the limited battery endurance of UAVs, the SC approach based on coordinated multi-UAV patrols enables the tracking of all targets. This approach can be used in disaster response and emergency communication scenarios. In this study, a new SC problem, named Priority Tracking of Critical Targets in Time-Sensitive Sweep Coverage with Multiple UAVs (PTC-TS), is introduced. Furthermore, a Circular Coverage Area (CCA)-based coverage model is applied to enable the simultaneous tracking of multiple targets with fewer UAVs. A new hybrid approach, Circular CSA-greedy (C-CSAgreedy), is developed based on the Crow Search Algorithm (CSA) and Greedy Algorithm (GA). In addition, a novel cost function is proposed to solve the problem. Monte Carlo simulations compare C-CSAgreedy with GA and demonstrate its superior performance in prioritizing time-sensitive critical targets. C-CSAgreedy reduces the average tracking time of critical targets to 4,53 (GA: 5,87) and increases the coverage ratio within the first 25% of the time interval to 71,55% (GA: 53,79%). The observed differences are statistically significant ($p < 0,001$).

1. Giriş (Introduction)

Çevre ve sınır güvenliği ile ortam izleme gibi insan veya nesnelerin takibine dayalı uygulamalarda Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA) etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda izleme görevlerinin gerçekleştirilebilmesi için, KAA'yı oluşturan mobil algılayıcı düğümlerin (node) ilgili alanda (Area of Interest – AoI) etkin bir şekilde konumlandırılması gerekmektedir [1]. Düğümlerin etkin dağıtımı sayesinde AoI içerisindeki hedeflerin sürekli takibi sağlanabilir. Ancak, hedeflerin sürekli takibi bazı uygulamalarda gerekli olmadığı gibi düğüm enerjisinin hızlı tükenmesine de neden olabilmektedir [2]. Bu durum, daha fazla sayıda algılayıcının kullanılmasını gerektirerek uygulama maliyetini artırmakta ve KAA'nın yaşam süresini olumsuz etkilemektedir [3]. Bu nedenle, hedeflerin sürekli takibi yerine belirli periyotlarla izlenmesini sağlayan süpürme kapsamı (Sweep Coverage – SC) yaklaşımı, özellikle KAA'ların düğüm kapsama problemlerinde yaygın olarak uygulanmaktadır [4-6].

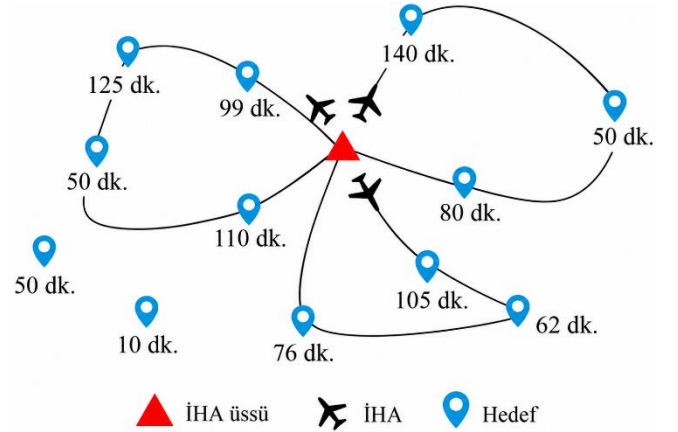
Gelişen teknoloji ile birlikte İnsansız Hava Araçları (İHA) hem askeri hem de sivil uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mobil algılayıcılara kıyasla İHA'lar; daha hızlı konum değiştirebilme, geniş bir coğrafyada AoI'yi gözlemleyebilme ve uçuş sürelerine bağlı olarak daha uzun menzillere ulaşabilme gibi avantajları sayesinde sahada aktif olarak görev yapmaktadır. Örneğin, senkronize uçan İHA'ların iş birliği ile orman yangınlarının tespiti gerçekleştirilebilmektedir [7]. Ayrıca, ülke sınır hattının savunulmasında uygulanan çoklu hedef takibi için son dönemde İHA'lar sıklıkla kullanılmaktadır [8]. Dolayısıyla, İHA'lar esnek hareket kabiliyetleri sayesinde güvenli olmayan ortamlarda insan-çevre etkileşimini azaltmakta; orman yangınları gibi afet durumlarının tespiti ile sınır devriyesi uygulamalarında aktif rol oynamaktadır.

Sabit veya döner kanatlı İHA'lar, sınırlı batarya kapasiteleri nedeniyle AoI'deki hedefleri sürekli olarak izleyemez. Etkili bir ortam gözetlemesi veya izleme için, İHA SC yöntemiyle hedef takibi belirli periyot aralıklarında gerçekleştirilir [9-11]. Bu süreçte, kritik hedeflerin öncelikli olarak takip edilmesi, afet durumlarında acil müdahale gerektiren hedeflere daha hızlı ulaşılmasını sağlar. Afet durumlarındaki kurtarma işlemleri zaman hassasiyeti göz önünde bulundurularak yürütüldüğünden, İHA'nın kritik hedeflere zamanında ulaşamaması durumunda acil müdahale başarısız olabilir. Bu nedenle, ortamda bulunan kritik hedeflerin takibi; öncelikli erişim gerektiren, düşük zaman hassasiyetine sahip hedefler dikkate alınarak İHA SC ile gerçekleştirilmelidir [12, 13].

Şekil 1'de gösterildiği üzere, zaman hassasiyetine sahip bir hedefin erişim süresi 99 dakika (dk) ise, bu hedefin söz konusu süre içerisinde İHA SC ile takip edilmesi gerekir. Örneğin, nüfus yoğunluğu yüksek bölgeler, öncelikli olarak kapsanması gereken ve erişim sürelerinin daha kısa olduğu hedefleri içermektedir. Bu bölgelerde, mobil sinyal istasyonlarıyla donatılmış İHA'ların kısa sürede erişmesi gereklidir. Öte yandan, kırsal ve nüfus yoğunluğu düşük bölgelerde erişim süreleri daha uzun olabildiğinden, bu hedefler daha düşük öncelikli olarak değerlendirilebilir. Dolayısıyla, afet bölgesindeki duruma bağlı olarak, acil ulaşılması gereken hedeflerin erişim sürelerinin düşük, acil olmayan hedeflerin ise yüksek olması beklenir.

Bu bağlamda, AoI'deki zaman hassasiyetli hedeflerin erişim sürelerini karşılayacak şekilde, çoklu İHA'ların SC rotalarının planlanması, bu makalenin odak noktasını oluşturmaktadır. Ayrıca, İHA'ya ait donanımsal kaynakların sınırlı olması nedeniyle, çoklu İHA ile zaman hassasiyetli hedeflerde SC verimliliğinin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, İHA SC ile zaman hassasiyetli tüm hedeflerin zamanında takibi sağlanmalı; kritik hedefler öncelikli

olmak üzere, tüm hedefler için erişim sürelerine dayalı bir takip planı oluşturulmalıdır.



Şekil 1. Çoklu İHA ile zaman hassasiyetli hedeflerin SC takibi (SC tracking of time-sensitive targets with multiple UAVs)

Mevcut çalışmalar incelendiğinde, zaman hassasiyetli süpürme kapsama problemlerinde kritik hedeflerin önceliklendirilmesi ile kapsama verimliliğinin birlikte ele alındığı bütüncül yaklaşımların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, özellikle zaman hassasiyetinin yüksek olduğu senaryolarda hedeflere zamanında erişimi zorlaştırmakta ve karar mekanizmalarının etkinliğini azaltmaktadır. Bu nedenle, kritik hedeflerin önceliklendirilmesi ile çoklu hedef kapsama gereksinimlerini dengeli bir şekilde ele alabilen daha etkin çözüm yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

İHA'nın bir hedefe olan uçuş mesafesi, o hedefin zaman hassasiyetli erişim süresinden bağımsızdır. Bu nedenle, İHA'nın öncelikli olarak kısa mesafeli hedeflere mi yoksa düşük erişim süreli hedeflere mi ulaşacağını belirlenmesi gerekmektedir. Hedefe olan mesafe ile hedefin erişim süresi arasındaki ilişki yeterince koordine edilmezse, İHA mevcut konumundan uzakta bulunan ve düşük erişim süresine sahip kritik hedeflere zamanında ulaşamayabilir. Bu nedenle, verimli bir SC yol planlamasında, İHA'nın her hedefe uçuşu sırasında bu değişkenlerin koordinasyonu sağlayan algoritma tasarımı büyük önem taşımaktadır. Bu koordinasyonu optimum şekilde sağlamak amacıyla, bu çalışmada "Çoklu İHA'lar ile Zaman Hassasiyetli Süpürme Kapsamında Kritik Hedeflerin Öncelikli Takibi" (Priority Tracking of Critical Targets in Time-Sensitive Sweep Coverage with Multiple UAVs – PTC-TS) olarak adlandırılan yeni bir SC problemi tanımlanmıştır.

PTC-TS probleminin amacı, senkronize uçan çoklu İHA'lar kullanarak, kritik hedefler öncelikli olmak üzere AoI'deki zaman hassasiyetli tüm hedeflerin SC ile takip edilmesidir. PTC-TS probleminin çözümünde, literatürde bilinen kısıtlar [9, 11-13] esas alınarak zaman hassasiyetli kritik hedeflerin öncelikli takibi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, İHA'nın yeryüzünde oluşturduğu kapsama (tarama) yarıçapı esas alınarak dairesel kapsama modeli geliştirilmiş ve böylece çoklu hedeflerin senkron bir şekilde tek İHA ile takibi mümkün hâle getirilmiştir.

Bildiğimiz kadarıyla, literatürde zaman hassasiyetli ve kritik hedeflerin öncelikli takibini amaçlayan problemin dairesel kapsama modeli ile çözümünde, Karga Arama Algoritması (Crow Search Algorithm – CSA) ve Açgözlü Algoritma (Greedy Algorithm – GA) temelinde bir yaklaşım rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu çalışmada [13]'teki yaklaşımdan farklı olarak, kritik hedeflerin öncelikli takibi için dairesel kapsama modeline dayalı çok parametrelili bir

optimizasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. CSA [14] ve GA [15] temel alınarak tasarlanan ve Circular CSA-greedy (C-CSA_{greedy}) olarak adlandırılan yeni yaklaşım, bu problemin çözümünde uygulanmıştır. Çalışmanın katkıları aşağıda özetlenmiştir:

- PTC-TS probleminin çözümü için, çok boyutlu ve sürü tabanlı meta-sezgisel CSA ile en yakın komşu çözümünü kullanan sezgisel GA'nın hibrit tasarımı yapılarak, C-CSA_{greedy} isimli yeni bir algoritma geliştirilmiştir.
- Kritik hedeflerin önceliklendirilmesi ile çoklu hedef kapsama gereksinimlerinin birlikte ele alınabilmesi amacıyla, Dairesel Kapsama Alanı (CCA) tabanlı modelleme ile entegre çalışan; zaman hassasiyeti, kalan erişim süresi ve uçuş süresi gibi faktörleri birlikte değerlendiren çok parametrelili bir maliyet fonksiyonu geliştirilmiştir.
- İHA'nın her bir hedefi SC ile takip edebilmesi için hedef koordinatına doğrudan uçuşu yerine, dairesele kapsama modeli kullanılarak tek bir İHA'nın aynı anda birden fazla hedefi kapsayabilmesi sağlanmış; böylece daha az sayıda İHA ile SC görevi gerçekleştirilmiştir.
- GA'nın yerel optimuma erken yakınsamasını önlemek amacıyla, öncelikle CSA ile çok boyutlu çözümler üretilmiş; ardından bu çözümler arasından optimum olanı seçilerek GA'nın optimum hedeflere ulaşması sağlanmıştır. Bu sayede, tasarlanan C-CSA_{greedy} ile çözüm uzayında keşif (exploration) ve sömürü (exploitation) dengesi sağlanmıştır.

Makalenin geri kalan bölümleri aşağıdaki şekilde planlanmıştır: Bölüm 2'de literatür incelenmiştir. Bölüm 3'te PTC-TS probleminin matematiksel modeli sunularak kısıtlar tanımlanmıştır. Bölüm 4'te C-CSA_{greedy} yaklaşımının akış diyagramı verilmiş ve hibrit tasarımın ayrıntıları açıklanmıştır. Bölüm 5'te Monte Carlo simülasyonları ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular tartışılmıştır. Bölüm 6'da ise ulaşılan nihai sonuçlar sunulmuştur.

2. Literatür Çalışmaları (Literature Review)

İHA SC ile ilgili literatür çalışmaları, İHA'nın AoI'deki maksimum uçuş süresi, SC görev tamamlama süresi, hedeflerin zaman hassasiyeti veya hedef ağırlıkları gibi parametreler dikkate alınarak İHA süpürme yolunun planlanmasına odaklanmıştır. İHA SC ile yürütülen çalışmaların sınırlı olduğu ve bu çalışmaların, AoI'deki hedefler dikkate alınarak ağırlıklı hedef kapsama [9- 11, 16] ile zaman hassasiyetli hedef kapsama [12, 13, 17] konularına yoğunlaştığı görülmektedir.

Li vd. [9] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kalkış-iniş noktası üs koordinatı olmak üzere, İHA'nın maksimum uçuş süresi ve hedeflerin önemini gösteren ağırlık değerleri esas alınarak, çoklu İHA'nın görev süresi boyunca takip ettiği hedeflerde maksimum kapsama oranına ulaşılması amaçlanmıştır. Yazar, hem AoI'nin kapsama oranını hem de SC görev tamamlama süresi ölçütlerini dikkate alarak, senkronize ve asenkronize uçuş yapan çoklu İHA'lar ile deneysel çalışmalar yürütmüştür. Greedy hedef atama stratejisi (Greedy Target Assignment Strategy – GTAS) temel alınarak tasarlanan WTSC (Weighted Targets Sweep Coverage) algoritmasında, kıyaslanan algoritmalarla göre SC görev tamamlama süresinde %12, AoI'nin kapsama oranında ise %24'e kadar daha üstün performans elde edildiği gösterilmiştir.

Özdağ [10] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, senkronize uçan çoklu İHA'lar ile yürütülen deneysel çalışmada, ağırlıklı hedef kapsama probleminin İHA SC yöntemiyle çözümü için CSA ile birlikte GTAS'ı temel alan ve daha yüksek performans sağlayan WTSC-CSGA adlı yeni bir meta-sezgisel yaklaşım tasarlanmıştır. Yazar, iki farklı senaryo üzerinde yürütülen simülasyonlarda, takip

edilen hedeflerin kapsama oranı ölçütünü esas alarak minimum %4 ile maksimum %11 arasında daha iyi bir performans elde etmiştir.

Özdağ [11] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, WTSC-CSGA yaklaşımı için hem yeni bir amaç fonksiyonu tanımlanmış hem de her hedefin maliyet hesaplamasında α parametresi güncellenerek optimum SC oranlarına ulaşılmıştır. Çalışmada, farklı sayıda hedef içeren AoI'ler dikkate alınarak beş farklı senaryo gerçekleştirilmiş; böylece çoklu İHA'ların SC görev tamamlama süresi ve AoI kapsama oranı ölçütleri göz önüne alınarak, karşılaştırılan algoritmalarla göre maksimum %50'ye kadar daha üstün performans sağlandığı simülasyonlarla gösterilmiştir.

Özdağ [17] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, zaman hassasiyetli hedeflerin dikkate alındığı ve AoI'deki hedeflerin erişim süreleri içerisinde takip edilmesi gereken İHA SC probleminin çözümü için CSA ve GA tabanlı yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Son olarak, Özdağ [18] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, afet bölgesindeki zaman hassasiyetli kritik hedeflerin öncelikli olarak takip edilmesi amacıyla gerçek hayat modellemesi geliştirilmiştir. Yazar, İHA'ların kapsama yarıçapı içerisinde kapsanan birden fazla hedefin takibi için yeni bir hibrit yaklaşım tasarlamış ve çoklu İHA'ların süpürme yollarını minimum maliyetli hedef yolları esas alınarak optimize etmiştir.

Jia vd. [16] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, MTMC (Minimum Time and Maximum Coverage) probleminin çözümü için AoI'deki dağıtık hedefler için tanımlanan ağırlık değerleri dikkate alınarak, hem AoI'deki hedef sayısına hem de çoklu İHA sayısına bağlı olarak elde edilen SC görev tamamlama süreleri ve AoI kapsama oranları analiz edilmiştir. Yazar, asenkronize uçan çoklu İHA'lar ile yürüttüğü çalışmada, Karınca Kolonisi Optimizasyonu ve Greedy stratejisini temel alan bir İHA yol kapsama algoritması önermiştir. Literatürdeki algoritmalarla karşılaştırıldığında, önerilen algoritmanın SC görev tamamlama süresinde %2,8 oranında azalma ve kapsama oranında %4,4 oranında iyileşme sağladığı simülasyonlarla gösterilmiştir.

Wang [12] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, AoI'de tanımlanan zaman hassasiyetli dağıtık hedeflerin erişim süreleri içerisinde periyodik olarak takip edilmesini sağlamak amacıyla MEC-TS (Maximum Effective Coverage Rate in Time-Sensitive Sweep Coverage with Multiple UAVs) probleminin çözümü gerçekleştirilmiştir. Yazar, senkronize uçan İHA sürüsü ile yürüttüğü deneysel çalışmada, sınırlı sayıda İHA ve zaman hassasiyetli her hedefin erişim süresini dikkate alarak maksimum sayıda hedefin takibi için GCS (Greedy Cost Selection) adlı sezgisel yaklaşımı önermiş ve kıyaslanan algoritmalarla göre yaklaşık %30 oranında performans artışı sağladığını göstermiştir.

Wang vd. [13] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, AoI'deki zaman hassasiyetli dağıtık hedeflerin erişim sürelerine göre takip edilmesini sağlamak amacıyla TSCM (Time-Sensitive Sweep Coverage with Minimum UAVs) olarak adlandırılan problemin çözümü gerçekleştirilmiştir. Yazar, AoI'deki tüm hedeflerin takibi için GCS yöntemini [12] kullanarak SC görevini senkronize uçan minimum sayıda İHA ile tamamlamayı amaçlamıştır. İHA'ların farklı kapsama yarıçaplarına ve hedeflerin farklı erişim süresi aralıklarına göre tanımlanan senaryolarda, önerilen yöntemin diğer algoritmalarla kıyasla %14'e kadar performans iyileşmesi sağladığı simülasyonlarla gösterilmiştir.

İHA tabanlı SC problemleri, çoklu ajanlı görev atama, zaman kısıtlı planlama ve meta-sezgisel optimizasyon problemleri ile yakından ilişkilidir. Literatürde, çoklu İHA'lar arasında görev dağılımı ve rota planlama problemleri genellikle enerji, mesafe ve zaman kısıtları altında ele alınmaktadır. Bu kapsamda, görevlerin etkin bir şekilde

dağıtılması ve görev sürelerinin optimize edilmesi, çoklu İHA sistemlerinin performansını doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir [19, 20]. Ayrıca, zaman hassasiyetine sahip görevlerin önceliklendirilmesi, özellikle son teslim süresine (deadline) dayalı planlama yaklaşımlarında önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır. Bu tür problemler, görevlerin belirli zaman aralıkları içerisinde tamamlanmasını gerektirdiğinden, klasik kapsama yaklaşımlarına kıyasla daha karmaşık karar mekanizmaları gerektirmektedir [21]. Öte yandan, meta-sezgisel algoritmaların açgözlü stratejilerle hibrit olarak kullanılması, çözüm kalitesi ile hesaplama verimliliği arasında denge sağlamak amacıyla yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu hibrit yaklaşımlar, keşif ve sömürü süreçlerini dengeleyerek özellikle büyük ölçekli optimizasyon problemlerinde daha etkin çözümler sunmaktadır [22]. Bu bağlamda, söz konusu yaklaşımların sınırlılıkları; zaman hassasiyetine sahip kritik hedeflerin önceliklendirilmesi ve çoklu hedef kapsama gereksinimlerinin birlikte ele alınması açısından mevcut SC literatüründe önemli bir boşluk oluşturmaktadır.

2.1. Literatür boşluğu (Literature Gaps)

Literatürdeki İHA tabanlı SC çalışmaları incelendiğinde, hedeflerin çoğunlukla tekil olarak ele alındığı ve maliyet fonksiyonlarının genellikle statik veya sınırlı sayıda parametre ile tanımlandığı görülmektedir. Ağırlık tabanlı yaklaşımlarda hedef öncelikleri sabit veya yarı-sabit parametrelerle belirlenirken, zaman hassasiyetli çalışmalarda ise hedefler çoğunlukla yalnızca erişim sürelerine göre değerlendirilmektedir ve tüm hedefler aynı karar çerçevesi içerisinde ele alınmaktadır. Bu durum, özellikle zaman hassasiyetinin yüksek olduğu ortamlarda kritik hedeflerin diğer hedeflerden ayrıştırılarak öncelikli olarak ele alınmasını zorlaştırmaktadır.

CCA tabanlı modeller, bir İHA'nın kapsama yarıçapı içerisinde birden fazla hedefi aynı anda izleyebilmesine olanak tanıyarak önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ancak mevcut çalışmalarda bu model genellikle mesafe veya basit maliyet kriterleri ile birlikte kullanılmış olup, kritik hedeflerin doğrudan önceliklendirilmesine yönelik bir mekanizma sunmamaktadır. Dolayısıyla literatürde, hem çoklu hedef kapsamasını dikkate alan hem de kritik hedefleri açık bir şekilde önceliklendiren bütüncül bir karar mekanizmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu eksiklikleri gidermek amacıyla önerilen yaklaşım geliştirilmiş olup, literatürdeki ilgili çalışmalarla karşılaştırılması Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1'de sunulan karşılaştırma, önerilen yaklaşımın literatürdeki yöntemlerden hangi temel yönlerde ayrıştığını ve özgün katkılarını açık biçimde ortaya koymaktadır. Mevcut çalışmaların aksine, bu çalışmada CCA modeli kullanılarak bir İHA'nın kapsama yarıçapı

içerisinde birden fazla hedefi eş zamanlı olarak kapsamayı sağlanmıştır. Bununla birlikte, ϵ -tabanlı kritik hedef tanımı ile hedefler açık biçimde ayrıştırılmış ve karar sürecine entegre edilmiştir. Ayrıca, geliştirilen bileşik çok parametrelili maliyet fonksiyonu sayesinde zaman hassasiyeti, kalan erişim süresi ve uçuş süresi birlikte değerlendirilerek daha bütüncül ve dengeli bir karar mekanizması elde edilmiştir. Bu yapı, kritik hedeflerin öncelikli olarak takip edilmesini sağlarken aynı zamanda süpürme kapsamı görevinde verimliliğin korunmasına olanak tanımaktadır. Dolayısıyla önerilen yaklaşım, mevcut yöntemlerden farklı olarak kritik hedef önceliklendirme ile çoklu hedef kapsama yeteneklerini birlikte ele alan bütüncül ve daha etkin bir çözüm sunmaktadır.

Bununla birlikte, mevcut yol planlama yaklaşımlarında hedeflerin ziyaret sırası ve rota optimizasyonu çoğunlukla mesafe veya süre minimizasyonu odaklı ele alınmakta olup, zaman hassasiyeti yüksek kritik hedeflerin öncelikli olarak ziyaret edilmesini doğrudan garanti edememektedir. Bu durum, özellikle zaman kısıtlarının belirleyici olduğu senaryolarda kritik hedeflere geç ulaşılması veya bu hedeflerin gecikmeli olarak kapsanması gibi problemlere yol açabilmektedir [12, 13]. Dolayısıyla, hem hedef önceliklendirme hem de yol planlama sürecini bütüncül olarak ele alan yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu değerlendirmeler ışığında, önerilen yaklaşım, CCA tabanlı modelleme ile çoklu hedef kapsama yeteneğini, zaman hassasiyeti ve kalan erişim süresi gibi parametreleri içeren bileşik bir maliyet fonksiyonu ile entegre ederek literatürdeki mevcut yaklaşımlardan ayrışmaktadır. Bu yapı sayesinde kritik hedefler öncelikli olarak ele alınırken kapsama verimliliği korunmaktadır. Sonuç olarak, önerilen yöntem kritik hedef önceliklendirme ile çoklu hedef kapsama gereksinimlerini birlikte ele alan dengeli ve etkin bir çözüm sunmaktadır.

3. Problem Tanımı (Problem Definition)

Literatür incelendiğinde, MTMC [9, 11, 16], MEC-TS [12] ve TSCM [13] problemlerinin tanımlandığı ve bu kapsamda çoklu İHA'lar ile AoI'deki hedeflerin SC ile takibinin gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu problemler, iyi bilinen Gezgin Satıcı Problemi'nin bir uzantısı olarak NP-hard (Non-deterministic Polynomial-time hard) sınıfında yer almaktadır. Dolayısıyla, MTMC, MEC-TS ve TSCM problemlerine benzer şekilde, bu çalışmada AoI'deki hedeflerin takibinde çoklu İHA'lar ile SC görevinin yürütülmesini esas alan PTC-TS problemi de NP-hard olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 1'de gösterildiği üzere, PTC-TS probleminin çözümünde, AoI'deki zaman hassasiyetli hedeflerin erişim süreleri dikkate alınarak çoklu İHA'lar ile SC kapsamında hedef takibi gerçekleştirilmektedir. Senkronize

Tablo 1. Önerilen yöntemin literatürdeki ilgili çalışmalarla karşılaştırılması
(Comparison of the proposed method with relevant studies in the literature)

Özellik	[9]	[11]	[12]	[17]	[13]	Önerilen Çalışma
SC yaklaşımı	Ağırlık tabanlı	Ağırlık tabanlı	Zaman hassasiyetli	Zaman hassasiyetli	Zaman hassasiyetli	Zaman hassasiyetli
Kapsama modeli	Hedef tabanlı	Hedef tabanlı	Hedef tabanlı	Hedef tabanlı	CCA	CCA
Öncelik mekanizması	Hedef ağırlığı	Hedef ağırlığı	Erişim süresi (deadline)	Erişim süresi (deadline)	Erişim süresi (deadline)	ϵ -tabanlı kritik hedef önceliği
Kritik hedef önceliklendirme	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var (ϵ -tabanlı)
Maliyet fonksiyonu	Mesafe+ağırlık tabanlı (lineer)	Mesafe+ağırlık tabanlı (lineer)	Kalan süre tabanlı	Kalan süre tabanlı	Kalan süre tabanlı	Bileşik çok parametrelili
Optimizasyon yaklaşımı	Sezgisel	CSA tabanlı	Greedy tabanlı	CSA+Greedy	Greedy tabanlı	CSA+Greedy
Performans hedefi	Ağırlık tabanlı kapsama oranı	Ağırlık tabanlı kapsama oranı	Süre tabanlı kapsama oranı	Süre tabanlı kapsama oranı	CCA tabanlı kapsama oranı	Kritik hedef öncelikli kapsama oranı

uçan her bir İHA, AoI'de takip ettiği hedeflerde maksimum uçuş süresini esas alarak SC görevini tamamlamakta ve üs koordinatına geri dönmektedir. Klasik yöntemlerde olduğu gibi, sınırlı batarya kapasitesine sahip tek bir İHA ile tüm hedeflerin takip edilmesi mümkün olmadığından, PTC-TS probleminin çözümünde verimli bir SC yol planlaması gerçekleştirmek amacıyla erişim süresi daha kısa olan kritik hedeflere öncelik verilmektedir.

3.1. Hedef Dağıtım Ortamı (Target Distribution Environment)

Bu çalışmada, zaman hassasiyetli hedeflerin AoI'de rastgele dağıldığı ve tanımlanan aralığa göre her hedefin erişim süresinin rastgele atandığı varsayılmıştır. Aşağıdaki kısıtlar dikkate alınarak İHA SC görev tanımlaması yapılmıştır:

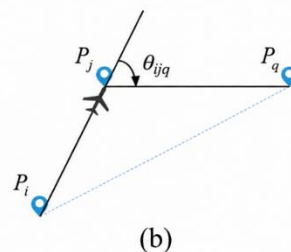
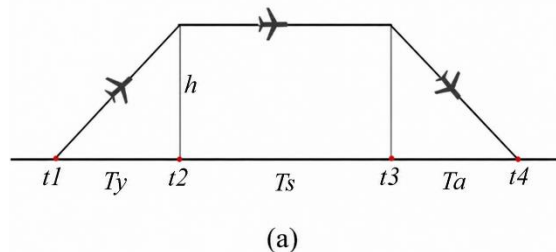
- AoI'deki her hedefin takibi en fazla bir İHA tarafından gerçekleştirilmelidir.
- SC görevi için çoklu İHA'lar senkronize uçuş gerçekleştirmelidir.
- AoI'deki üs koordinatına göre çoklu İHA'lar kalkış ve iniş yapmalıdır.
- SC görevi, yalnızca AoI'deki statik hedefler dikkate alınarak yürütülmelidir.
- AoI'deki hedeflerin rastgele dağıtımında iki boyutlu (2D) çözüm uzayı esas alınmalıdır.
- İHA'ya en uzak mesafedeki herhangi bir hedef için, maksimum uçuş süresi dikkate alınarak bu hedefin erişim süresi tanımlanmalıdır.

3.2. İHA Uçuş Modellemesi (UAV Flight Modeling)

İHA, AoI'de hem doğrusal (linear) hem de doğrusal olmayan (non-linear) uçuşlar gerçekleştirerek hedefler üzerinde SC görevini yürütür. $P = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ olmak üzere N adet statik hedefin AoI'de rastgele dağıldığı ve $U = \{U_1, U_2, \dots, U_M\}$ olmak üzere M adet İHA'nın P hedef kümesinin SC ile takibini gerçekleştirdiği varsayılmıştır. Ayrıca, her İHA'nın üs koordinatı P^0 'dan kalkış yaptığı ve SC görevini tamamladıktan sonra P^0 'a geri döndüğü kabul edilmiştir (Şekil 1).

Bu varsayımlara göre, yükselme evresi (T_y), seyir evresi (T_s) ve alçalma evresi (T_a) olmak üzere üç farklı zaman periyodu esas alınarak her İHA ile SC gerçekleştirilmektedir [12]. P^0 'dan kalkış yapan İHA, t_1 anından t_2 anına kadar h irtifasına yükselerek yükselme evresini; t_2 'den t_3 'e kadar SC görevini yürüterek seyir evresini; t_3 'ten t_4 'e kadar iniş yaparak alçalma evresini tamamlamakta ve böylece P^0 'a dönmektedir (Şekil 2a).

İHA, seyir evresinde SC görevini yürütürken, P_i (i 'nci hedef) ile P_j (j 'nci hedef) arasında V doğrusal hız sabitine bağlı olarak doğrusal bir uçuş gerçekleştirmektedir. Buna karşılık, P_j ile P_q (q 'ncü hedef) arasında ise w açısal hız sabitine bağlı olarak θ_{ijq} açılı doğrusal olmayan bir dönüş uçuşu gerçekleştirilmektedir (Şekil 2b). İHA uçuş modellemesi için esas alınan tanımlar aşağıda sunulmuştur [12]:



Şekil 2. İHA ile SC yaklaşımı için (a) uçuş evreleri, (b) hedefler arasındaki doğrusal ve doğrusal olmayan uçuşlar (UAV-based SC framework: (a) flight phases, (b) linear and nonlinear trajectories between targets)

3.2.1. Tanım 1: SC görev süresi (Definition 1: SC mission duration)

İHA'nın kalkış yaptığı t_1 anından alçalmaya başladığı t_3 anına kadar geçen süre, hedefler üzerindeki İHA uçuş süresi esas alınarak SC görev süresi Eş. 1'deki gibi hesaplanır. Bu sürenin, İHA'nın havada kalma dayanıklılığını ifade eden ve maksimum uçuş süresi olarak tanımlanan T^{max} değerinden küçük veya eşit olması gerekmektedir.

$$T_y + T_s \leq T^{max} \quad (1)$$

3.2.2. Tanım 2: öklid uçuş mesafesi (Definition 2: euclidean flight distance)

Şekil 2b'ye göre, İHA'nın P_i ve P_j hedefleri arasında doğrusal bir uçuş gerçekleştirmesi durumunda, uçuş mesafesi d_{ij} Öklid bağıntısı kullanılarak Eş. 2'deki gibi hesaplanır.

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (2)$$

Eş. 2'de x ve y , sırasıyla P_i ve P_j hedeflerinin 2D düzlemdeki koordinatlarını ifade etmektedir.

3.2.3. Tanım 3: İHA dönüş açısı (Definition 3: UAV turning angle)

Şekil 2b'ye göre, İHA'nın P_j 'den P_q 'ya doğrusal olmayan bir uçuş gerçekleştirmesi durumunda, uçuş süresine ek olarak dönüş süresi de modele dâhil edilmelidir. Dolayısıyla, Eş. 1'de verilen SC görev süresi dikkate alındığında, dönüş açısı θ_{ijq} ile rotasını değiştiren İHA'nın dönüş süresi de hesaplanmalıdır. Bu sürenin hesaplanabilmesi için kosinüs yasası [9] kullanılarak dönüş açısı θ_{ijq} Eş. 3' deki gibi hesaplanır.

$$\theta_{ijq} = \pi - \arccos(d_{ij}^2 + d_{jq}^2 - d_{iq}^2) / (2 d_{ij} d_{jq}), \forall i, j, q \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3)$$

Eş. 3'te, matematikte evrensel olarak kullanılan π sabiti yaklaşık olarak 3,14 alınmıştır.

3.2.4. Tanım 4: İHA dönüş süresi (Definition 4: UAV turning duration)

Şekil 2b'ye göre, İHA'nın P_j ve P_q hedefleri arasındaki doğrusal olmayan uçuş süresi t_{jq} iki aşamada hesaplanır. Eş. 4'e göre birinci aşamada, θ_{ijq} açısı ve açısal hız sabiti w kullanılarak İHA'nın dönüş süresi hesaplanır; ikinci aşamada ise d_{iq} mesafesi ve doğrusal hız sabiti V dikkate alınarak İHA'nın doğrusal uçuş süresi belirlenir [9]. Dolayısıyla, P_j ile P_q hedefleri arasındaki toplam uçuş süresi hesaplanırken doğrusal uçuş süresi de modele dâhil edilmektedir.

$$t_{jq} = (\theta_{ijq} / w) + (d_{iq} / V), \forall i, j, q \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4)$$

Bu modelleme ile İHA'nın hedefler arasındaki hareketi yalnızca doğrusal mesafe üzerinden değil, dönüş açısı ve açısal hız gibi

kinematik kısıtlar da dikkate alınarak temsil edilmektedir. Bu sayede, dönüş manevralarının ihmal edilmesinden kaynaklanabilecek uçuş süresi eksik tahminleri azaltılmakta ve zaman hassasiyetli hedeflerin planlanmasında daha gerçekçi süre hesaplamaları elde edilmektedir.

3.2.5. Tanım 5: hedef erişim süresi (Definition 5: target access duration)

$i \in \{1, 2, \dots, N\}$ olmak üzere, $Ts_i = \{Ts_1, Ts_2, \dots, Ts_N\}$ kümesi esas alınarak her i 'nci hedef için erişim süresi tanımlanmıştır. AoI'deki zaman hassasiyetli tüm hedeflerin erişim süreleri dikkate alındığında, herhangi bir hedefin takip edilebilmesi için ilgili hedefin İHA SC ile erişim süresi içerisinde ziyaret edilmesi gerekmektedir. Aksi durumda, yani İHA'nın hedefe ulaşma süresi hedefin erişim süresini aşarsa, ilgili hedef SC ile takip edilemez. Dolayısıyla, hedefin takip edilememesi PTC-TS probleminin çözümünde dikkate alınması gereken önemli bir kısıttır.

PTC-TS problemine göre, Ts_i değerinin tanımlanan eşik değerin altında olması, i 'nci hedefin kritik olduğunu ve öncelikli olarak takip edilmesi gerektiğini; Ts_i 'nin eşik değerin üzerinde olması ise hedefin kritik olmadığını ve dolayısıyla öncelikli takibinin gerekli olmadığını göstermektedir.

3.2.6. Tanım 6: İHA kapsama yarıçapı

(Definition 6: UAV coverage radius)

Ortamdaki kablosuz iletişim kapsama oranını artırmak veya nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde karasal baz istasyonlarını desteklemek ve AoI'de daha yüksek veri trafiği sağlamak amacıyla, İHA'lara mobil baz istasyonlarının entegre edilmesiyle kablosuz iletişim kapsama alanının genişletilmesi mümkündür. İHA'lar maksimum irtifada uçuş gerçekleştirirken, yeryüzünde maksimum tarama yarıçapı R_{max} [23] olan CCA'lar oluştururlar.

İHA'ya entegre edilen mobil baz istasyonunun çıkış gücü ve İHA'nın irtifası, R_{max} 'ta değişimlere neden olabilmektedir. Tanımlanan PTC-TS problemine göre, her hedefin en fazla bir İHA tarafından kapsanması gerektiği kısıtı dikkate alındığında, tek bir İHA'nın R_{max} mesafesi içinde kapsayabildiği birden fazla hedefin SC ile takibi mümkün olabilmektedir. Dolayısıyla, literatürdeki [9, 11, 12] çalışmalarında olduğu gibi her hedefin tek bir İHA tarafından takip edilmesi yerine, bu çalışmada CCA esas alınarak çoklu hedeflerin tek bir İHA tarafından senkronize biçimde takibine odaklanılmıştır. Bu sayede, zaman hassasiyetli dağıntık hedeflerin verimli takibi için daha az sayıda İHA kullanımı mümkün hâle gelmektedir.

3.3. PTC-TS Problemi Kısıtları (PTC-TS Problem Constraints)

$k \in \{1, 2, \dots, M\}$ olmak üzere, M adet İHA'dan her bir k 'nci İHA ($\forall U_k$) için SC görevi yürütülürken, optimum hedef tespiti Eş. 5'te tanımlanan minimum maliyet fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. $\forall U_k$ tarafından SC görevinin yürütülmesi sırasında, Eş. 6–8'de tanımlanan kısıtlar dikkate alınmıştır [9, 11–13].

$$\min f(x) \quad (5)$$

$$T_i(k) = T_y + T_s \leq Ts_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}, \forall k \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (6)$$

$$T^{total}(k) = T_y + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N t_{Sij}(k) t_{ij} \leq T_{max}, \forall k \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^M t_{Si}(k) = 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (8)$$

Eş. 6'da $T_i(k)$, U_k 'nın P_i 'yi takip etmesi durumunda kümülatif uçuş süresini temsil ederken; Eş. 7'deki $T^{total}(k)$, U_k 'nın SC görevini tamamlayarak P^0 'a geri dönmesi durumundaki AoI'deki toplam uçuş

süresini göstermektedir. $t_{Sij}(k)$, U_k 'nın P_i 'den başlayarak P_j 'yi takip etmesi durumunu (tracking status) ifade ederken; Eş. 8'deki $t_{Si}(k)$ ise U_k 'nın yalnızca P_i 'yi takip etmesi durumunu temsil etmektedir. Dolayısıyla, $\forall U_k$ için ilgili hedefin takip edilip edilmediğine bağlı olarak 1 veya 0 değerleri atanmıştır. PTC-TS probleminin çözümünde, $\forall U_k$ tarafından P_i 'nin takip edilebilmesi için Eş. 6–8'de tanımlanan üç kısıtın birlikte sağlanması gerekmektedir.

4. Yöntem (Methodology)

Bu çalışmada, PTC-TS probleminin çözümü için meta-sezgisel CSA ve sezgisel GA'ya dayalı yeni bir hibrit algoritma geliştirilmiştir. Bu bölümde, önerilen C-CSA *greedy* yaklaşımı akış diyagramı aracılığıyla ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

4.1. Karga Arama Algoritması (Crow Search Algorithm)

CSA, kargaların yiyeceklerini saklama, hatırlama ve diğer bireylerin davranışlarını takip etme özelliklerinden esinlenen bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır [14]. CSA'da her birey bir aday çözümü temsil etmekte ve iyi çözümler hafıza mekanizması aracılığıyla korunmaktadır. Algoritma, keşif ve sömürü süreçlerini dengeleyerek çözüm uzayında daha iyi çözümlerin aranmasını sağlamaktadır. CSA'nın temel parametreleri, yeni çözüm bölgelerinin araştırılma olasılığını belirleyen Farkındalık Olasılığı (Awareness Probability – AP) ve çözüm uzayındaki hareket adımını belirleyen Uçuş Uzunluğu (Flight Length – FL) değerleridir. Bu çalışmada CSA, CCA çözüm uzayının optimizasyonunda kullanılmakta ve elde edilen aday çözümler C-CSA *greedy* yaklaşımının sonraki aşamasında değerlendirilmektedir.

4.2. Açgözlü Algoritması (Greedy Algorithm)

GA, her adımda mevcut çözüm kümesi içerisinde en düşük maliyetli seçeneği belirleyerek çözümü kademeli olarak oluşturan sezgisel bir optimizasyon yaklaşımıdır. Düşük hesaplama karmaşıklığı sayesinde pratik optimizasyon problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada GA, CSA tarafından oluşturulan aday CCA çözüm kümesinden seçim yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Her iterasyonda maliyet fonksiyonu en düşük olan aday CCA seçilerek çoklu İHA'ların takip edeceği hedefler kademeli olarak belirlenmektedir.

4.3. C-CSA *greedy* ile Problemin Modellemesi (Problem Modeling with C-CSA *greedy*)

Bu bölümde, PTC-TS probleminin çözümü için geliştirilen C-CSA *greedy* yaklaşımı, iki aşamalı bir modelleme çerçevesinde sunulmaktadır.

4.3.1. Dairesel kapsama alanı modeli (Circular coverage area model)

Önceki çalışmalarda, İHA'ların hedefleri tek tek takip ettiği ve SC kapsamında 2D koordinatlara dayalı rota planlamasının kullanıldığı görülmektedir [9–12, 16]. Bu yaklaşım, tüm hedeflerin takibi için daha fazla İHA gerektirebilmektedir. Bu çalışmada ise daha az sayıda İHA ile etkin kapsama sağlamak amacıyla, İHA'nın yeryüzünde oluşturduğu Dairesel Kapsama Alanı (Circular Coverage Area – CCA) modeli kullanılmıştır.

CCA modelinde İHA'nın her bir hedefin merkezine ayrı ayrı yönelmesi yerine, birden fazla hedefi aynı anda kapsayabilen CCA merkezine yönelmesi esas alınmaktadır [13, 18]. Böylece tek bir CCA içerisinde bulunan birden fazla hedefin eşzamanlı olarak izlenmesi ve AoI'deki hedeflerin daha az sayıda İHA ile takip edilmesi sağlanmaktadır. PTC-TS probleminde ayrıca her hedefin en fazla bir

CCA tarafından takip edilmesi ve kritik hedeflerin erişim sürelerine göre önceliklendirilmesi dikkate alınmaktadır.

Şekil 4(a)'da, 3×3 grid yapısından oluşan temsili bir AoI ve her grid'i kapsayacak şekilde yerleştirilen, yarıçapı R olan CCA'lar gösterilmektedir. Bir CCA'nın yalnızca bir grid'i kapsayabilmesi için grid kenar uzunluğu ile CCA yarıçapı arasında $D \leq \sqrt{2}R$ koşulu sağlanmaktadır. Şekil 4(b)'de ise AoI'deki tüm hedefleri kapsayan minimum CCA kümesi gösterilmektedir. PTC-TS probleminde her hedefin en fazla bir CCA tarafından takip edilmesi kısıtı dikkate alınarak, tüm hedeflerin minimum sayıda CCA ile kapsanması amaçlanmaktadır.

4.3.2. Uygunluk fonksiyonu modeli (fitness function model)

Bu aşamada, minimum CCA sayısı dikkate alınarak kritik CCA'ların öncelikli seçimini sağlamak amacıyla uygunluk fonksiyonu $f(x)$ geliştirilmiştir. Her bir CCA için uygunluk değeri, erişim süresi, kalan erişim zamanı ve uçuş süresini birlikte dikkate alan çok parametrelili bir maliyet fonksiyonu ile hesaplanmaktadır. Kalan erişim zamanı Eş. 9'da, CCA'nın zaman öncelik değeri Eş. 10'da, normalize edilmiş uçuş süresi Eş. 11'de ve maliyet fonksiyonu Eş. 12'de tanımlanmaktadır.

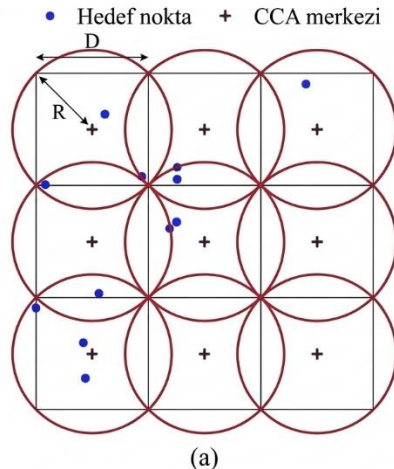
$$\varepsilon_{i+1} = T_{Si} - T_i(k), i \in \{1, 2, \dots, \chi\}, k \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (9)$$

$$\psi = (\alpha(L_{Ts} - T_{Si}) + (1 - \alpha)(1 / \varepsilon_{i+1}))^\gamma, \alpha \in [0, 1], \gamma \in [0, 3] \quad (10)$$

$$T^{norm} = t_i / T^{max} \quad (11)$$

$$f(x) = T^{norm} / \psi \quad (12)$$

Burada χ , seçilen minimum CCA sayısını, ε_{i+1} bir sonraki CCA için kalan erişim zamanını, L_{Ts} hedef kümesi için tanımlanan erişim süresinin üst sınırını ve t_i İHA'nın ilgili CCA'ya uçuş süresini ifade etmektedir. α ve γ , sırasıyla erişim süresi ile kalan erişim zamanı arasındaki dengeyi ve zaman önceliğinin maliyet üzerindeki etkisini belirleyen parametrelerdir. $\alpha \in [0, 1]$ ve $\gamma \in [0, 3]$ aralıklarında, uygunluk fonksiyonu düşük erişim süresine ve sınırlı kalan erişim zamanına sahip kritik CCA'lara daha yüksek öncelik verecek şekilde hesaplanmaktadır. Böylece, uçuş süresi ve zaman önceliği birlikte değerlendirilerek uygun maliyetli CCA'ların seçilmesi sağlanmaktadır.



4.4. C-CSA greedy Yaklaşımı (C-CSA greedy Approach)

Bu çalışmada, PTC-TS probleminin çözümü için kritik hedeflerin öncelikli olarak takip edilmesini ve çoklu İHA'lar ile etkin SC yol planlamasını sağlayan C-CSA greedy yaklaşımı geliştirilmiştir. Yaklaşım, CCA çözüm uzayının CSA ile optimize edilmesi ve aday CCA'lar arasından en düşük maliyetli seçeneklerin Greedy yaklaşımı ile seçilmesi esasına dayanmaktadır. Genel algoritmik süreç aşağıdaki dört adımda gerçekleştirilmektedir.

Adım 1 — Ön işleme: Monte Carlo simülasyonları için AoI, İHA ve SC parametreleri tanımlanır. Ayrıca, CCA modeline uygun grid yapısı oluşturularak hedeflerin erişim süreleri belirlenir.

Adım 2 — Başlangıç çözümünün oluşturulması: Her simülasyonda hedef kümesi oluşturulur ve CCA modeli ile elde edilen aday CCA'lar kullanılarak başlangıç çözüm uzayı oluşturulur. Her aday CCA için uygunluk değeri, Bölüm 4.3.2'de tanımlanan maliyet fonksiyonuna göre hesaplanır. Greedy seçim mekanizması ile toplam maliyeti en düşük çözüm belirlenir.

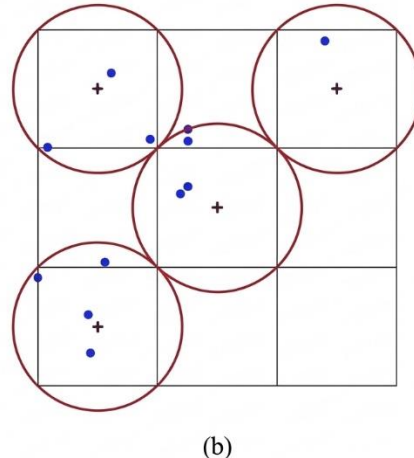
Adım 3 — CSA tabanlı optimizasyon: CSA iterasyonları boyunca çözüm uzayı güncellenerek CCA seçimleri yeniden değerlendirilir. Her iterasyonda yeni çözümün toplam maliyeti mevcut en iyi çözüm ile karşılaştırılır ve daha iyi olması durumunda optimum çözüm güncellenir. Bu süreç maksimum iterasyon sayısına ulaşınca kadar sürdürülür.

Adım 4 — UAV yol planlaması: Son iterasyonda elde edilen optimum CCA çözümü esas alınarak her İHA için takip edilecek CCA'lar belirlenir ve SC yol planı oluşturulur. Her atama sonrasında takip edilen CCA'lar kalan aday kümesinden çıkarılarak diğer İHA'ların aynı CCA'yı tekrar seçmesi engellenir.

Böylece C-CSA greedy, CSA'nın küresel çözüm arama yeteneğini Greedy yaklaşımının düşük maliyetli CCA seçim mekanizması ile birleştirerek kritik hedeflerin öncelikli ve zaman kısıtlarına uygun biçimde takip edilmesini sağlamaktadır.

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu bölümde, önerilen C-CSA greedy yaklaşımının performansı, GA ile karşılaştırmalı olarak MATLAB ortamında gerçekleştirilen bağımsız Monte Carlo simülasyonları üzerinden değerlendirilmiştir.



Şekil 3. AoI için (a) başlangıç CCA kümesi ve (b) tüm hedefleri kapsayan minimum CCA kümesi
((a) Initial CCA set for the AoI and (b) minimum CCA set covering all targets)

Deneysel çalışmalarda, performans ölçütleri bölümünde tanımlanan birinci ve ikinci ölçütler esas alınmış; bu ölçütler hem tüm simülasyonlar hem de optimum simülasyon sonuçları üzerinden analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve tartışılmıştır.

5.1. Simülasyon Parametreleri (Simulation Parameters)

Bu bölümde, C-CSA *greedy* yaklaşımının performansını değerlendirmek amacıyla bağımsız Monte Carlo simülasyonlarına dayalı bir senaryo oluşturulmuştur. Her simülasyonda hedef kümesi P 'nin konumlandırılması için grid tabanlı modelleme kullanılmış ve grid kenar uzunluğu $D = 1000$ m olarak belirlenmiştir.

Şekil 4'te gösterilen AoI modeline göre, her grid'in bir CCA tarafından kapsanabilmesi için yarıçapı $R = 1000$ m olan CCA'lar kullanılmış ve $D \leq \sqrt{2}R$ koşulu dikkate alınmıştır. $D = 1000$ m için minimum CCA yarıçapı $R = 707,10$ m olarak hesaplanmıştır. AoI boyutları $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ olup toplam alan 2500 km^2 'dir. AoI'deki tüm grid'leri kapsayan başlangıç CCA sayısı 2500 olarak belirlenmiş ve 2500 döngülik geniş bir alan üzerinde çoklu İHA senaryosu modellenmiştir.

P kümesindeki hedef sayısı $N = 50$ olup her hedefin erişim süresi $T_{si} \in [50, 140]$ min aralığındadır. SC görevi kapsamında İHA'nın maksimum uçuş süresi $T^{max} = 150$ min, yükselme süresi $T_y = 5$ min ve seyir hızı $V = 90 \text{ km/h}$ olarak alınmıştır. Minimum dönüş yarıçapı 100 m olup buna karşılık gelen açısız dönüş hızı $w = 0,1 \text{ rad/s}$ olarak belirlenmiştir.

Simülasyonlarda maksimum simülasyon sayısı $sim^{MAX} = 50$ ve maksimum iterasyon sayısı $iter^{MAX} = 100$ olarak seçilmiştir. $\alpha = 0,5$ ve $\gamma = 2$ olarak belirlenmiştir. CSA parametreleri için sürü büyüklüğü

$K=100$, uçuş uzunluğu $FL=1$ m ve farkındalık olasılığı $AP=0,05$ alınmıştır. Problem boyutu, P kümesindeki hedef sayısına bağlı olarak belirlenmiştir. İHA'nın başlangıç koordinatı, acil durumlarda daha etkin uçuş sağlamak amacıyla AoI'nin sol alt köşesi olarak seçilmiştir.

5.2. Minimum Sayıdaki CCA'ların Seçimi (Selection of the Minimum Number of CCAs)

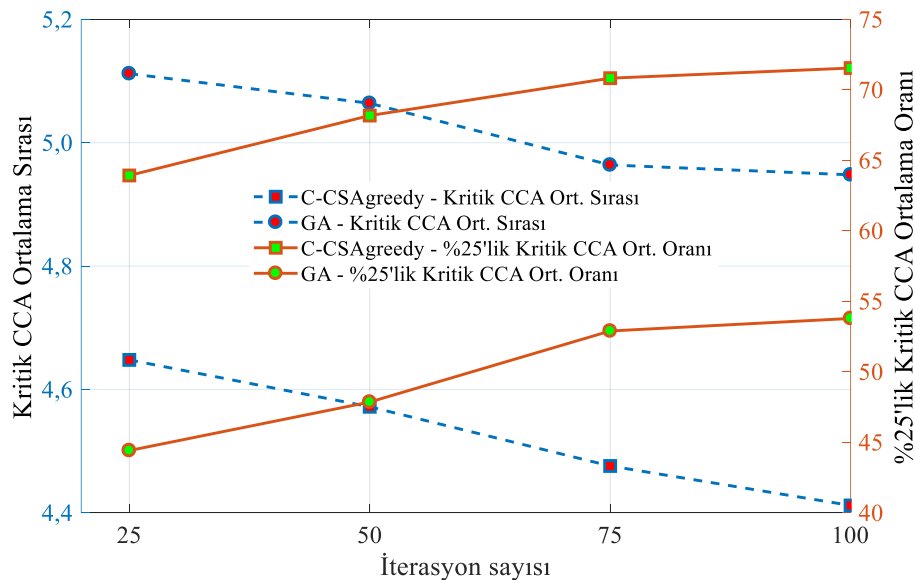
$N = 50$ için gerçekleştirilen bağımsız simülasyonlarda, P kümesindeki hedefleri kapsayan minimum CCA sayısı 48 olarak belirlenmiştir. CCA modelinde bir CCA'nın birden fazla hedefi kapsayabilmesi nedeniyle, hedef sayısı ile seçilen CCA sayısının birebir eşleşmesi gerekmektedir. Ayrıca, bir CCA'nın erişim süresi, kapsadığı hedefler arasındaki minimum erişim süresine göre belirlenerek kritik hedeflerin öncelikli olarak takip edilmesi sağlanmaktadır. Algoritmaların eşit koşullarda karşılaştırılabilmesi amacıyla, C-CSA *greedy* ve GA için aynı hedef kümesi P kullanılmıştır. Böylece her iki yöntemin performansı aynı hedef ve erişim süresi koşulları altında karşılaştırılmıştır.

5.3. CCA için Eşik Erişim Süresi (Threshold Access Time for CCA)

P kümesindeki zaman hassasiyetli hedeflerin erişim süreleri her simülasyonda $[50, 140]$ min aralığında rastgele belirlenmiştir. Erişim süresi düşük olan hedefler daha yüksek öncelikli kabul edilerek kritik hedeflerin belirlenmesinde erişim süresi esas alınmıştır. Simülasyonlarda hedeflerin ortalama erişim süresi 94 min olarak hesaplanmıştır. Bu değer ve $[50, 140]$ min aralığı dikkate alınarak eşik erişim süresi 80 min olarak belirlenmiştir. Buna göre $T_{si} \leq 80$ min olan hedefler ve bunları kapsayan CCA'lar kritik olarak sınıflandırılmış ve uygunluk fonksiyonu kritik CCA'lara daha yüksek öncelik verecek şekilde uygulanmıştır.

Tablo 2. Tüm simülasyonlar esas alınarak birinci ve ikinci ölçüt ortalamalarına göre algoritmaların performans karşılaştırması
(Performance comparison of the algorithms based on the averages of the first and second metrics across all simulations)

	C-CSA <i>greedy</i>	GA	C-CSA <i>greedy</i>	GA	C-CSA <i>greedy</i>	GA	C-CSA <i>greedy</i>	GA
$iter^{MAX}$	25	-	50	-	75	-	100	-
CCA_tümKritik(ort-sıra)	5,12	6,28	4,93	6,16	4,69	5,91	4,53	5,87
CCA_%25Kritik(ort-sayı)	8,62	5,92	9,34	6,50	9,58	7,14	9,78	7,22
CCA_%25Kritik(ort-oran)	63,93	44,42	68,18	47,86	70,83	52,90	71,55	53,79



Şekil 4. Kritik CCA'ların ortalama takip sırası ve ilk çeyrekteki kapsama oranına göre algoritma performansı
(Algorithm performance based on the average tracking order of critical CCAs and the coverage rate in the first quartile)

5.4. Performans Ölçütleri (Performance Metrics)

Bu çalışmada, C-CSA*greedy* yaklaşımı ile GA'nın performansını karşılaştırmak amacıyla iki performans ölçütü kullanılmıştır. Birinci ölçüt, çoklu İHA'lar tarafından takip edilen tüm kritik CCA'ların ortalama ziyaret sırasını gösteren CCA_tümKritik(ort-sıra) değeridir. İkinci ölçüt, takip sürecinin ilk %25'lik dilimindeki kritik CCA'ların ortalama sayısını CCA_%25Kritik(ort-sayı) ve ortalama oranını CCA_%25Kritik(ort-oran) ile ifade etmektedir.

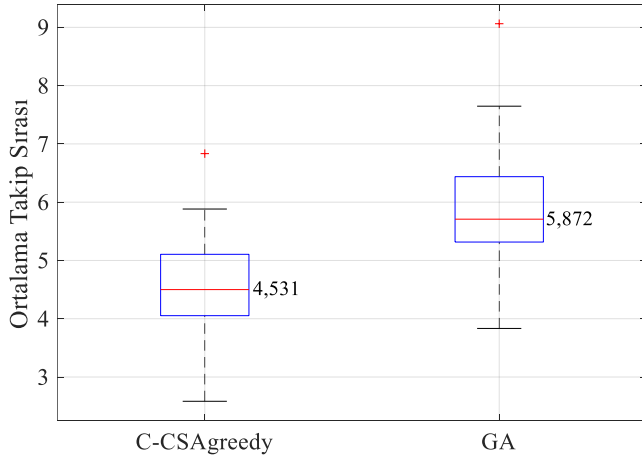
Optimizasyon sürecinde birinci ölçüt minimize edilmekte, ikinci ölçüte ait ortalama sayı ve oran ise maksimize edilmektedir. Böylece kritik CCA'ların mümkün olduğunca erken takip edilmesi ve takip sürecinin ilk %25'lik bölümünde daha yüksek sayıda kritik CCA'nın kapsanması hedeflenmektedir. Tanımlanan ölçütler, C-CSA*greedy* ve GA'nın zaman hassasiyetli kritik hedefleri önceliklendirme ve erken aşamada kapsama performanslarını aynı koşullar altında nicel olarak karşılaştırmak amacıyla kullanılmaktadır.

5.5. Senaryo Çalışması (Scenario Study)

Bu çalışmada, $N = 50$ için C-CSA*greedy* yaklaşımının performansını değerlendirmek amacıyla 25, 50, 75 ve 100 iterasyondan oluşan ve her biri 50 Monte Carlo simülasyonu içeren bir senaryo oluşturulmuştur. Elde edilen birinci ve ikinci performans ölçütlerinin ortalama değerlerine göre algoritmaların karşılaştırması Tablo 2 ve Şekil 4'de sunulmuştur.

5.5.1. Tüm simülasyonlara göre birinci ölçüt analizi (Analysis of the first metric in the all simulations)

Bu senaryoda, C-CSA*greedy* ve GA algoritmalarının tüm simülasyonlardaki kritik CCA'ların ortalama takip sıraları analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 5'de kutu grafiği ile sunulmuştur.



Şekil 5. Tüm simülasyonlarda kritik CCA'ların ortalama takip sıralarının dağılımını gösteren kutu grafiği
(Box plot showing the distribution of the average tracking order of critical CCAs across all simulations)

C-CSA*greedy* için ortalama takip sırası 4,531, GA için ise 5,782 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, C-CSA*greedy*'nin kritik CCA'ları daha erken takip ettiğini göstermektedir. Kutu grafiğinde C-CSA*greedy*'nin çeyrekler arası aralığının GA'ya göre daha dar olması, takip sırasının daha düşük değişkenlik gösterdiğini ve yöntemin daha kararlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca C-CSA*greedy*'nin daha düşük medyan değeri, kritik CCA'ların daha erken takip edildiğini desteklemektedir. Her iki yöntemde aykırı değerler görülmekle birlikte, GA'da daha yüksek ve daha geniş

yayılımlı aykırı değerlerin bulunması, sonuçların daha değişken olduğunu göstermektedir. Genel olarak, bulgular C-CSA*greedy*'nin kritik hedefleri daha erken ve daha istikrarlı biçimde takip ettiğini ortaya koymaktadır.

5.5.2. Optimum simülasyona göre birinci ölçüt analizi (Analysis of the first metric in the optimum simulation)

Bu analizde, ikinci performans ölçütüne göre belirlenen optimum simülasyondaki CCA dağılımları dikkate alınarak, her bir İHA'nın kritik CCA'ları takip sırası incelenmiş ve sonuçlar Şekil 6'da kutu grafiği ile sunulmuştur. Grafiklerde, C-CSA*greedy* yaklaşımında İHA'ların kritik CCA'ları genel olarak daha düşük takip sıralarında izlediği görülmektedir. Özellikle İHA-1, İHA-2 ve İHA-4 için takip sıralarının GA'ya göre daha düşük olması, kritik hedeflerin daha erken kapsandığını göstermektedir. Her iki algoritmada da bazı İHA'larda medyan değerin 1 olması, bu İHA'ların yalnızca bir kritik CCA takip ettiğini göstermektedir. Ortalama takip sırası dikkate alındığında, C-CSA*greedy*'nin GA'ya göre daha düşük bir değer elde ettiği görülmektedir.

Ayrıca C-CSA*greedy*'de çeyrekler arası aralığın daha dar olması, takip sırasının daha düşük değişkenlik gösterdiğini ve yöntemin daha kararlı olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, GA'daki daha geniş dağılım takip sırasındaki değişkenliğin daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Genel olarak, C-CSA*greedy* optimum simülasyonda kritik CCA'ların daha erken ve daha kararlı şekilde takip edilmesini sağlamaktadır.

5.5.3. Optimum simülasyona göre ikinci ölçüt analizi (Analysis of the second metric in the optimum simulation)

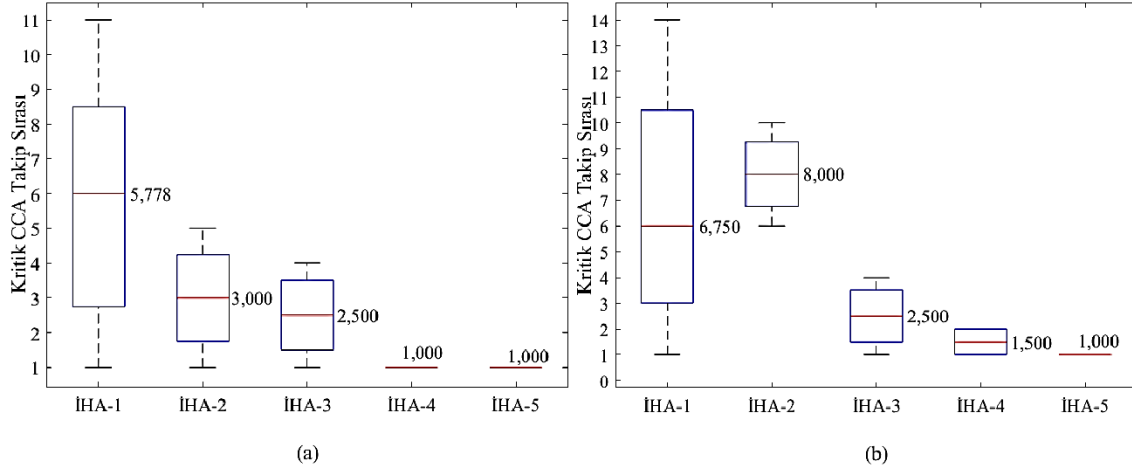
Bu bölümde, ikinci performans ölçütüne göre belirlenen optimum simülasyonda, çoklu İHA'lar tarafından ilk çeyrekte takip edilen kritik CCA'ların dağılımı analiz edilmiştir. Bu kapsamda, kritik CCA'ların toplam takip oranı hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 7'de sunulmuştur.

Grafiklerde, C-CSA*greedy* yaklaşımında kritik CCA'ların ilk çeyrekte daha yüksek oranda takip edildiği görülmektedir. Buna karşılık, GA'da bu oran daha düşük olup kritik CCA'ların belirli İHA'lar üzerinde yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Toplam takip oranı birlikte değerlendirildiğinde, C-CSA*greedy* yaklaşımının GA'ya kıyasla daha yüksek kapsama performansı sağladığı görülmektedir. Bu sonuç, kritik hedeflerin erken aşamada daha etkin biçimde takip edildiğini ve aynı zamanda İHA'lar arasında daha dengeli bir görev dağılımı sağlandığını göstermektedir.

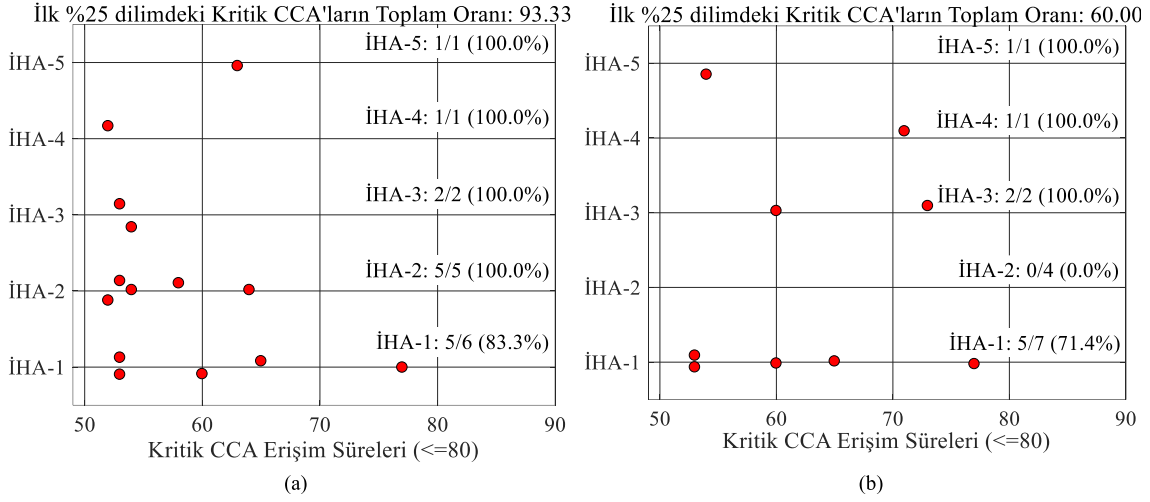
5.5.4. Optimum simülasyona göre çoklu İHA'ların süpürme yol planlaması (Sweep path planning of multiple UAVs in the optimum simulation)

Optimum simülasyonda belirlenen CCA'lar esas alınarak, her İHA için takip edilecek hedeflere yönelik süpürme yol planları oluşturulmuştur. C-CSA*greedy* için Şekil 8(a), GA için ise Şekil 8(b) kullanılmıştır. Üs koordinatı, İHA'ların kalkış ve görev sonrası dönüş (iniş) noktası olarak modellenmiştir. Düz çizgiler CCA'lar arasındaki süpürme rotalarını, kesikli çizgiler ise son takip edilen CCA'dan üs koordinatına dönüş yolunu göstermektedir.

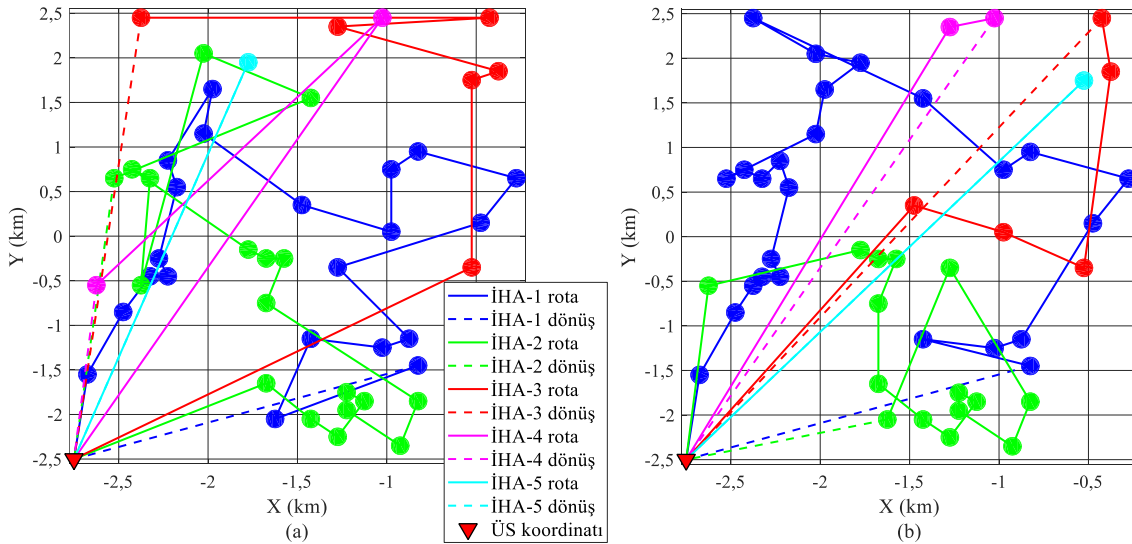
Şekil 8 incelendiğinde, C-CSA*greedy* yaklaşımında süpürme rotalarının daha kompakt ve İHA'lar arasındaki görev dağılımının daha dengeli olduğu görülmektedir. Buna karşılık, GA'da rotaların daha dağınık olduğu ve bazı İHA'ların daha uzun dönüş yolları izlediği görülmektedir. Bu sonuçlar, C-CSA*greedy*'nin görev dağılımı ve rota verimliliği açısından daha dengeli çözümler ürettiğini göstermektedir.



Şekil 6. Optimum simülasyonda her İHA için kritik CCA'ların takip sıralarının kutu grafiği: (a) C-CSA greedy, (b) GA
(Box plots of the tracking orders of critical CCAs for each UAV in the optimal simulation: (a) C-CSA greedy, (b) GA)



Şekil 7. Optimum simülasyonda her İHA için ilk çeyrekte takip edilen kritik CCA'ların dağılımı: (a) C-CSA greedy, (b) GA
(Distribution of critical CCAs tracked by each UAV during the first quartile in the optimal simulation: (a) C-CSA greedy, (b) GA)



Şekil 8. Optimum simülasyonda her İHA için CCA'lara ait süpürme yolu planlaması: (a) C-CSA greedy, (b) GA
(Sweep path planning for CCAs assigned to each UAV in the optimal simulation: (a) C-CSA greedy, (b) GA)

5.5.5. İstatistiksel Değerlendirme (Statistical Evaluation)

Bu çalışmada, elde edilen sonuçların istatistiksel anlamlılığını değerlendirmek amacıyla Wilcoxon signed-rank testi ve eşleştirilmiş t-testi uygulanmıştır. Wilcoxon testi parametrik dağılım varsayımına dayanmadan yöntemler arasındaki farkı değerlendirirken, eşleştirilmiş t-testi aynı simülasyon koşullarında elde edilen ortalama değerler arasındaki farkı değerlendirmektedir.

Tablo 3'te verilen ortalama ve standart sapma değerleri, yöntemlerin performans düzeyini ve sonuçların değişkenliğini göstermektedir. Daha düşük ortalama takip sırası kritik CCA'ların daha erken takip edildiğini, daha yüksek kapsama oranı ise kritik hedeflerin ilk çeyrekte daha etkin kapsandığını göstermektedir.

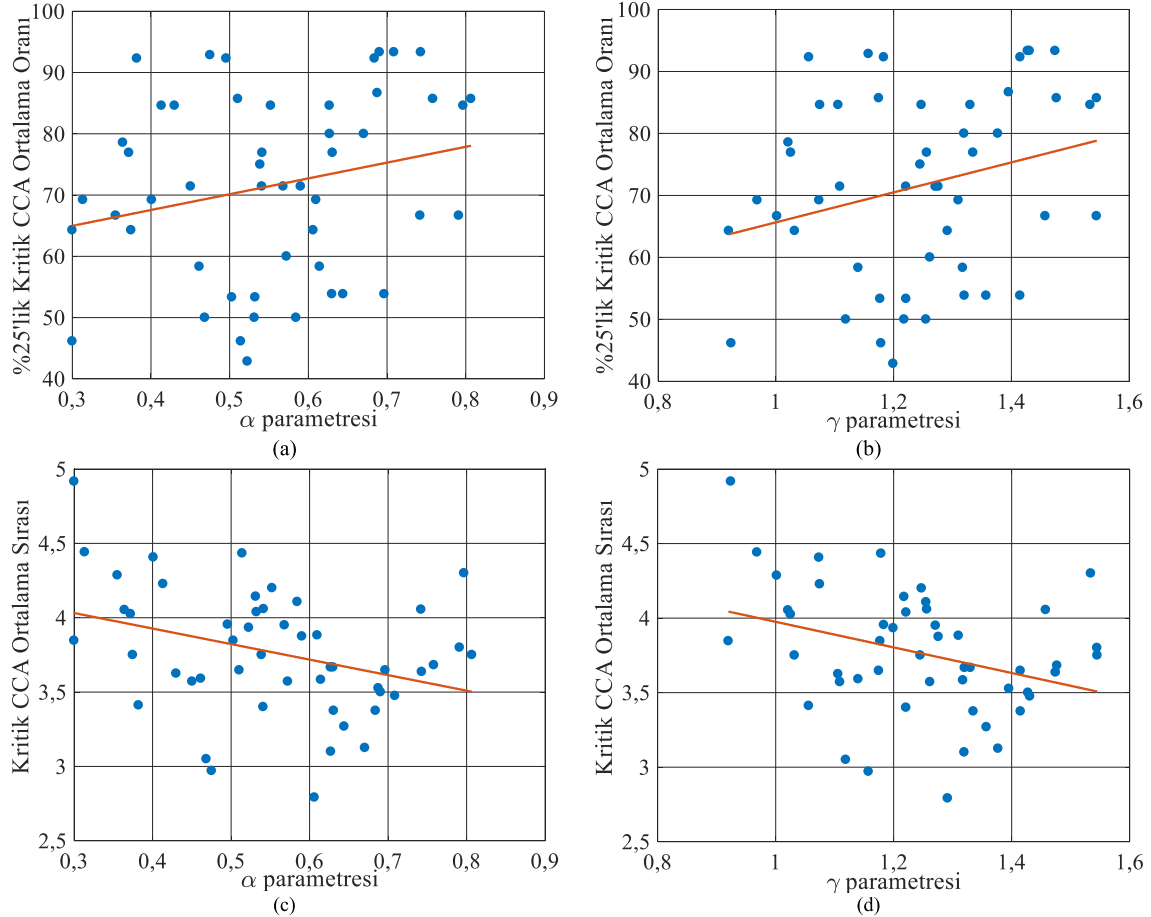
Tablo 3'te her iki performans ölçütü için Wilcoxon ve eşleştirilmiş t-testi sonucunda elde edilen p-değerlerinin 0.001'den küçük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, C-CSA greedy ile GA arasındaki performans farklarının istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, C-CSA greedy'nin daha düşük ortalama takip sırası ve daha yüksek ilk çeyrek kapsama oranı elde etmesi, önerilen yaklaşımın kritik CCA'ları daha erken ve daha etkin biçimde takip ettiğini desteklemektedir.

5.6. Parametre Duyarlılık Analizi (Parameter Sensitivity Analysis)

Önerilen uygunluk fonksiyonundaki α ve γ parametreleri, zaman hassasiyeti ile kalan erişim süresi arasındaki dengeyi belirlediğinden, performans üzerindeki etkilerinin incelenmesi önemlidir. Bu amaçla,

Tablo 3. Performans metrikleri için istatistiksel değerlendirme (Wilcoxon ve t-testi sonuçları)
(Statistical evaluation of performance metrics (Wilcoxon and paired t-test results))

Ölçüt	Yöntem	Ortalama $\pm$ Standart Sapma	Wilcoxon (p)	Paired t-test (p)
CCA_tümKritik(ort-sıra)	C-CSA greedy	4,5314 $\pm$ 0,8372	3,56 $\times 10^{-9}$	9,26 $\times 10^{-13}$
	GA	5,8720 $\pm$ 1,0067		
CCA_%25Kritik(ort-oran)	C-CSA greedy	71,5462 $\pm$ 14,9720	4,58 $\times 10^{-8}$	3,77 $\times 10^{-11}$
	GA	53,7923 $\pm$ 14,4296		



Şekil 9. α ve γ parametrelerinin performans metrikleri üzerindeki etkisi: (a)–(b) %25'lik dilimdeki kritik CCA'ların ortalama kapsama oranı, (c)–(d) kritik CCA'ların ortalama takip sırası
(Effect of the α and γ parameters on the performance metrics: (a)–(b) average coverage ratio of critical CCAs in the top 25%, (c)–(d) average visit order of critical CCAs)

farklı parametre değerleri altında elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak kritik hedeflerin önceliklendirme davranışı ve genel kapsama performansı analiz edilmiştir.

Şekil 9'daki sonuçlar, α ve γ parametrelerinin performans metrikleri üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermektedir. α parametresinin artmasıyla ilk %25'lik dilimdeki kritik CCA'ların ortalama kapsama oranı artarken, ortalama takip sırası azalmaktadır (Şekil 9a ve 9c). Benzer şekilde, γ parametresinin artması kritik CCA kapsama oranını artırmakta ve ortalama takip sırasını azaltmaktadır (Şekil 9b ve 9d). Özellikle γ parametresinin, kritik hedeflerin önceliklendirilmesi üzerinde daha belirgin ve istikrarlı bir etki oluşturduğu görülmektedir.

5.7. Hesaplama Karmaşıklığı Analizi (Computational Complexity Analysis)

Önerilen C-CSA *greedy* yaklaşımının hesaplama karmaşıklığı, CCA tabanlı modelleme çerçevesinde analiz edilmiştir. Çözüm uzayının hedefler yerine minimum CCA sayısını temsil eden küme üzerinden tanımlanması nedeniyle problem boyutu χ ile ifade edilmektedir. Algoritmada her bir karga için çözüm, χ adet CCA'nın değerlendirilmesiyle oluşturulmaktadır. Her bir CCA'nın uygunluk maliyeti; zaman hassasiyeti, kalan erişim süresi ve uçuş süresi gibi sabit sayıda parametre üzerinden hesaplandığından, bu işlem sabit zamanlıdır. Dolayısıyla, tek bir karga için çözümün değerlendirilmesi $O(\chi)$ karmaşıklığındadır.

Karga sürüsünde toplam K adet karga bulunduğu ve CSA optimizasyonunun maksimum $iter^{MAX}$ iterasyon boyunca gerçekleştirildiği dikkate alındığında, her iterasyonda tüm kargaların değerlendirilmesi gerekmektedir. Buna göre, CSA tabanlı optimizasyon aşamasının toplam hesaplama karmaşıklığı Eş. 13 ile ifade edilmektedir:

$$O(K \cdot iter^{MAX} \cdot \chi) \quad (13)$$

Greedy tabanlı senkronize CCA atama aşamasında ise kalan aday CCA'lar arasından yinelenmeli seçim gerçekleştirilmektedir. Her atama adımında, seçilen İHA için uygun aday CCA'ların maliyetleri karşılaştırılarak en düşük maliyetli CCA belirlenmektedir. En kötü durumda, χ adet CCA'nın sıralı olarak atanması ve her atama adımında kalan adayların taranması gerektiğinden, tek bir İHA için bu aşamanın toplam karmaşıklığı $O(\chi^2)$ olmaktadır. M adet İHA için greedy tabanlı senkronize atama aşamasının toplam karmaşıklığı Eş. 14 ile verilmektedir:

$$O(M \cdot \chi^2) \quad (14)$$

Sonuç olarak, önerilen yöntemin toplam asimptotik hesaplama karmaşıklığı, CSA optimizasyonu ve senkronize CCA atama aşamalarının birlikte değerlendirilmesiyle Eş. 15'de gösterilmektedir:

$$O(K \cdot iter^{MAX} \cdot \chi + M \cdot \chi^2) \quad (15)$$

Bu yapı, CCA tabanlı modellemenin sağladığı hedef gruplama avantajı sayesinde çözüm uzayının boyutunu azaltmakta ve özellikle yüksek sayıda hedef içeren senaryolarda hesaplama maliyetinin kontrol edilebilir biçimde ölçeklenmesine olanak sağlamaktadır.

5.8. Tartışma (Discussion)

Elde edilen bulgular, önerilen C-CSA *greedy* yaklaşımının zaman hassasiyetli hedeflerin önceliklendirilmesi ve kapsama verimliliği açısından GA'ya kıyasla daha etkili olduğunu göstermektedir. Bu üstünlükte, zaman hassasiyeti, kalan erişim süresi ve uçuş süresini birlikte değerlendiren çok parametrelili maliyet fonksiyonu önemli rol oynamaktadır.

Birinci performans ölçütünde elde edilen daha düşük ortalama takip sırası, kritik hedeflerin daha erken ziyaret edildiğini; ikinci ölçütteki daha yüksek kapsama oranları ise kritik hedeflerin erken aşamada daha etkin kapsandığını göstermektedir. Bu sonuçlar, yöntemin hem önceliklendirme hem de kapsama açısından dengeli bir yapı sağladığını ortaya koymaktadır.

Algoritma düzeyinde, CSA'nın keşif-sömürü dengesini koruyan arama mekanizmasının Greedy yaklaşımının düşük maliyetli CCA seçim stratejisiyle birleştirilmesi, çözüm kalitesini desteklemektedir. Erken yakınsamanın sınırlandırılması ve CCA tabanlı modelleme sayesinde kritik hedeflerin daha dengeli dağıtıldığı ve özellikle hedef yoğunluğunun arttığı durumlarda planlama verimliliğinin desteklendiği görülmektedir.

Parametre duyarlılık analizi, α ve γ parametrelerinin kritik hedeflerin önceliklendirilmesinde belirleyici olduğunu göstermektedir. α , zaman hassasiyetine verilen ağırlığı kontrol ederken γ , öncelik etkisini güçlendirmektedir. Bu iki parametrenin birlikte kullanılması, farklı senaryolara uyulanabilen bir karar mekanizması sağlamaktadır.

Son olarak, Wilcoxon signed-rank testi ve eşleştirilmiş t-testi sonuçlarında $p < 0,001$ elde edilmesi, yöntemler arasındaki performans farklarının istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. C-CSA *greedy*'nin daha düşük takip sırası ve daha yüksek kapsama oranı elde etmesi, yaklaşımın kritik hedeflerin erken ve etkin biçimde takip edilmesini desteklediğini doğrulamaktadır.

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, NP-hard yapıya sahip PTC-TS probleminin çözümü için, zaman hassasiyetli hedeflerin çoklu İHA'lar tarafından etkin biçimde takip edilmesini amaçlayan C-CSA *greedy* yaklaşımı önerilmiştir. Yaklaşım, CCA tabanlı modelleme ile çözüm uzayını daraltmakta ve zaman hassasiyeti, kalan erişim süresi ile uçuş süresini birlikte değerlendiren maliyet fonksiyonu ile hedeflerin önceliklendirilmesini sağlamaktadır.

Deneysel sonuçlar, C-CSA *greedy*'nin GA'ya kıyasla daha üstün performans sağladığını göstermiştir. Kritik hedeflerin ortalama takip sırası C-CSA *greedy* için 4,5314, GA için 5,8720 olarak elde edilirken, ilk %25'lik dilimdeki ortalama kritik CCA kapsama oranları sırasıyla %71,5462 ve %53,7923 olmuştur. Yöntemler arasındaki performans farkları, Wilcoxon signed-rank testi ve eşleştirilmiş t-testi ile istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,001$). Ayrıca kutu grafikleri, C-CSA *greedy*'nin daha dar dağılım ve daha sınırlı aykırı değerlerle daha tutarlı sonuçlar ürettiğini göstermiştir. Parametre duyarlılık analizi ise α ve γ parametrelerinin performans üzerinde belirleyici olduğunu ve özellikle γ 'nın daha baskın bir etki oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, C-CSA *greedy* yaklaşımı, geliştirilen maliyet fonksiyonu ve CCA tabanlı modelleme sayesinde zaman hassasiyetli süpürme kapsama problemlerinde kritik hedeflerin önceliklendirilmesi ve erken kapsanması açısından GA'ya göre daha etkili bir çözüm sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda yaklaşımın farklı senaryo koşullarında değerlendirilmesi, alternatif meta-sezgisel yöntemlerle karşılaştırılması ve çoklu İHA koordinasyonunun eş zamanlı ve dinamik karar mekanizmalarıyla bütünleştirilmesi planlanmaktadır.

Kaynaklar (References)

- Özdağ R., Canayaz M., A new metaheuristic approach based on orbit in the multi-objective optimization of wireless sensor networks, *Wirel. Netw.*, 27 (1), 285-305, 2021.
- Hasan Ali N., Özdağ R., Coverage analysis and a new metaheuristic approach using the Elfas Probabilistic detection model in Wireless sensor networks, *Measurement*, 200, 111627, 2022.

3. Özdağ R., The optimization of network lifetime with sensor deployment for target coverage problem in wireless sensor networks, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (4), 1155-1167, 2017.
4. Du J., Li Y., Liu H., Sha K., On sweep coverage with minimum mobile sensors, 2010 IEEE 16th International Conference on Parallel and Distributed Systems, Shanghai, China, 283-290, 8-10 December 2010.
5. Li M., Cheng W., Liu K., He Y., Li X., Liao X., Sweep coverage with mobile sensors, *IEEE Trans. Mobile Comput.*, 10 (11), 1534-1545, 2011.
6. Srinivas M., Donta P.K., Amgoth T., Efficient algorithms for point and area sweep-coverage in wireless sensor networks, 2021 Sixth International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, India, 315-320, 25-27 March 2021.
7. John J., Harikumar K., Senthilnath J., Sundaram S., An efficient approach with dynamic multiswarm of UAVs for forest firefighting, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, 54 (5), 2860-2871, 2024.
8. Zhou L., Leng S., Liu Q., Wang Q., Intelligent UAV swarm cooperation for multiple targets tracking, *IEEE Internet Things J.*, 9 (1), 743-754, 2022.
9. Li J., Xiong Y., She J., Wu M., A path planning method for sweep coverage with multiple UAVs, *IEEE Internet Things J.*, 7 (9), 8967-8978, 2020.
10. Özdağ R., Hybrid-based path planning for multiple UAV sweep coverage, *International Informatics Congress (IIC2023)*, Batman, Türkiye, 63-79, 20-21 March 2023.
11. Özdağ R., A novel hybrid path planning method for sweep coverage of multiple UAVs, *J. Supercomput.*, 81 (1), 83, 2025.
12. Wang H., Time sensitive sweep coverage with multiple UAVs, *Algorithmic Aspects in Information and Management*, Cilt 13153, Editörler: W. Wu, H. Du, Springer, Cham, 277-288, 2021.
13. Wang H., Du H., Time sensitive sweep coverage with minimum UAVs, *Theor. Comput. Sci.*, 928, 197-209, 2022.
14. Askarzadeh A., A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm, *Comput. Struct.*, 169, 1-12, 2016.
15. Junnickel D., The greedy algorithm, *Graphs, Networks and Algorithms*, Springer, Berlin, Heidelberg, 135-161, 2013.
16. Jia Y., Zhou S., Zeng Q., Li C., Chen D., Zhang K., Liu L., Chen Z., The UAV path coverage algorithm based on the greedy strategy and ant colony optimization, *Electronics*, 11 (17), 2667, 2022.
17. Özdağ R., A new path planning approach for sweep coverage of time-sensitive targets with multiple simultaneously flying UAVs, *Karaelmas International Science and Engineering Symposium (KISES 2024)*, Zonguldak, Türkiye, 41, 10-11 May 2024.
18. Özdağ R., A hybrid approach for priority tracking of time-sensitive critical targets in multi-UAV sweep coverage, *5th Global Conference on Engineering Research*, Balıkesir, Türkiye, 183, 24-27 September 2025.
19. Gerkey B.P., Mataric M.J., A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems, *Int. J. Robot. Res.*, 23 (9), 939-954, 2004.
20. Choi H.-L., Brunet L., How J.P., Consensus-based decentralized auctions for robust task allocation, *IEEE Trans. Robot.*, 25 (4), 912-926, 2009.
21. Bellingham J.S., Tillerson M., Alighanbari M., How J.P., Cooperative path planning for multiple UAVs in dynamic and uncertain environments, *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, Las Vegas, NV, USA, 2816-2822, 10-13 December 2002.
22. Li G., Zhang T., Tsai C.-Y., Yao L., Lu Y., Tang J., Review of the metaheuristic algorithms in applications: Visual analysis based on bibliometrics, *Expert Syst. Appl.*, 255, 124857, 2024.
23. Özdağ R., 3D location optimization of multiple Unmanned Aerial Vehicle Base Stations in next-generation cellular networks and a new meta-heuristic approach, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (3), 1467-1482, 2021.