

İNSANSIZ HAVA ARACI SÜRÜLERİNDE AÇIK ARTIRMA TABANLI DAĞITIK GÖREV ATAMA

Mutullah Eşer¹
Ankara Üniversitesi, Ankara
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, Ankara

Asım Egemen Yılmaz²
Ankara Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Birçok görevi tek bir insansız hava aracından (İHA) daha etkili ve verimli bir şekilde gerçekleştirebilen İHA sürüleri, modern askeri ve sivil operasyonlarda giderek artan bir öneme sahiptirler. Otonom İHA sürülerinin görevleri etkin bir şekilde yerine getirebilmesi için görevlerin İHA'lar arasında dağıtılması büyük önem taşımaktadır. Bu durum İHA sürü teknolojisinin ilerlemesinde ele alınması gereken önemli zorluklardan birisidir. Atama problemi temel olarak M görevin N İHA'ya toplam sistem maliyetini en aza indirecek şekilde atanma süreci olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, çeşitli görev kısıtlamalarının varlığı altında heterojen İHA sürülerinde atama probleminin dağıtık çözümü için geliştirilen açık artırma tabanlı bir algoritma sunulmuştur. Önerilen algoritma geliştirilen maliyet hesabı fonksiyonu sayesinde toplam maliyeti minimize ederken aynı zamanda hava araçlarına iş yükünün eşit şekilde paylaştırılmasını sağlar ve önerilen iki aşamalı açık artırma prosesi sayesinde toplam sistem faydasını da artırır. Önerilen algoritmanın performansı, Monte Carlo simülasyonları kullanılarak değerlendirilmiş ve optimal çözüme yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, önerilen algoritma CBBA (Consensus Based Bundle Algorithm) algoritması ile karşılaştırılmış ve daha düşük toplam maliyet ile görev atama yeteneğine sahip olduğu gösterilmiştir. Ancak, iletişim hatalarının yüksek olduğu senaryolarda çakışan görev atamalarının arttığı gözlemlenmiştir.

GİRİŞ

İnsansız hava aracı, genellikle sistem içinde belirlenmiş bir program veya rotaya göre otonom olarak uçabilen veya bir insan tarafından manuel olarak yönlendirilebilen hava aracı olarak tanımlanır. İHA'lar, geniş bir kullanım alanına sahip olup askeri operasyonlardan sivil uygulamalara kadar birçok alanda insanlı araçların yerini almaktadır. İHA'lar, özellikle tehlikeli ve zorlayıcı görevlerde, insan hayatını riske atmadan keşif, gözetleme ve lojistik destek gibi görevleri yerine getirebilmektedir. Ayrıca, tarım, afet yönetimi, ve kargo taşımacılığı gibi sivil alanlarda da etkin bir şekilde kullanılmakta, verimliliği artırmakta ve maliyetleri düşürmektedir [Laarni, Vaatanen, Karvonen, Lastusilta ve Saffre, 2022].

İHA teknolojisi ilerlemeye devam ettikçe, İHA sayısı her yıl istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Küresel ticari drone yıllık satış istatistiklerine göre, 2025 yılına kadar dünya genelinde yaklaşık 2.679.000 İHA olacağı ve pazar büyüklüğünün yaklaşık 5,3 milyar USD değerinde olacağı öngörülmektedir [Chen, Zheng, Xu, Guo, Feng, Yao ve Lan, 2023].

İHA teknolojisindeki ilerlemeler, yeni ve yenilikçi uygulamaların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu yenilikçi teknolojilerden birisi de İHA sürüleridir. İHA sürüsü birbiriyle haberleşerek otonom hareket edebilen ve amaçları ortak bir hedefe ulaşma olan birden fazla İHA'dan oluşan bir sistemdir. Başka bir tanımla İHA sürüleri, her bir İHA'nın bağımsız ve işbirliği içinde çalışan bir ajan olarak kabul edildiği çok ajanlı sistemlerdir [Qib, Ningfei ve Jianqiao, 2013].

¹ Doktora Adayı, Elektrik ve Elektronik Müh. Böl., E-posta: eserm@ankara.edu.tr

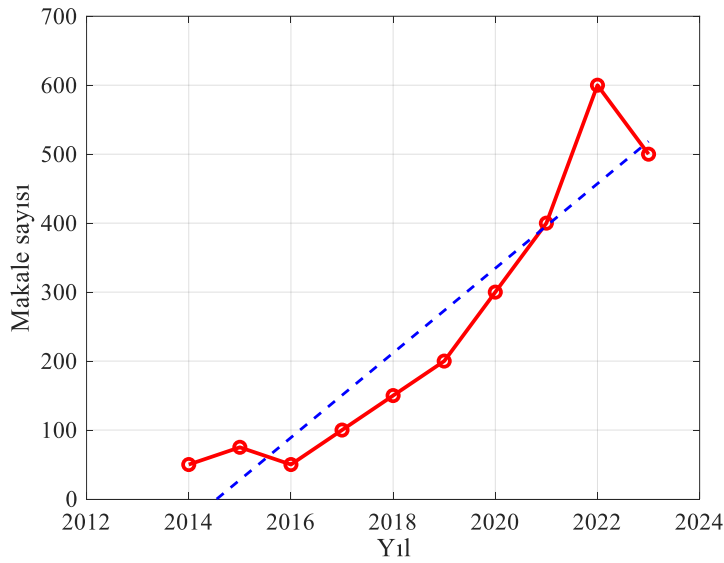
Otopilot Uçuş Kontrol Tasarımı Lider Mühendis, Helikopter G.M.Y., E-posta: mutullah.eser@tai.com

² Prof. Dr., Elektrik ve Elektronik Müh. Böl., E-posta: Asim.Egemen.Yilmaz@eng.ankara.edu.tr

İHA sürülerini, insanız hava araçlarının klasik kullanımından ayıran belirgin özellikler boyut, çeşitlilik, sürü içerisinde birbirleriyle iletişim kurabilmeleri ve kendi kendilerini yönetmeleri olarak sıralanabilir [Yeşilay ve Macit, 2020].

İHA sürülerinin farklı askeri amaçlar ile dünyada kullanım örnekleri vardır. Bunlardan birkaç örnek şu şekilde sıralanabilir. Çin , 2020 yılında küçük İHA'lerden oluşan bir sürüyü test etmiştir. Yine 2020 yılında Rusya yer hedeflerine saldırı için üzerinde çalıştıkları İHA sürüsünü bir tatbikatta kullanmıştır. ABD, keşif, formasyon uçuşu ve mühimmat teslimi gibi çeşitli koordineli görevler için büyük drone sürüleri üzerine yaptığı testlere devam etmektedir [Bell, 2022].

Akademik çalışmalarda da İHA sürüleri üzerinde yapılan araştırmalarda hızlı bir büyüme olduğu görülmektedir [Phadke, Medrano, Sekharan ve Chu, 2024]. Phadke vd.'nin Dimensions kullanarak "UAV sürüleri" anahtar kelimesi ile son on yıldaki araştırma trendlerine ilişkin elde ettikleri genel bakış Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1: 2013-2023 yılları arasında insansız hava aracı sürüleri üzerine yapılan araştırmaların sayısı [Phadke, Medrano, Sekharan ve Chu, 2024]

İHA sürülerinin en büyük dezavantajı ise koordinasyon sorunlarının oldukça zor ve karmaşık olmasıdır [Zielinski, 2021]. İHA sürülerinde üzerinde çalışılan sorunlar, genellikle yüksek derecede karmaşıklık içeren ve NP-hard sınıfında yer alan problemlerdir. NP-hard problem, çözümünü doğrulanabilen ancak çözümü için bilinen bir algoritmanın polinomsal zamanda çalışmadığı, yani çözüm süresinin problem boyutuyla üstel olarak arttığı matematiksel problemdir. Bu nedenle, bu problemler için optimal çözümlerin bulunması çoğu zaman imkansız ya da çok zaman alıcıdır [Zlot, 2006].

İHA sürülerinde üzerinde çalışılan ve çözülmesi gereken problemlerden birisi de görev atama problemidir. Görev atama temel olarak farklı pozisyon ve önemdeki görevlerin, farklı pozisyon ve tipteki İHA'lar tarafından gerçekleştirilmesi için bir optimizasyon probleminin çözümüdür [Erten, Saraç ve Özçelik, 2021]. Amaç, toplam maliyetleri en aza indirirken veya küresel ödülü maksimize ederken görevleri çatışma olmadan İHA'lara atamaktır. İHA sürülerinde operasyonel başarının artırılması ve sürünün değişen çevre koşullarına hızlıca adapte olabilmesi için görev atama İHA sürüleri için çözülmesi gereken önemli problemlerden birisidir [Gerkey ve Mataric, 2004].

Görev atama probleminin çözümünde kullanılan algoritmalar temel olarak merkezi ve dağıtık algoritmalar olmak üzere iki başlık altında toplanır. Merkezi görev atama algoritmalarında diğer tüm ajanlar ile iletişim kuran bir merkezi koordinatör ajan vardır. Koordinatör ajan diğer ajanların arasındaki müzakereleri yönetir ve görev atamaları hakkında karar verir [Skaltsis, Shin ve Tsourdos, 2021]. Merkezi yöntemlerin temel avantajı, genel amaç fonksiyonunu optimize edebilme yeteneklerinde yatmaktadır. Bu yaklaşım, görev atama ve kaynak kullanımı konusunda optimal veya

optimallik sınırına çok yakın çözümler üreterek yüksek verimlilik ve etkinlik sağlar. Merkezi yöntemlerin en büyük dezavantajı ise İHA'lar ile merkezi sunucu arasında etkili iletişime ihtiyaç duyulmasıdır. Bu bağımlılık, merkezi düğümde büyük bir yük, karmaşık hesaplamalar ve tek nokta hatasına yol açabilir. Bu tür zayıf noktalar, özellikle dinamik veya büyük ölçekli uygulamalarda sistemin performansını ve güvenilirliğini ciddi şekilde etkileyebilir [Fu, Jing, Gao, Li, Chen ve Zhang, 2018].

Dağıtık görev atama algoritmalarında ise koordinatör bir ajan yoktur ve ajanlar birbiri ile yaptıkları müzakereler sonucunda görev paylaşımı dağıtık bir şekilde gerçekleştirilir [Yan, Pan, Zhang ve Xu, 2022]. En bilinen dağıtık karar verme algoritmaları market tabanlı algoritmalarıdır. Bu tip algoritmalar market ekonomisinin temel ilkelerini kullanarak ajanlar arasında görev paylaşımı yapar. Bu sanal ekonomi de ajanlar tüccar ve görevler ise ticareti yapılan mallardır. Açık artırma, market tabanlı algoritmaların temelidir. Bu algoritmalarda temel olarak ajanlar görevlere teklif verir ve en yüksek teklifi veren ajan görevi kazanır. Dağıtık görev atama için yaygın olarak kullanılan açık artırma tabanlı yöntemlerden birisi Sözleşme Ağı Protokolü (CNP)'dür [Fu, Jing, Gao, Li, Chen ve Zhang, 2018]. Choi ve arkadaşları tarafından önerilen CBBA'da, yaygın kullanılan market tabanlı çoklu görev atama algoritmalarından birisidir [Choi, Brunet ve How, 2009]. Bu algoritmada açık artırma ve konsensüs aşamaları arasındaki iterasyonlar ile görev atama gerçekleştirilir. CBBA literatürde üzerinde oldukça çalışılmış ve bir çok farklı geliştirilmiş versiyonu sunulmuştur.

Bu çalışmada, İHA sürülerinde dağıtık görev atama için açık artırma tabanlı bir algoritma önerilmiştir. Problem tanımı bölümünde insansız hava aracı sürülerinde görev atama problemi özetlenmiştir. Yöntem bölümünde İHA sürülerinde görev atama için geliştirilen algoritma açıklanmıştır. Uygulamalar ve değerlendirme bölümünde önerilen görev atama algoritmasının etkinliğini göstermek için yapılan simülasyon sonuçları paylaşılmıştır. Sonuç bölümünde ise sonuçlar ve gelecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

PROBLEM TANIMI

Görev, belirli beceriler veya yetenekler gerektiren ve belirli bir konumda gerçekleştirilmesi gereken bir eylemdir. Görevlere, sistemdeki diğer görevlere kıyasla hangi sırayla ele alınacaklarını belirleyen bir öncelik seviyesi veya önem derecesi atanır. Bu öncelik seviyesi, görevin tamamlanması gereken son tarih, görevin sistemin genel performansı için kritik önemi veya görevin aciliyetini belirleyen dış faktörler gibi çeşitli etmenlerden etkilenebilir. Matematiksel olarak, görev Denklem 1 ile ifade edilir [Weide, 2008].

$$t = t < x_t, y_t, z_t, c_t, p_t > \quad (1)$$

Burada x_t, y_t, z_t sırasıyla görevin x, y ve z konumlarını, c_t görev ile ilgili ek gereksinim ve kısıtlamaları, p_t ise görevin öncelik seviyesini temsil etmektedir.

İHA sürülerinde görev atamada temel amaç toplam sistem faydasını maksimize ederek veya toplam sistem maliyetini minimize ederek İHA'lar ve görevler arasında çakışma olmayan eşlemeyi bulmaktır. Her görev yalnızca bir İHA tarafından icra edilmelidir, ancak her İHA birden fazla görevi sıralı bir şekilde gerçekleştirebilir. Bir görevin birden fazla İHA'ya atanmadığı atamalar çakışma olmayan atama olarak adlandırılır. Görev atama sonucunda bir İHA'ya atanan görevlerin gerçekleştirilme sırası belirlenmelidir. Görevlerin İHA'lar tarafından gerçekleştirilme sırası, toplam maliyeti önemli ölçüde etkiler; bu nedenle, bu sıranın optimize edilmesi, toplam maliyetin minimize edilmesi açısından gereklidir.

İHA sürüsünde N adet farklı yeteneklere sahip İHA ve M adet heterojen görev vardır yani görevler tek tip değildir. N adet İHA'dan oluşan küme Ψ ile M adet görevden oluşan küme ise Υ ile gösterilir ve Denklem 2 ile ifade edilirler.

$$\begin{aligned} \Psi &= \{d_1, d_2, \dots, d_n\} \\ \Upsilon &= \{t_1, t_2, \dots, t_m\} \end{aligned} \quad (2)$$

İHA'ların kullanıldığı görevler, zaman limitli görevlerdir yani belirli zaman aralığında gerçekleştirilmesi gerekir. Her görev için tanımlı bir zaman penceresi vardır ve görev bu zaman

penceresi içerisinde icra edilmeye başlanmış olması gerekmektedir. d_i İHA'sının t_j görevini rotasına (p_i) ekleyebilmesi için görev konumunda olacağı zaman olan τ_{ij} değerinin Denlem 3'te ifade edildiği gibi, bu zaman penceresi içerisinde olmalıdır.

$$\tau_{jstart} \leq \tau_{ij} \leq \tau_{jfinish} \quad (3)$$

Verilen tanımlar doğrultusunda İHA sürülerinde görev atama problemi tamsayılı programlama modeli kullanılarak Denklem 4 ile formüle edilir.

$$\max \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^M R_{ij} x_{ij} \right)$$

kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} \leq L_t, \forall i \in \Psi$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} \leq 1, \forall j \in Y$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} = N_{min} = \min\{M, NL_t\}$$

(4)

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall \{i,j\} \in \Psi \times Y$$

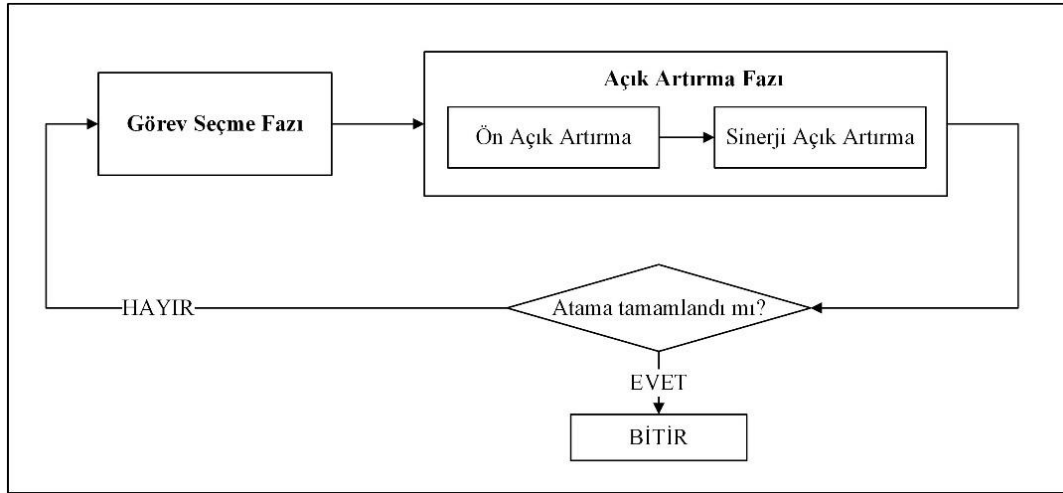
Burada R_{ij} , t_j görevinin d_i İHA'sına atanması sonucu İHA'nın elde ettiği fayda değeridir. $x_{ij}=1$ olması t_j görevinin d_i İHA'sına atandığını sıfır olması ise atanmadığını temsil eder. L_t bir İHA'nın rotasına ekleyebileceği maksimum görev sayısıdır.

YÖNTEM

Bu çalışmada gerçek dünya koşulları ve karmaşıklığını dikkate alarak heterojen bir İHA sürüsüne bir dizi heterojen ve zaman kısıtlı görevi verimli bir şekilde atamak için bir algoritma önerilmiştir. Algoritma market tabanlı iki aşamalı açık artırma prosesine sahip bir dağıtık çözüm yöntemidir. Algoritma görev seçme ve açık artırma olmak üzere iki fazdan oluşur. Görev seçme fazında her ajan kendi lokal bilgisi ile gelir matrisini hesaplayıp rotasına eklemek istediği görevleri belirler. Açık artırma fazında ise İHA'lar en fazla fayda sağladığı görevi ve en fazla fayda sağladığı ikinci görevi rotasına ekleyebilmek için aralarında iki aşamalı bir açık artırma süreci yürütürler. Tüm görevler atanana veya algoritma daha fazla yakınsamayana kadar bu iki faz arasında döngü ile süreç devam eder (Şekil 2).

Görev seçme prosesi

Algoritmanın görev seçme fazında her İHA belirlenen kurallar ile görevler için maliyet ve gelir değerlerini hesaplayarak ilgili matrislere kaydederler ve bu matrislere göre maksimum fayda sağlayan görevini ve sinerji görevini seçer. Önerilen algoritmada İHA'lar aç gözlü bir yaklaşım ile sadece maksimum fayda sağladıkları görevi rotasına eklemeyi aynı zamanda görevler arasındaki sinerjiyi de dikkate alır ve toplam sistem faydasını artırmaya çalışırlar. Bir görev kümesinin, birlikte gerçekleştirilmesi için gereken toplam maliyetin, ayrı ayrı yapılması durumunda ortaya çıkan bireysel maliyetlerin toplamından daha az olması durumunda, bu görevler bir İHA için pozitif sinerjiye sahiptir. Tersine, toplam maliyetin bireysel maliyetlerin toplamından daha yüksek olması durumunda negatif sinerji oluşur.



Şekil 2: Önerilen algoritmanın görev atama aşamaları

Önerilen algorithmanda maliyet hesabı için kullanılan maliyet hesabı fonksiyonunun denge maliyeti (C_{ij}^B) ve uzaklık maliyeti (C_{ij}^D) olmak üzere iki bileşeni vardır. d_i hava aracının t_j görevi için denge ve uzaklık maliyeti Denklem 5'e göre hesaplanır.

$$C_{ij}^D = \frac{d_{ij}}{MFD_i} \quad C_{ij}^B = \frac{|p_i|}{L_t} \quad (5)$$

Burada d_{ij} , d_i İHA'sının t_j görevine olan uzaklığını, MFD_i , d_i İHA'sının en uzak olan göreve uzaklığı, $|p_i|$, d_i İHA'sının görev listesindeki eleman sayısı ve L_t , d_i İHA'sının görev listesine ekleyebileceği maksimum görev sayısıdır.

d_i İHA'sının t_j görevi için toplam maliyeti Denklem 6 ile hesaplanır. w_1 ve w_2 sırasıyla uzaklık ve denge maliyet katsayılarıdır.

$$C_{ij} = w_1 C_{ij}^D + w_2 C_{ij}^B \quad (6)$$

Tanımlanan maliyet fonksiyonu kullanılarak yerel gelir değeri Denklem 7 kullanılarak hesaplanır. R_{ij} , d_i İHA'sı için t_j görevinin fayda değerini temsil eder.

$$R_{ij} = V_j e^{-\tau \cdot (tc_{start} - (tp_{start} + tp_{duration}))} - C_{ij} \quad (7)$$

Burada, V_j t_j görevinin tanımlı başlangıç ödül değeri, τ zaman gecikme katsayısı, tc_{start} ajanın t_j görevine başlayabileceği en erken zaman, tp_{start} ajanın görev listesinde bulunan son göreve başlama zaman ve $tp_{duration}$ ajanın görev listesinde bulunan son görevin süresini temsil etmektedir.

Algorithmanda normal ve sinerji olmak üzere iki farklı gelir matrisi kullanılmaktadır. Normal gelir matrisi ajanın ilgili iterasyonda elde ettiği maliyet matrisi kullanılarak hesaplanır. Sinerji gelir matrisi hesabında ise öncelikle ajanın normal gelir matrisindeki en yüksek gelirli görevi kazandığı kabul edilerek yeni bir sinerji maliyet matrisi hesaplanır. Daha sonra ise bu maliyet matrisine göre yukarıdaki eşitlik kullanılarak sinerji gelir matrisi hesaplanır. Sinerji gelir matrisinin kullanım amacı görevlerin aralarındaki sinerjiyi yani birbirlerine mesafe olarak yakınlıklarını kaçırmamaktır.

Açık artırma prosesi

Önerilen algoritma, ön açık artırma ve sinerji açık artırma olarak adlandırılan iki aşamalı bir açık artırma prosesine sahiptir. Bu iki aşamalı açık artırma yapısı ile İHA'ların görevleri rotalarına eklerken görevler arasındaki sinerjiyi de dikkate almaları sağlanmaktadır.

Ön açık artırma aşamasında İHA normal gelir matrisindeki en büyük elamanını (f_i) seçer ve f_i için teklifini (δ_i) hesaplar. Daha sonra ise f_i görevi için açık artırma mesajı yayınlar. δ_i , Denklem 8 ile hesaplanır ve burada s_i , ajanın en iyi ikinci görevinin fayda değerini ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} \delta_i &= f_i - s_i & j_i &= \arg \max_{j=1,\dots,n} \{R_{ij}^N\} \\ f_i &= \max_j \{R_{ij}^N\} & s_i &= \max_{j \neq j_i} \{R_{ij}^N\} \end{aligned} \quad (8)$$

İHA tüm ajanlardan açık artırma mesajlarını aldıktan sonra kendisinin açık artırma başlattığı görev için açık artırma başlatan başka İHA var mı diye kontrol eder. Bir görev için birden fazla İHA açık artırma başlatmış ise gelir değeri en yüksek olan İHA görevi kazanır. Gelir değerlerinin eşit olması durumunda küçük ID'li drone görevi kazanır. Görevi kazanan İHA bir Pre-Auction Result mesajı ile kazandığını sürüdeki diğer ajanlara duyurur.

Sinerji açık artırma aşamasında ise ön açık artırma aşamasında bir ajan tarafından kazanılan görevler için sinerji tekliflerinin verildiği aşamadır. İHA sinerji gelir matrisindeki en yüksek değere sahip olan görev için bir İHA'dan Pre-Auction Result mesajı almış ise görevi kazanan drona ilgili görev için teklifini iletir. İHA sinerji görevi için teklif hesaplarırken sinerji gelir matrisini ve Denklem 9'u kullanır.

$$\begin{aligned} \gamma_i &= g_i - h_i & l_i &= \arg \max_{j=1,\dots,n} \{R_{ij}^S\} \\ g_i &= \max_j \{R_{ij}^S\} & h_i &= \max_{j \neq j_i} \{R_{ij}^S\} \end{aligned} \quad (9)$$

Burada γ_i , d_i ajanının sinerji görevi için teklifi, l_i , d_i ajanına maksimum gelir sağlayan görevin numarası, g_i sinerji aşamasında d_i ajanına maksimum fayda sağlayan görevin gelir değeri ve h_i ise ajanın en fazla fayda elde ettiği ikinci görevin gelir değeridir.

Sinerji görevleri için teklif mesajları alındıktan sonra ilk iterasyon için ilgili görevleri kazanan ajanlar belirlenir. İlgili görev için $\delta_i > \gamma_i$ ise görev ön açık artırma aşamasında görevi kazanan ajanda kalır. Eğer $\gamma_i > \delta_i$ olacak şekilde bir sinerji teklifi gelirse teklifi veren ajan görevi kazanır. En faydalı görevi için açık artırma başlatan ajan eğer görevine teklif almamışsa kendi kazanmıştır. Sinerji açık artırma aşaması sonunda da tüm ajanlar kazandığı görevleri Synergy-Auction Result mesajı ile yayınlar.

Açık artırma aşamasının sonunda atanmamış görev kalıp kalmadığı kontrol edilir eğer tüm görevler atanmamış ise tekrar görev seçme fazına geçilir.

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

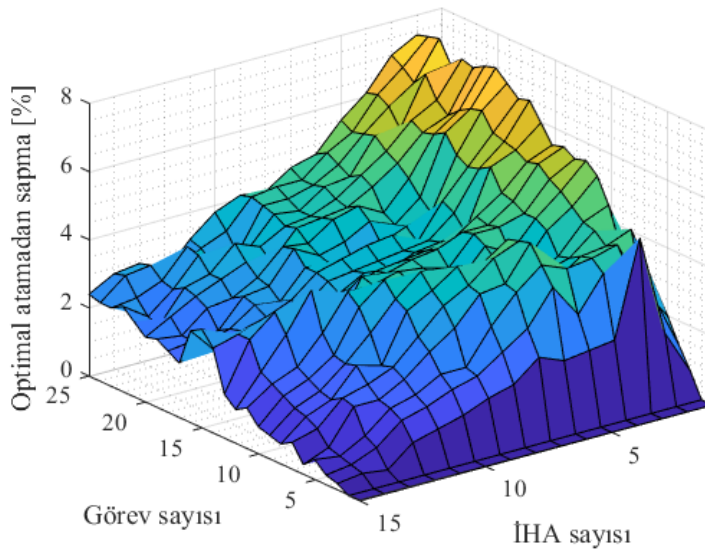
Önerilen dağıtık görev atama algoritmasının, performansını değerlendirmek için üç set simülasyon gerçekleştirildi. İlk simülasyonda, algoritmanın heterojen görev atamada başarısını optimal görev atama sonucu ile karşılaştırmak için Monte-Carlo simülasyonu yapılmıştır. İkinci olarak ise, yine Monte-Carlo simülasyonu ile önerilen algoritmanın performansı, toplam görev maliyeti ve mesaj sayısı açısından CBBA algoritmasıyla karşılaştırılmıştır. İHA sürülerinde görev atama, operasyonel maliyetlerin yanı sıra iletişim yükünün de düşük tutulmasını gerektirir. Bu doğrultuda son simülasyon setinde iletişim kısıtlamaları altında önerilen algoritmanın atama yeteneklerini değerlendirmek için, özellikle atanmamış ve çakışan görev atamalarına odaklanarak, sonuçlar Merkezi Macar ve CBBA algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır.

Simülasyonlar, 3.8 GHz hızında 8 çekirdekli Intel i7-10700K işlemci, 32 GB RAM ve 1 TB SSD depolama birimine sahip bir kişisel bilgisayar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda $w_1=0.3$, $w_2=0.7$ ve $\tau=0.2$ olarak belirlenmiştir.

Görev atama performansının optimal atama ile karşılaştırılması

Bu bölümde, tamsayı programlama kullanılarak önerilen algoritmanın bulunduğu çözümlerin optimal çözüme olan yakınlığı her nokta için 50 Monte-Carlo simülasyonu ile analiz edilmiştir. Monte-Carlo simülasyonları, belirli bir problem yapısı için rastgele örnekler oluşturarak algoritmanın performansını çeşitli senaryolarda test etmeye olanak tanır.

Simülasyonlarda görev ve İHA'lar 500×500m'lik bir alana rastgele şekilde konumlandırılmıştır. İHA'ların full graph ile bağlı olduğu ve mesaj kaybı olmadığı durum için analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3'te verilmiştir. Sonuçlar, optimal durumdan maksimum sapmanın %8 civarında olduğunu göstermektedir. Bu, önerilen algoritmanın büyük çoğunlukla optimal çözüme oldukça yakın çözümler ürettiğini ve pratik uygulamalarda oldukça etkili olabileceğini göstermektedir. Bu tür bir sapma oranı, gerçek dünya uygulamaları için kabul edilebilir bir hata payı olarak değerlendirilebilir ve algoritmanın güvenilirliğini artırır.



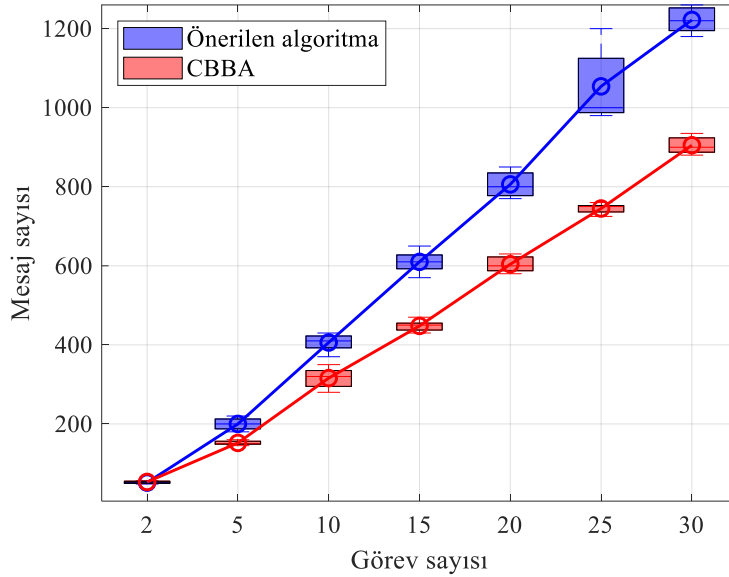
Şekil 3: Önerilen algoritma atama sonucunun optimal çözüm ile karşılaştırılması

Atama performansının benzer dağıtık görev atama algoritması ile karşılaştırılması

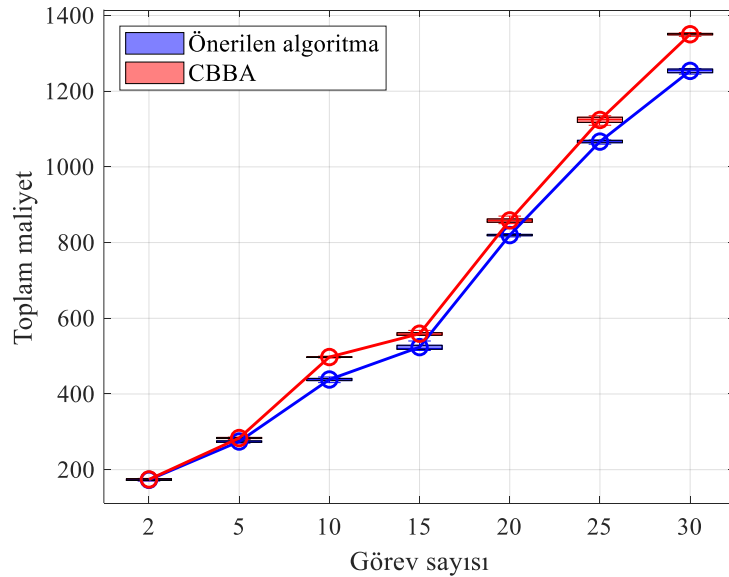
Bu bölümde önerilen algoritmanın performansı CBBA yöntemi ile toplam görev maliyeti ve toplam mesaj sayısı kriterlerine göre karşılaştırılmıştır. CBBA algoritması ile karşılaştırılmasının temel nedeni CBBA'nın da dağıtık açık artırma tabanlı bir algoritma olması ve İHA sürülerinde görev atama için kullanılıyor olmasıdır. Görev sayısı 2-30 arasında değiştirilerek, görevler 8 İHA'ya atanmıştır. Görev ve İHA'lar 500×500m'lik bir alana rastgele şekilde konumlandırılmış ve her görev sayısı için 50 Monte Carlo simülasyonu koşturulmuştur. Atama sonucu toplam mesaj sayısı ve toplam görev maliyeti için kutu grafikleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Toplam görev maliyeti atama sonucunda tüm ajanlar için oluşturulan rotaların metre cinsinden toplamını ifade etmektedir.

Şekil 4'te önerilen algoritmanın iki aşamalı açık artırma prosesi sayesinde görev atama toplam maliyeti açısından CBBA'dan daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Bu süreç, İHA'ların görevler arasındaki sinerjiyi daha etkili değerlendirmesine olanak tanır ve maliyetlerin düşürülmesini sağlar. Simülasyon sonuçları, önerilen algoritmanın CBBA'ya kıyasla daha düşük toplam maliyetlerle görev atama yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir.

Şekil 5'ten ise önerilen algoritmanın problemi çözebilmek için CBBA algoritmasına kıyasla daha fazla mesaj gönderdiği gözlemlenmektedir. Görev sayısı arttıkça her iki algoritmanın da mesaj sayısında bir artış görülmesine rağmen, önerilen algoritmanın gönderdiği mesaj sayısının daha yüksek olduğu belirgindir. Bunun temel sebebi, iki aşamalı açık artırma prosesinin, İHA'ların görevler arasındaki sinerjiyi değerlendirebilmesi için daha fazla veri alışverişi yapmasını gerektirmesidir. Bu durum, önerilen algoritmanın İHA'lar arasında daha fazla iletişim gerektirdiğini göstermektedir.



Şekil 4: Toplam mesaj sayısı karşılaştırması

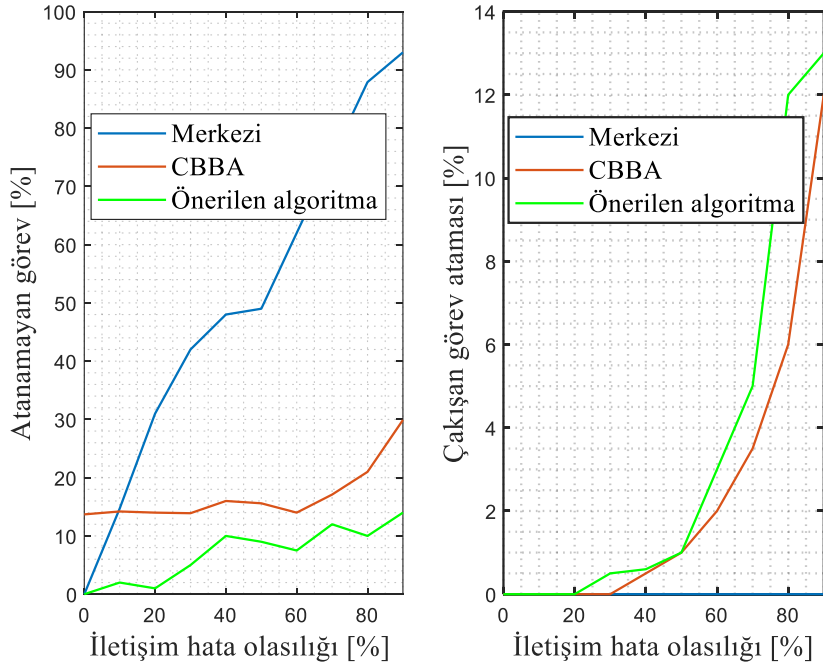


Şekil 5: Toplam maliyet karşılaştırması

Limitli haberleşme altında benzer algoritmalar ile karşılaştırma

Bu bölümde önerilen algoritmanın atama performansı, Bernoulli iletişim modeli kullanılarak bazı mesajların iletilmeyeceği senaryo altında Merkezi Macar ve CBBA algoritmalarına karşı değerlendirilmiştir. Mesajın iletilmemesi olasılığı değişen (%0, %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70, %80, %90) simülasyonlar yapılmış ve algoritmalar atanmamış görevlerin sayısı ve çakışan görev sayısına göre karşılaştırılmıştır.

Şekil 6, sınırlı iletişim koşulları altında 5 İHA arasında 10 görevin atanmasına ilişkin simülasyonunun sonuçlarını göstermektedir. Görevlerin tek bir ajan tarafından atandığı merkezi atamada, iletişim hatalarındaki olası artışlara rağmen çakışan görev ataması mevcut değildir. Ancak merkezi temsilciyle iletişim kuramayan ajanların sayısı arttıkça atanmamış görevlerin sayısı da artmaktadır. Bunun aksine, CBBA'da, iletişim hatası olasılığının yüksek olmasına rağmen atanmamış görevlerin sayısında kayda değer bir değişiklik yoktur. Üstelik fikir birliğine dayalı atama yaklaşımı nedeniyle, yüksek hata oranlarına rağmen çakışan görev sayısındaki dalgalanma minimum düzeyde kalmaktadır. Önerilen algoritma, yüksek iletişim hata oranlarına rağmen atanmamış görev sayısını kabul edilebilir sınırlar dahilinde tutsa da, bir fikir birliği aşamasının olmaması, iletişim hata olasılığı arttıkça çakışan görev atamalarında artışa neden olmaktadır.



Şekil 6: Limitli haberleşme altında atanamayan görev ve çakışan atama karşılaştırması

SONUÇ

Bu çalışmada, heterojen İHA sürülerinde görev atama problemini ele alan ve dağıtık bir çözüm öneren açık artırma tabanlı bir algoritma geliştirilmiştir. Önerilen algoritma, görev maliyetlerini minimize ederken hava araçlarına eşit iş yükü dağılımını sağlamak amacıyla iki aşamalı açık artırma prosesi kullanmaktadır. Algoritmanın performansı Monte Carlo simülasyonları ile değerlendirilmiş ve optimal çözüme yakın sonuçlar elde edilmiştir. CBBA algoritması ile karşılaştırıldığında, önerilen algoritmanın toplam görev maliyeti açısından daha iyi performans sergilediği, ancak daha fazla iletişim gerektirdiği gözlemlenmiştir. İletişim hatalarının yüksek olduğu senaryolarda, önerilen algoritmanın çakışan görev atama oranının arttığı belirlenmiştir. Bu durum, önerilen algoritmanın özellikle düşük iletişim hatası oranlarına sahip ortamlarda etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda, iletişim hatalarının etkisini azaltmak ve çakışan görev atama oranını düşürmek amacıyla algoritmaya bir konsensüs aşaması eklenecektir.

Kaynaklar

- Bell, B., 2022. *Countering Swarms: Strategic Considerations and Opportunities in Drone Warfare*, Forum JFQ 107, 4-14.
- Chen, C., Zheng, Z., Xu, T., Guo, S., Feng, S., Yao, W., Lan, Y., 2023. *YOLO-Based UAV Technology: A Review of the Research and Its Applications*, Drones, 7(3). <https://doi.org/10.3390/drones7030190>
- Choi, H.-L., Brunet, L., How, J. P., 2009. Consensus based decentralized auctions for robust task allocation. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(4), 912–926.
- Erten, K., Saraç, T., Özçelik, F., 2021. A simulated annealing algorithm for the multi resource generalized assignment problem with eligibility constraint. *Gazi University Journal of Science*, 385–401.
- Fu, X., Pan, J., Gao, X., Li, B., Chen, J., Zhang, K., 2018. *Task Allocation Method for Multi-UAV Teams with Limited Communication Bandwidth*, International Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision.
- Gerkey, B. P., Mataric, M. J., 2004. *A formal analysis and taxonomy of task allocation in multirobot systems*, International Journal of Robotics Research, 23(9), 939–954. doi:<https://doi.org/10.1177/0278364904045564>
- Kuhn, H. W., 1955. *The hungarian method for the assignment problem*, Naval Research Logistics, 83–97.
- Laarni, J., Vaatanen, A., Karvonen, H., Lastusilta, T., Saffre, F., 2022. *Development of a concept of operations for a counter-swarm scenario*, International Conference on Human-Computer Interaction.

- Phadke, A., Medrano, F., Sekharan, C, Chu, T., 2024. *An analysis of trends in UAV swarm implementations in current research: simulation versus hardware*, Drone Systems and Applications, 12(1).
- Qib, D., Ningfei, W., Jianqiao, Y., 2013. *Cooperative task assignment of multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles using a modified genetic algorithm with multi-type genes*, Chinese Journal of Aeronautics, 26(5), 1238–1250.
- Skaltsis, G. M., Shin, H.S., Tsourdos, A., 2021. *A survey of task allocation techniques in MAS*, International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 488- 497.
- Weide, S.A., 2008. *Dynamic Task Allocation in Mobile Robot Systems Using Utility Functions*, M.S. thesis, Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Central Florida.
- Yan, S., Pan, F., Zhang, D., Xu, J., 2022. *Research on task reassignment method of heterogeneous UAV in dynamic environment*, 6th International Conference on Robotics and Automation Sciences.
- Yeşilay, B., Macit, A., 2020. *Dünyada ve Türkiye’de drone ekonomisi: geleceğe yönelik beklentiler*, Beykoz Akademi Dergisi, 8(2), 239–251.
- Zielinski, T., 2021. *Factors determining a drone swarm employment in military operations*, Journal of Safety & Defense.
- Zlot, R. M., 2006. *An auction-based approach to complex task allocation for multirobot teams*, Doctoral dissertation, Carnegie Mellon University.