

Farklı Topolojiler Altında Robotik Kablosuz Sensör Ağlarında Sınırlı Kapasiteli Bataryalı bir İHA Aracılığıyla Verimlilik ve Enerji Farkında Veri Toplama

Efficiency and Energy-Aware Data Collection via a UAV with Limited Capacity Battery in Robotic Wireless Sensor Network under Various Topologies

Ömer Melih Gül^{1,2,*}, Aydan Müşerref Erkmen¹
ID 0000-0002-0673-7877 ID 0000-0002-5194-1121
¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ)
omgul@metu.edu.tr, aydan@metu.edu.tr

²Bilişim Enstitüsü
İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ)
omgul@itu.edu.tr

Özet

Enerji farkında veri toplama, robotik ve kablosuz sensör ağları için büyük önem taşır. Statik havuz destekli küme tabanlı protokoller enerji açısından verimli çözümler sunsa da, insansız hava aracı (İHA) destekli yaklaşımlar, statik havuzlara kıyasla veri toplama sırasında enerji tüketimini azaltmak için daha iyi alternatifler olarak düşünülebilir. Mevcut İHA odaklı çözümlerin çoğu, pratik bir şekilde dikkate alınması gereken İHA'nın pil kapasitesi üzerinde bir sınır dikkate almamıştır. Bu makale, robot ağı kümelerinde enerji farkında veri toplamayı incelemektedir. Her kümede, bir küme başı (KB) robotu, her küme üyesi (KÜ) robotuna bir işbirlikçi görev atar ve KÜ'lerden veri toplarken, bir İHA, pil sınırlaması nedeniyle KB robotlarının bir alt kümesini ziyaret ederek onlardan veri toplar. Son durumu tamamlamak için, İHA'nın KB alt kümesini ziyaret etme kararı, artık pil kapasitesi ve tüm KB robotlarının konumları ve veri kaliteleri dahil olmak üzere birden fazla faktörle sınırlıdır. Ziyaret edilmeyen KB robotları, veri iletimi için röle düğümleri olarak KB robotlarını kullanır. Bunu takiben, bu makale, veri atlama kısıtlamaları altındaki problemi ele alarak, farklı topolojilerde ve farklı sayıda KB robotu ile bir hassasiyet analizi de sunmaktadır. Simülasyonlar, önerilen politikanın sıfır toplam ortak maliyete ulaştığını, en son yaklaşımların ise önemli ölçüde yüksek toplam ortak maliyetlere yol açtığını göstermektedir. Dahası, önerilen politika, toplam ortak maliyeti geleneksel yaklaşımlara kıyasla %50'ye kadar azaltmaktadır.

Anahtar kelimeler: insansız hava aracı, yol planlama, kablosuz sensör ağı

Abstract

Energy-aware data collection is of paramount importance for robotic and wireless sensor networks. Although static sink-aided cluster-based protocols provide energy-efficient solutions, unmanned aerial vehicle (UAV)-aided approaches can be considered as better alternatives to reduce energy

consumption while data acquisition compared with static sinks. Most of the existing UAV-driven solutions have not considered a limit on the battery capacity of the UAV, which needs to be considered in a practical manner. This article investigates energy-aware data collection in robot network clusters. In each cluster, a cluster head (CH) robot allocates one collaborative task to each cluster member (CM) robot and collects data from CMs whereas a UAV collects data from CH robots by visiting a subset of them due to its battery limitation. To complement the state-of-the-art, UAV decision for visiting the subset of CHs is constrained to multiple factors including residual battery capacity, as well as locations and data qualities of all CH robots. Nonvisited CH robots use CH robots as relay nodes for data forwarding. Following upon this, by considering the problem under data hopping constraints, this article also presents a sensitivity analysis under different topologies with various number of CH robots. Simulations show that the proposed policy achieves zero total joint cost whereas the state-of-the-art approaches result in significantly high total joint costs. Furthermore, the proposed policy reduces the total joint cost by up to 50% with respect to the conventional approaches.

Keywords: unmanned aerial vehicle, path planning, wireless sensor networks

1. Giriş

Nesnelerin İnterneti (IoT) fikri, dijital ve fiziksel alanları birbirine bağlamak için büyük bir vaat taşımaktadır. Bir IoT çerçevesinde, kablosuz sensörler [1] genellikle etkili veri toplama ve taşımayı etkinleştirmek için her cihaza yerleştirilir [2]. Kablosuz sensör ağı (KSA), akıllı tarım, akıllı şehirler, don izleme, ortam havası izleme, sağlık izleme ve diğerleri dahil olmak üzere çeşitli alanlarda uygulamalara sahiptir [3], [4]. WSN ve robotlar, onlarca yıldır derinlemesine bağımsız araştırmaların odak noktası olmuştur. Robotik ve KSA'nın birleştiği noktada, robotik kablosuz sensör ağı (RKSA) [5] olarak bilinen, robotların ve KSA'nın kişisel dezavantajlarını telafi etmeye yardımcı olmak için çeşitli araştırma fırsatları vardır. Robotlar, KSA'lara sensör bakımı-onarımı ve pil şarjı

konusunda yardımcı olabilir [6]. Robotlar ayrıca veri taşıyıcı olarak da hareket edebilir, ancak bu, verilerin büyük mesafeler boyunca seyahat etmesine neden olabilir. Bu bekleme sürelerini kısaltmak için, [7]'deki çalışmada veri taşıyıcıları arasında bir kümeleme tekniği önerilmektedir. KSA, robotikte robot yerleştirme, planlama, haritalama ve yol algılamayı etkinleştirmek için kullanılabilir. Otonom sürüş, askeri kullanım, madencilik, sağlık hizmetleri, arama ve kurtarma, trafik izleme, hava durumu tahmini gibi sayısal uygulama alanları, KSA'lar ve robotların birleşimiyle olası hale gelir [5]. Genel enerji tüketimini düşürme girişiminde, araştırmacılar son zamanlarda mobil lavabolarla enerji farkında veri toplama sorununu incelediler [8]- [10]. Literatürdeki birçok çalışma, bu problemleri gezgin satıcı problemi (GSP) [11] açısından ele almaktadır; burada mobil lavabo, veri edinmek için sabit bir KB düğüm yüzdesini ziyaret etmek için yeterli enerjiye sahiptir. Bununla birlikte, pil kapasitesi KB robotlarının konumlarına göre değiştiği için belirli bir KB düğüm yüzdesini ziyaret edemez. Bir İHA'nın pil kalıntı kapasitesi kısıtlaması problemini ele alarak ve sezgisel bir çözüm sunarak, [12]'deki çalışma bu boşluğu kapatır; yine de, bu tür evrimsel algoritma tabanlı yöntemler yavaştır. Bu nedenle, bu sorunu ele almak için güvenilir ve etkili yollara ihtiyaç var. Pil kapasitesine sahip İHA'nın, her kümenin sensörler, KÜ robotları ve KB robotlarından oluştuğu kümelenmiş robot ağını ziyaret ettiği veri toplama sorununu araştırılmaktadır. KÜ robotlarının her birine bir KB robotu tarafından bir görev verilir. Tam şarjlı bir pille bile, bir İHA'nın sınırlı kalan enerjisi, her robotun konumuna bağlı olarak her KB robotunu ziyaret etmesini engelleyebilir. Bu koşullarda, her KB robotunu ziyaret etmek için gereken enerji, İHA'nın pil ömrünü aşmaktadır. Sorunumuz pille sınırlıdır, yani İHA, ünlü NP-hard GSP [11] mimarisinin aksine, her KB robotunu ziyaret etmek için gerçekten yeterli pil kapasitesine sahip olamaz. Ayrıca ziyaret edilmeyen KB robotlarının genel enerji tüketimini de dahil edilmektedir. Pil ömrü her KB robotunu ziyaret etmesini engellediği için, İHA, ziyaret edilmeyen bir KB robotundan diğerine veri aktarmak için veri atlama kullanır.

1.1. Motivasyon (Güdüleme)

Son yıllardaki gelişmelerle beraber birçok uygulama alanı bulunan robot ağlarındaki robotların batarya değişimi (çevresel zorluklara bağlı olarak) zor olduğundan enerji tüketiminde dikkatli olmak gerekir. Bu nedenle bu robot ağlarında küme başı robotları diğer robotların tamamladığı görevler sonucu oluşan veriyi yukarı değerlendirir ve son veriyi üst seviyedeki veri merkezine iletir. Bu veri merkezi, eski çalışmalarda durgun olarak düşünülürken robot ağlarındaki kümebaşlarının enerji tüketimini azaltmak için yeni çalışmalarda hareketli (mobil) olarak düşünülmektedir. Mobil bir veri toplama merkezi küme başı robotların tamamını ya da bir kısmını ziyaret ederek küme başı robotların daha yakın mesafeden veri merkezine veri iletmesini ve böylece enerji tüketimlerini azaltmayı amaçlamaktadır. İlgili literatürde farklı çalışmalarda, robotik ve kablosuz sensör ağlarında İHA ile veri toplarken İHA'nın enerji verimliliğini en iyiye yakın sağlayabilen çözümler önerilmiştir ama bu algoritmalar metasezgisel algoritma tabanlı olması nedeniyle biraz yavaş çalışabilir. Bu makalenin amacı, robotik ve kablosuz sensör ağlarında çok önemli olan bir mobil veri merkezi (insansız hava aracı) aracılığıyla veri toplama problemini incelemektir ve ilgili literatüre göre daha hızlı bir çözüm elde edilmesini sağlamaktır. Bir İHA, KB robotlarının genel enerji tüketimini azaltmak için

bir grup KB robotunu ziyaret eder (ilgili literatürün aksine, tüm KB robotlarından veya yarısından farklı olabilir), İHA'nın hangi robotları ziyaret edeceğine karar verirken konumları ve pil ömrü dikkate alınır. Bu makalede, En Yakın Komşu Algoritmasına dayalı yeni yaklaşımımız Algoritma yalnızca benzer toplam enerji tüketimini elde etmekle kalmaz, aynı zamanda genetik algoritma tabanlı yaklaşımlardan yaklaşık otuz kat daha hızlı performans göstermektedir.

1.2. Ana Katkılar

Bu çalışma literatüre şu şekilde katkıda bulunmaktadır:

- Bu makale, her robotun veri toplama problemi içindeki konumunu ve İHA'nın kalan enerji kısıtlamasını ele almaktadır.
- Bu makalede, konumlara ve İHA'nın KB robotlarının bir alt kümesini ziyaret etme niyetine dayalı bir çözüm önerilmektedir. Bu çözüm yönteminin, ziyaret edilmeyen her KB robotu için en uygun veri gönderme protokollerini de içerdiği gösterilmiştir. Ayrıca, önerilen yaklaşımın, bir İHA'nın genel enerji tüketimini azaltmak için bir KB robot grubunu ziyaret ettiğinde ne kadar iyi çalıştığını tartışılmaktadır.
- Bu makale, veri atlama kısıtlamaları altındaki problemi ele alarak, farklı topolojilerde ve farklı sayıda KB robotu ile bir hassasiyet analizi de sunmaktadır.

1.3. Teşkil

Bu araştırma makalesinin raporu geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir. Bölüm 2, ilgili literatürü vermektedir. Bölüm 3 ele alınan problemi ve sistem modelini açıklamaktadır. Bölüm 4'te hem İHA'lar hem de KB robotları tarafından tüketilen enerjiyi dikkate alan düşük karmaşıklıkta yeni bir yöntem önerilmektedir. Bölüm 5'te verilen stratejileri sayısal performansları açısından değerlendirilmektedir. Bölüm 6, makalenin sonuçlarını ve gelecekteki çalışmalar için önerileri sunmaktadır.

2. İlgili Literatür

Statik bir havuzla enerjiye duyarlı veri toplama problemi ilk kez [31] çalışmasında ele alındı; burada kablosuz sensör ağı, sensörlerden veri toplamak ve statik havuza iletmek için bir küme başı seçilerek kümelendirilir. [17] çalışmasında LEACH protokolünün farklı varyantları sunulmaktadır. [18], [19] ve [20]'deki çalışmalar, su altı kablosuz sensör ağlarında enerjiye duyarlı veri toplama problemini ele alan üç yeni çalışmadır. Bir grup KB robot, sınırlı pil ömrüne sahip bir İHA'ya veri gönderir. Sonuç olarak, enerji verimliliğini dikkate alan mobil havuzlarla yönlendirme için kullanılan temel yöntemlerin bir özetini sunuyoruz. Problemin formülasyonumuz, hedefin bir yol uzunluğu kısıtlamasını hesaba katarak maksimum ödül elde etmek olduğu klasik oryantiring problemine (OP) [21] benzerdir. Bazı araştırma çalışmaları farklı KB robotlarının elde ettiği veri kalitesindeki farklılıkları da dikkate aldığından, OP'yi inceleyen diğer araştırmaları incelenmektedir. [22]'de yazarlar, mobil alıcının bir veya daha fazla siteyi seçebileceği ve yörünge planlamasıyla veri toplamaya orada başlayabileceği EAPC algoritmasını kullanan bir veri toplama tekniği sunmaktadır. Çalışma, EAPC'nin ağırlıklı buluşma noktaları (ABN)'dan az enerji yoğun olduğunu ileri sürmektedir. Çalışma [24], buluşma sensörlerinin yükünü dengeleyen ve çoklu hedefli parçacık sürüşü optimizasyonu kullanarak rotayı azaltan enerji açısından verimli yörünge planlama (EETP) için bir teknik sunar. EETP'nin daha az enerji kullandığı ve

ABN'den daha uzun bir ağ ömrüne sahip olduğu bildirilmektedir. Tek bir mobil alıcı, sensör verilerini toplamak için buluşma sitelerini (RP) ziyaret eder, [25]'te mevcut yaklaşımlardan daha düşük bir yörünge uzunluğuna sahip PSO tabanlı RP seçim yöntemini sunar. Benzer bir paradigmayı kullanarak, [26]'nın yazarları ağ ömrünü artırmak için yüksek seviyeli bir sezgisel yöntem önermektedir.

[27], bu sorun için KSA ve İHA odaklı çözümler önermektedir. Sensörler, verileri KB'sine göndermek için KSA odaklı bir yöntem kullanır. İHA daha sonra KB'den KB'ye hareket ederek veri toplar. Bilgileri lavaboya göndererek, İHA odaklı strateji işlev görür. Sonuç olarak, İHA yalnızca lavaboya ziyaret eder, uçuş süresinden tasarruf sağlar ancak sistemin genel enerji tüketimini artırır.

Bu probleme yönelik literatürdeki çözümlerin çoğu, sınırsız pil kapasitesine sahip mobil lavaboları içerir. Geleneksel modellere göre, lavabo önceden belirlenmiş bir seçime bağlı olarak tüm KB düğümlerini veya yarısını ziyaret edebilir. Bununla birlikte, İHA'nın aynı sayıda KB düğümüne ulaşması için, farklı ağ topolojileri farklı enerji gereksinimlerine neden olur. İHA'nın enerji gereksinimi pil kapasitesinden fazlaysa, İHA kalan enerji kısıtlaması nedeniyle görevini tamamlayamayabilir. [12]'deki önceki çalışma, bu sorunu sınırlamak için İHA'lar için sınırlı pil kapasitesini de ele alarak literatürdeki bir boşluğu doldurur. Benzer sorun, birkaç KB robot öncelik listesini hesaba katarak [14]'te ele alınmıştır. Sorun daha sonra yayında [13] çeşitli KB robotları için çeşitli veri kaliteleri dikkate alınarak ele alınmıştır. Daha sonra, [15] aynı sorunu aynı atlama kısıtlamalarıyla inceler.

Uçak seyir kontrolü ve ağ veri kaybını önlemek için veri toplamanın ortak bir optimizasyon sorunu [28]'de ele alınmıştır, burada İHA herhangi bir IoT düğümünün durumunu bilmeyen POMDP olarak işlev görmektedir. Bu araştırma, verileri planlamak için derin Q-ağ tabanlı bir teknik ve ağ durumlarının güncel olmaması durumunda İHA optimizasyonu sunmaktadır. Bu çalışmada, veri toplama sırasında tüm KB robotları için aynı veri kalitesiyle İHA'nın pil kapasitesi ve KB robotlarının harcadığı enerji üzerindeki bir kısıtlamayı ele alıyoruz. Veri kaliteleri farklı KB robotları için farklı olsaydı, araştırılan sorun, kısıtlanmış yol uzunluğuna sahip ödül maksimizasyonu sorunu olarak da adlandırılan ve ilk olarak [21]'de sunulan klasik OP ile karşılaştırılabilir olurdu. Belirli bir düğüm kümesi arasındaki en kısa yol, bu düğümler seçildikten sonra belirlenir. OP [29] bu iki süreci birleştirir. Amaç, mobil lavabonun ulaşılabilir her düğümü ziyaret etmek için yeterli zamanı olmadığında belirli düğümleri seçerek genel ödülü en üst düzeye çıkarmaktır.

Son zamanlarda yapılan bir çalışmada [30], İHA yörünge tasarımı problemini OP olarak ele alarak, İHA sınırlı sürede maksimum kullanıcıya hizmet etmek için birçok yerin üzerinden uçar. Bu problemi karma tamsayı doğrusal programlama problemi olarak formüle eder; ardından açgözlü bir çözüm sunar. Önerilen yöntemin ne kadar hızlı ve neredeyse mükemmel bir şekilde performans gösterdiğini gösterilmektedir.

Sınırlı kapasiteli pille çalışan İHA'mız, ziyaret edilecek bir KB robot kümesini seçmek için yenilikçi ve sağlam bir teknik kullanır ve böylece ziyaret edilmeyen KB robotlarının ziyaret edilen bir KB robotuna ulaşana kadar başka bir ziyaret edilmeyen KB robotuna veri aktarması için kullanılan genel enerjiyi azaltır. Bu makalede, hangi KB robotlarına karar verirken pil kapasitesini, her KB robotunun konumunu ve veri kalitelerini dikkate alınır.

3. Sistem Modeli ve Problem Tanımı

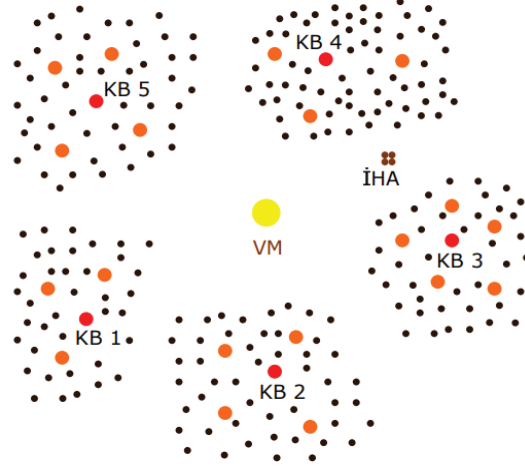
Bu bölüm problemimizi tanımlamaya odaklanmakta ve sistem yaklaşımımızı oluşturmaktadır.

3.1. Sistem Modeli

Burada motive edici bir senaryo sunulmaktadır ve problemi bu motivasyona dayanarak formüle edilmektedir.

Bu makalede, M kümelenmiş bir robotik ağ ve sınırlı kapasiteli bataryaya sahip bir İHA'yı ele almaktadır. Bu ağ, çevreyi izleyen sensörlerden veri toplamaktan sorumludur.

Her kümede, bir küme başı (KB) robotu, atanan görevleri yürüten ve elde edilen verileri (çevre izleme verileri) kendi KB robotlarına gönderen küme üyesi (KÜ) robot düğümlerine görevler tahsis eder. KB robotları, CM robotlarından verileri toplayarak İHA'ya göndermekten sorumludur. İHA, konumlarına, veri verimliliklerine ve batarya kapasitesine bağlı olarak KB robotlarının değişen bir bölümünü ziyaret eder (Şekil 1). İHA her KB robotunu ziyaret etmediği sürece, ziyaret edilmeyen her KB robotu verilerini birden fazla atlama yoluyla ziyaret edilmeyen bir komşu KB'ye gönderir.



Şekil 1: KB robotlarının endeks kümesini belirtir. B, İHA'nın pil kapasitesini belirtir. KB robotları, verilerini toplamak ve iletmek için büyük miktarda enerji tüketir.

KB robotları, İHA tarafından ziyaret edilmedikleri takdirde, verilerini toplayıp komşu KB robotlarına veya İHA'lara iletmek için büyük miktarda enerji tüketir. Bir KB robotu KÜ robotu gibi hareket ederse, o KB robotunun bataryasında kalan enerji hızla kritik enerji seviyesinin altına düşer ve bu da çok fazla enerji ve zaman tüketen sık KB seçimine neden olur. Bu nedenle, KÜ robotlarına çok verimli bir şekilde görev atayan KB robotlarının KB robotu olarak hizmet vermeyi bırakmasına neden olabilir. Dolayısıyla, aşağıdaki varsayım yapılmıştır. Ek enerji tüketiminden kaçınmak için, KB robotları KB olarak çalışırken hareket etmezler. Her KB robotunun, İHA'ya göndermek veya başka bir KB robotuna gecikme olmadan iletmek için aynı miktarda verisi vardır.

$\xi_0 = (x_0, y_0)$, İHA'nın başlangıç konumunu belirtir. $\xi_i = (x_i, y_i)$, KB robot i'nin konumunu belirtir. İHA'nın kat ettiği mesafeyle orantılı enerji tükettiğini varsayıyoruz.

KB robot i'den j'ye kadar enerji tüketimi şu şekilde tanımlanır:

$$E_{UAV}(i, j) \triangleq C_{UAV} \|\xi_i - \xi_j\|$$

$$= C_{UAV} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

Burada C_{UAV} , kat ettiği mesafe ile İHA tarafından tüketilen enerji arasındaki sabit orandır. Diğer yandan, bir KB robotunun tükettiği enerjinin, kendisi ile bir sonraki sıçrama arasındaki mesafenin karesiyle orantılı olduğunu varsayılmaktadır. Örneğin, KB robot i'nin KB robot j'ye veri göndermek için tükettiği enerji şu şekilde tanımlanır:

$$E_{CH}(i, j) \triangleq C_{CH} \|\xi_i - \xi_j\|^2 \\ = C_{CH} [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]$$

Burada C_{CH} , bir KB robotunun enerji tüketimi ile bir sonraki atlama noktası arasındaki mesafenin karesi arasındaki sabit orandır. İlgili literatür, her KB düğümünün verilerini baz istasyonuna ve İHA'nın başlangıç konumuna iletmek için yeterli enerjiye sahip olduğunu varsayar. İHA, yol boyunca bir KB robotunun yakınından geçebilir. En kötü durumda, bazı KB robotları, yörüngeye başlamadan önce baz istasyonunda duran İHA'ya verilerini gönderebilir.

İHA baz istasyonundaki başlangıç konumunda duruyorsa, KB robotları verilerini doğrudan İHA'ya göndermek için yeterli enerjiye sahiptir. KB robotları, verileri İHA'ya veya başka bir KB robotuna sabit bir hızla gönderir.

3.2. Problem Tanımı

Sınırlı kapasiteli batarya ile İHA'nın uçuş rotasını planlamayı hedeflenmektedir. Optimum uçuş rotası planlamasıyla İHA, veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyetini en aza indirmeyi hedeflenmektedir. Problemimizi doğru bir şekilde formüle etmek için aşağıdaki tanımları yapılmaktadır.

Tanım 1. İHA'nın stratejisi, π , İHA'nın veri toplamak için izlediği doğrusal yollar kümesi olarak tanımlanır, yani $\pi \subseteq P$.

Tanım 2. π stratejisine sahip İHA'nın enerji tüketimi, E_{UAV}^π , π stratejisine sahip İHA tarafından tüketilen enerjidir, yani örn.,

$$E_{UAV}^\pi \triangleq \left[\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M C_{UAV} \|\xi_i - \xi_j\| I_{\{p(\xi_i, \xi_j) \in \pi\}} \right]$$

$I_{\{X\}}$, X doğru olduğunda 1 olan bir gösterge fonksiyonudur.

Tanım 3. π stratejisi altındaki ziyaret edilmemiş KB robotları kümesi, π stratejisi altındaki ziyaret edilmemiş KB robotları kümesi olarak tanımlanır ve S_{non}^π ile gösterilir.

Tanım 4. π stratejisi altındaki KB robotu i'nin verilerini iletmek için tüketilen enerji, $E_i^\pi(u_i)$ ile gösterilir, ziyaret edilmemiş KB robotu i'nin veri iletmeye stratejisi u_i olan ziyaret edilmiş bir KB robotuna birim verileri iletmek için tüketilen enerjidir.

Problemimizde, tüm KB robotları, kümelerindeki diğer küme üyesi (KÜ) robotlarından veri toplar ve bu CM robotları sensörden veri toplayabilir. Çevrelerindeki düğümler. Burada, verilerin kalitesi farklı bölgelerdeki sensörlere ve CM robotlarına bağlı olarak değişebilir. Her KB robotu, CM üyelerinden farklı kalitede veri toplayabildiğinden, her KB robotu topladığı verileri değerlendirdikten sonra verilerin verimliliği farklı KB robotları için farklı olabilir. Bu çalışmada, hem KB robotları tarafından tüketilen enerjiyi hem de KB robotlarındaki verilerin kalitesini ele alıyoruz. Bu nedenle aşağıdaki tanım yapılmaktadır.

Tanım 5. KB robot i'nin veri verimliliği η_i ile gösterilir ve KB robot i tarafından değerlendirilen verilerin kalite ölçüsüdür; 0 (%0 verimlilik) ile 1 (%100 verimlilik) arasında bir değer alır.

Tanım 6. $J(u, \pi)$ ile gösterilen stratejiler altında KB robotlarının toplam maliyeti şu şekilde tanımlanır:

$$J(u, \pi) \triangleq \sum_{i \in S_{non}^\pi} (\eta_i \times E_i^\pi(u_i))$$

Problem 1. Sınırlı kapasiteli bataryaya sahip İHA ile ziyaret edilmeyen KB robotlarının toplam ortak enerji tüketim maliyetini ve veri verimliliğini en aza indirme

$$\min_{\pi, u \subseteq P} J(u, \pi) \\ s.t. \quad E_{UAV}^\pi \leq B$$

Bu problemde, İHA'nın her bir KB robotunu ziyaret etmek için yeterli pil kapasitesi yoksa, İHA, veri iletimi için birbirlerine yakın enerji tüketen KB robotları arasında, kümelerinden toplanan verinin verimliliği daha düşük olan KB robotlarını ziyaret etmekten vazgeçme eğilimindedir. Başka bir deyişle, İHA, KB robot i'nin veri verimliliği ve enerji tüketiminin birleşik maliyeti KB robot j'den daha düşükse, daha düşük veri verimliliğine sahip daha uzaktaki KB robot i'yi ziyaret etmekten vazgeçer; bu problemi ilgili literatürdeki problemlerden ayırır.

4. Önerilen Yaklaşım

Öncelikle, her bir KB robotunu ziyaret etmek için yeterli minimum pil kapasitesini bulmak amacıyla bir gezgin satıcı problemi (GSP) olarak modelleyerek bu problemi ele alınmaktadır. Bu pil kapasitesini bulmak için problem NP-zor bir problem olan GSP (faktöryel karmaşıklıkta çözümü olan) ele alınıp genetik algoritma (GA) uygulanmaktadır [31]. GA, 100'den az düğümlü durumlarda bir GSP problemi için eniyi çözümü pratik verebilir. Ama özellikle 200'den fazla düğümlü oldukça geniş durumlarda GA, en iyi altı başarımları gösterir. [32]. Bu veri toplama problem için, KB düğümlerinin tüm düğümlere en uygun oranının %3 ile %5 arasında olması gerektiğini gösterir [33]. [34] ise bu problemi gezgin bir veri toplayıcı kullanarak ele alırken bu oran için %1-%5 aralığını kullanır. [35], bu oranın %6 olduğunu belirtir. Bu nedenle, bu makalede bu oran yaklaşık 5% alınır; bu durumda 100 KB robotun olduğu durum, toplamda 2000 KÜ robotunun olduğu durum anlamına gelir; bu oldukça büyük bir robotik ağ sistemidir. 2000 robottan daha büyük bir robot ağı için bugünün pratik koşullarında finansal maliyette düşünüldüğünde pek mümkün değildir. Bu durumda GA eldeki GSP problem için etkili bir çözüm üretir.

İHA, ziyaret edilecek KB robotlarının optimal bir alt kümesini seçerek, ziyaret edilmeyen KB robotlarının veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyetlerini en aza indirmeyi hedeflenmektedir. Bu robotlar, ziyaret edilen bir KB düğümüne ulaşana kadar diğer ziyaret edilmeyen KB'ler üzerinden birden fazla atlama yaparak veri iletecek. Bu bölüm, yalnızca İHA'nın pil kapasitesindeki ve KB robotlarının veri iletmeye için tükettiği toplam enerjideki kısıtlamayı değil, aynı zamanda farklı KB robotları için farklı veri verimliliklerini de ele alınmaktadır.

4.1. KB Robotları için Veri İletme Stratejisi

Ziyaret edilen bir KB robotu i, veri iletmeye stratejisine ihtiyaç duymaz ve bu nedenle $u_i = 0$. Ancak, ziyaret edilmeyen bir KB robotu i, ziyaret edilen her KB robotuna en kısa yolu aramalı ve en azını kullanmalıdır (KB robotları arasında en kısa yolları bulmak için KB robotları arasında mesafelerin kareleri dikkate alınır.). Bu nedenle, en iyi veri iletmeye stratejileri elde edebilirler. Ziyaret edilmeyen her KB robotunun, ziyaret edilen her KB robotunu olası hedef olarak gördüğü dikkate edilmelidir. Ziyaret edilmeyen robotlar verilerini diğer robotlara En Kısa Yol yaklaşımıyla Dijkstra Algoritması ile iletmektedir.

4.2. İHA için En İyi Strateji

İHA, her bir KB robotunu ziyaret etmek için yeterli pil kapasitesine sahip olmadığında, hem İHA tarafından tüketilen

enerjiyi hem de ziyaret edilmeyen her KB robotunun tükettiği enerji ve veri verimliliği maliyeti en azaltma düşünülmelidir.

B_{TSP} , her bir KB robotunu ziyaret etmek için yeterli minimum pil kapasitesini gösterebilir. Pil kapasitesi $B < B_{TSP}$ olan bir İHA, bazı KB robotlarını ziyaret etmeden gitmeyi gerektirir. Problemimiz, ziyaret edilmeyen KB robotlarının tükettiği enerji ve veri verimliliği maliyetinin toplamını en azaltmak için, bu KB robotlarını ziyaret etmeden gidecek KB robotlarını seçmektir. Bu probleme önerilen Algoritma 1'i daha iyi açıklamak için Tanım 7 yapılmaktadır.

Tanım 7. KB robotlarının K-eleman kombinasyonları, S_a^K ile gösterilir ve tüm KB robotlarının M-eleman kümesinin K-eleman altkümesidir, yani $S_a^K \subseteq S$ ve $1 \leq a \leq \binom{M}{K}$ için $|S_a^K| = K$. $S^K(B)$, pil kapasitesinde İHA'nın ziyaret edebileceği tüm olası K-eleman kombinasyonlarının kümesini gösterir.

Algorithm 1 Verimlilik ve Enerji-Farkında Veri Toplama Stratejisi (VEFVTS)

#Yorum: İHA'nın pil kapasitesi tüm CH robotlarını ziyaret etmek için yeterlidir, yani, $B \geq B_{TSP}$.#

if $B \geq B_{TSP}$ **then**

Problemi GSP olarak ele alarak en iyi stratejiyi arayın.

Çıktı: π^{QEADCS} , GSP için İHA'nın tüm CH robotlarını ziyaret ettiği genetik algoritma tabanlı bir strateji haline gelir.

#Yorum: İHA'nın pil kapasitesi tüm CH robotlarını ziyaret etmek için yetersizdir, yani, $B < B_{TSP}$.#

else

for $K = (M - 1) : 1$ **do**

KB robotlarının tüm $\binom{M}{K}$ kombinasyonlarını bulun.

for $a = 1 : \binom{M}{K}$ **do**

if $\min_{\pi} E_{UAV}^{\pi} \leq B$ **for** S_a^K **then**

Yorum: S_a^K , bataryasında B enerjiye sahip olan İHA'nın ziyaret edebileceği olası (feasible) bir kümedir. #.

$S_a^K \subset S^K(B)$

Her KB robotu $i \in S - S_a^K$ için en az (minimum) enerjili en kısa yol stratejisini uygulayın.

$\sum_{i \in S - S_a^K} \gamma_i^{\pi}$ yi bulun.

else

Yorum: S_a^K kümesi, bataryasında B enerjiye sahip olan İHA'nın tüm CH robotlarını ziyaret edemeyeceği bir olanaksız (infeasible) kümedir. #.

$S_a^K \not\subset S^K(B)$

end if

end for

if $S^K(B) \neq \emptyset$ **then**

$\min_{S_a^K \in S^K(B)} \sum_{i \in S - S_a^K} \gamma_i^{\pi}$ bul.

end if

end for

$\min_K \left[\min_{S_a^K \in S^K(B)} \sum_{i \in S - S_a^K} \gamma_i^{\pi} \right]$ bul.

Çıktı: π^{VEFVTS} , GSP için İHA'nın bir önceki adımda bulunan S_a^K kombinasyonundaki KB robotlarını ziyaret ettiği genetik algoritma tabanlı bir stratejidir.

end if

5. Sayısal Sonuçlar

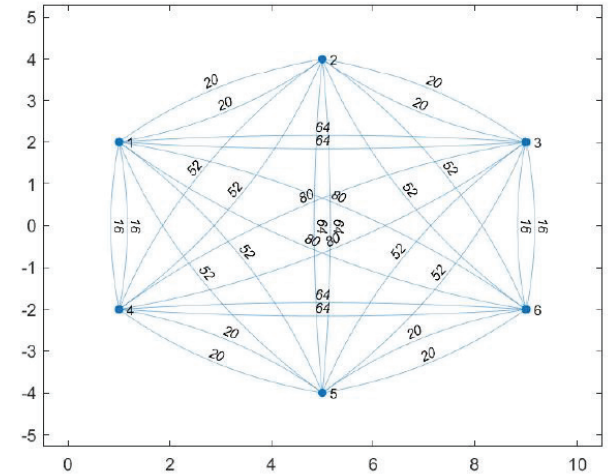
Stratejileri test etmek için çeşitli sayıda KB robotu ve çeşitli derecelerde artık pil kullanılır. Bu problem için statik bir batma ölçütü, KB düğümlerinin en uygun oranının %3 ile %5 arasında olması gerektiğini gösterir [33]. İkinci bir çalışma [34], bu sorunu mobil bir batma kullanarak ele almak için ağdaki KB düğümü kesri için %1-%5 aralığını kullanır. [35], KB düğümlerinin oranının %6 olduğunu belirtir. Sonuç olarak, ilgili çalışmalardaki düğümlerin yaklaşık %5'i KB olarak hizmet etmek üzere seçilir. 6-KB, 8-KB ve 9-KB robotlu üç senaryoyu analiz ediyoruz. Parametre değerini korumak için C_{UAV} ve C_{CH} birimleri bir olarak kabul edilir.

Benzetimlerimizde, her KB robotunun ayrı veri kalitesi vardır. Bu durumlarda, İHA'nın her KB robotunu ziyaret etmek için toplam yörünge uzunluğunun elli birimden az olduğu keşfedilir. Başka bir deyişle, tüm KB robotlarını ziyaret etmek için gereken maksimum pil kapasitesi miktarı $50 \times C_{UAV}$ 'dir. Önceki çalışmalarımızın performanslarını değerlendiriyoruz: [13], [15]'teki QEADCS, [12]'deki GAMEDFS, READCS (bu çalışmada önerilen teknik) ve [27]'deki İHA odaklı yaklaşım.

5.1. Dairesel Topoloji (6-KB Robotlu Durum)

Şekil 2, 6 KB robotunun yerlerini ve aralarındaki bağlantıların ağırlıklarını göstermektedir. Bu senaryoda bir daireysel topoloji incelenmektedir (Bu topolojide KB robotları düzgün çokgen oluşturduğu için bu topoloji daireysel topoloji olarak ele alınmıştır).

KB robotlarının konumları $(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \xi_6) = ((1, 2), (5, 4), (9, 2), (1, -2), (5, -4), (9, -2))$ m'dir; burada (0, 0), İHA'nın başlangıç konumudur. KB robotlarının veri verimlilikleri $(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6) = (0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70)$ m olarak alınmıştır.



Şekil 2: Düğümler, 6 KB robotunun konumlarını gösterir. Bir bağlantının ağırlığı, bağlantıyla birbirine bağlı iki düğüm arasındaki mesafenin karesini gösterir.

5.1.1. İHA-Odaklı Strateji

İHA Odaklı strateji uygulandığında, İHA sadece KB robot 2'yi ziyaret eder ($\xi_2 = (5, -4)$) ve $B = 12.81 \times C_{UAV}$ ise KB robotlarının tüm verilerini oradan toplar; bu sayede, İHA Odaklı strateji altında ziyaret edilmeyen her KB robotunun veri verimliliği ve tükettiği enerjinin toplam birleşik maliyetini aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$J(u, \pi^{UAV-O}) = 162 \times C_{CH}$$

$B = 5, 10$ ise, İHA KB robot 1'e ($\xi_1 = (1,2)$) gidebilir; bu da KB robot 2'den daha yakın bir başlangıç noktasına sahip olur ve bu da şu sonucu verir:

$$J(u, \pi^{UAV-O}) = 180.2 \times C_{CH}$$

5.1.2. GAMEDFS

Bu alt bölümde, Şekil 2'deki yapılandırmada $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar değişen pil kapasiteleriyle ilgili literatürde önerilen GAMEDFS'nin performansına ilişkin sayısal sonuçları elde edilmektedir.

Şekil 3'de, GAMEDFS uygulandığında, $B = 30 \times C_{UAV}$ veya $B = 35 \times C_{UAV}$ veya $B = 40 \times C_{UAV}$ veya $B = 45 \times C_{UAV}$ veya $B = 50 \times C_{UAV}$ 'lı İHA tüm KB robotlarını ziyaret edebilir, yani $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 0$.

Şekil 2'deki yapılandırmada, İHA'nın tüm KB robotlarını ziyaret etmesi için gereken enerji $E_{UAV}^\pi(u) = 26.36 \times C_{UAV}$ 'dir.

$B = 25 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, KB robot 5 ve 6'yı ziyaret etmeden diğer robotları ziyaret eder; $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 26.2 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^\pi(u) = 22.36 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi ile sonuçlanır.

$B = 20 \times C_{UAV}$ 'lı İHA KB robot 3, 5 ve 6'yı ziyaret etmeden diğer robotları ziyaret eder; bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 57.2 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^\pi(u) = 16.16 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi ile sonuçlanır.

$B = 15 \times C_{UAV}$ olan İHA, KB robot 3, 4, 5 ve 6'yı ziyaret etmeden gider ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 76.2 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^\pi(u) = 13.41 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi ile sonuçlanır.

$B = 10 \times C_{UAV}$ olan İHA, KB robot 2, 3, 5 ve 6'yı ziyaret etmeden gider ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 95 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^\pi(u) = 8.47 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi ile sonuçlanır.

$B = 5 \times C_{UAV}$ olan İHA sadece KB 1 robotunu ziyaret eder ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 106.3 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^\pi(u) = 4.47 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi ile sonuçlanır.

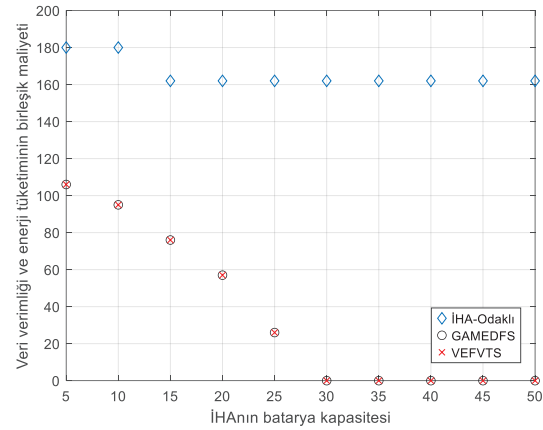
5.1.3. VEFVTS

VEFVTS, Şekil 2'teki yapılandırmada $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar değişen tüm pil kapasitesi değerleri için GAMEDFS ile aynı kararları almıştır. Şekil 3'te VEFVTS, GAMEDFS ve İHA Odaklı Strateji altında veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyeti, $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar İHA'nın pil kapasitesine göre kıyaslanmıştır.

KB 4, tüm KB robotları arasında düşük veri verimliliğine sahip olmasına rağmen, İHA, $B = 5, 15$ hariç düşük pil kapasitesi değerleri için KB 4'ü ziyaret etmeyi tercih eder, çünkü İHA'nın enerji tüketimi için çok önemli olan KB 5, KB 6'dan veri iletebilir. KB 1 en yüksek veri verimliliğine sahip olduğu ve orijine yakın olduğu için, İHA tüm pil kapasiteleri için burayı ziyaret eder.

Tüm KB robotlarının veri verimliliklerinin eşit olması durumunda, GAMEDFS'nin önceki çalışmalarda optimum olduğu gösterilmiştir. $\eta_i = 1 - i/20$ formülüyle üretilen verimliliklerle, stratejilerin performansı hala KB robotlarının konumlarına daha fazla bağlıdır. Bir rotanın İHA'nın pil kapasitesi nedeniyle uygulanabilir olmaması durumunda, ziyaret edilmeyen KB robotlarının veri verimliliğinin toplamını en aza indirmenin önemi kaybolacağından, bu beklenebilir. Burada, KB robotlarının veri verimliliği, KB robotlarının

konumlarının aksine, İHA'nın pil kapasitesinin katı kısıtlaması üzerinde bir etkiye sahip değildir.



Şekil 3: Şekil 2'deki 6 KB robotunun İHA-Odaklı strateji, GAMEDFS ve VEFVTS altında veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyeti, $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar İHA'nın pil kapasitesine göre. İHA'nın enerji tüketimi ve KB robotlarının toplam ortak maliyeti için kullanılan birimler sırasıyla C_{UAV} ve C_{CH} 'dir. Bu sabitler, İHA ve KB robotlarının türüne bağlıdır.

5.1.4. Performans Kıyaslaması

Tablo 1, Şekil 2'de ziyaret edilmeyen KB robotlarının endekslerini sunmaktadır. Benzer şekilde, Tablo 2, ziyaret edilmeyen KB robotlarının toplam ortak enerji tüketimi maliyetini ve veri verimliliğini göstermektedir. Bu tablolardan, Şekil 2'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak bir KB robot alt kümesini ziyaret etmeden nasıl hareket etmeye karar verdiğini gözlemleyebiliriz. Ayrıca, ziyaret edilmeyen KB robotlarının tüketilen enerji maliyeti ve veri verimliliğinin toplamı, İHA'nın pil kapasitesine ve dolayısıyla İHA tarafından verilen vazgeçme kararlarına göre değişmektedir. Ayrıca, ziyaret edilmeyen KB robotlarının ortak maliyetleri, KB robotlarının konumlarına ve veri verimliliklerine bağlıdır.

Tablo 1: Tablo, Şekil 2'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak ziyaret edilmeyen KB robotlarının endekslerini göstermektedir. "Hiçbiri", $B = 30$ veya $B = 35$ veya $B = 40$ veya $B = 45$ veya $B = 50$ ise İHA'nın tüm KB robotlarını ziyaret ettiği anlamına gelir.

Strateji	B=5	B=10	B=15	B=20	B=25
İHA-Odaklı	2-6	2-6	1,3-6	1,3-6	1,3-6
GAMEDFS	2-6	2,3,5,6	3-6	3,5,6	5,6
VEFVTS	2-6	2,3,5,6	3-6	3,5,6	5,6

Strateji	B=30	B=35	B=40	B=45	B=50
İHA-Odaklı	1,3-6	1,3-6	1,3-6	1,3-6	1,3-6
GAMEDFS	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir
VEFVTS	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir

Tablo 2: Tablo, Şekil 2'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak ziyaret edilmeyen KB robotlarının toplam birleşik enerji tüketim maliyetini ve veri verimliliğini göstermektedir. "X", İHA odaklı stratejinin o pil kapasitesi için uygulanamaz olduğunu ifade etmektedir.

Strateji	B=5	B=10	B=15	B=20	B=25
İHA-Odaklı	180.2	180.2	162	162	162
GAMEDFS	106.3	95	76.2	57.2	26.2
VEFVTS	106.3	95	76.2	57.2	26.2

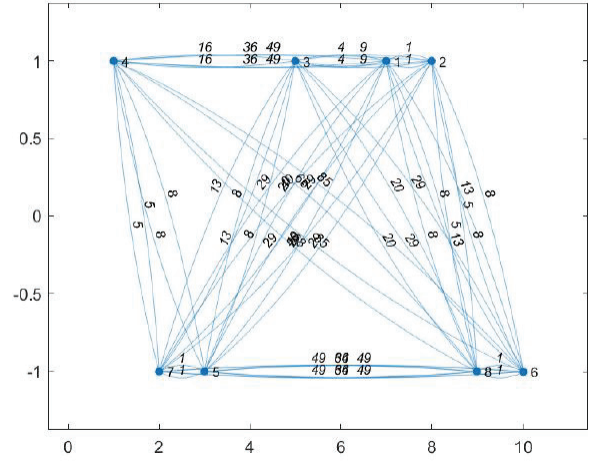
Strateji	B=30	B=35	B=40	B=45	B=50
İHA-Odaklı	162	162	162	162	162
GAMEDFS	0	0	0	0	0
VEFVTS	0	0	0	0	0

5.2. Dikdörtgensel Topoloji (8-KB Robotlu Durum)

Şekil 4, 8 KB robotunun yerlerini ve aralarındaki bağlantıların ağırlıklarını göstermektedir. Bu senaryoda bir dikdörtgensel topoloji incelenmektedir. (Bu topolojide KB robotları birbirine paralel iki sıra oluşturduğu için bu topoloji yaklaşık olarak bir dikdörtgen olarak düşünülmüş ve bu topoloji dikdörtgensel topoloji olarak ele alınmıştır).

KB robotlarının konumları $(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \xi_6, \xi_7, \xi_8) = ((7, 1), (8, 1), (5, 1), (1, 1), (3, -1), (10, -1), (2, -1), (9, -1))$ 'dir; burada $(0, 0)$, İHA'nın başlangıç konumudur. KB robotlarının veri verimlilikleri

$(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6, \eta_7, \eta_8) = (0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60)$ m olarak alınmıştır.



Şekil 4: Düşümler, 8 KB robotunun konumlarını gösterir. Bir bağlantının ağırlığı, bağlantıyla birbirine bağlı iki düğüm arasındaki mesafenin karesini gösterir.

5.2.1. İHA-Odaklı Strateji

İHA Odaklı strateji uygulandığında, İHA sadece KB robot 3'ü ziyaret eder $(\xi_3 = (5,1))$ ve $B = 10.2 \times C_{UAV}$ ise KB robotlarının tüm verilerini oradan toplar; bu sayede, İHA Odaklı strateji altında ziyaret edilmeyen her KB robotunun veri verimliliği ve tükettiği enerjinin toplam birleşik maliyetini aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz.

$$J(u, \pi^{UAV-O}) = 67.1 \times C_{CH}$$

$B = 10$ ise, İHA KB robot 5'e gidebilir; bu da KB robot 3'den daha yakın bir başlangıç noktasına sahip olur ve bu da şu sonucu verir:

$$J(u, \pi^{UAV-O}) = 114.9 \times C_{CH}$$

$B = 5$ ise, İHA KB robot 7'e gidebilir; bu da KB robot 3 ve 5'den daha yakın bir başlangıç noktasına sahip olur ve bu da şu sonucu verir:

$$J(u, \pi^{UAV-O}) = 153.6 \times C_{CH}$$

5.2.2. GAMEDFS

İlgili literatürde önerilen GAMEDFS'nin performansına ilişkin sayısal sonuçları, Şekil 4'teki yapılandırmada $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar değişen pil kapasiteleriyle elde ediyoruz. Şekil 5'te, GAMEDFS'yi uygulayarak, $B = 25, 30, 35, 40, 45, 50 \times C_{UAV}$ 'lı İHA tüm KB robotlarını ziyaret edebilir, yani

$$J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 0$$

Şekil 4'de, İHA'nın tüm KB robotlarını ziyaret etmesi için gereken enerji $E_{UAV}^{\pi}(u) = 21.48 \times C_{UAV}$.

$B = 20 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, KB robot 6'yı ziyaret etmeden gider, bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 0.7 \times C_{CH}$ ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 19.89 \times C_{UAV}$ ile sonuçlanır.

$B = 15 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, KB robot 2, 4, 6 ve 8'i ziyaret etmeden gider ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 13.6 \times C_{CH}$ ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 14.81 \times C_{UAV}$ ile sonuçlanır.

$B = 10 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, yalnızca KB 4, 5, 7'yi ziyaret eder ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 71.7 \times C_{CH}$ ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 7.48 \times C_{UAV}$ ile sonuçlanır.

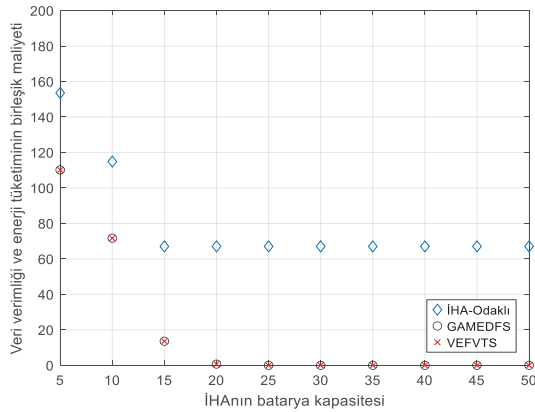
$B = 5 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, yalnızca KB 7'yi ziyaret eder ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 110.2 \times C_{CH}$ ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 4.46 \times C_{UAV}$ ile sonuçlanır.

5.2.3. VEFVTS

VEFVTS, Şekil 4'teki yapılandırılmada $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar değişen tüm pil kapasite değerleri için GAMEDFS ile aynı kararları almıştır. Şekil 5'te VEFVTS, GAMEDFS ve İHA Odaklı Strateji altında veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyeti, $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar İHA'nın pil kapasitesine göre kıyaslanmıştır.

KB 5, tüm KB robotları arasında düşük veri verimliliğine sahip olmasına rağmen, İHA yine de daha düşük pil kapasiteli KB 5'i ziyaret etmeyi tercih eder çünkü birçok KB robotu, İHA'nın daha düşük pil kapasiteleri için verilerini KB 5 robotuna iletir. KB 2 orijinden çok uzakta ve KB 7 orijine en yakın KB robotu olduğundan (0, 0), $B = 5$ 'li İHA yine de KB 2 yerine KB 7'yi tercih eder. CH 4, (1, 1) yerine (2, 1) konumunda olsaydı, $B = 15$ 'li İHA, CH robotlarının veri verimliliği ve enerji tüketiminin ortak maliyetini düşürmek için KB 7 yerine CH 4'ü tercih ederdi.

Tüm KB robotlarının veri verimliliklerinin eşit olması durumunda, GAMEDFS'nin optimal olduğu önceki çalışmalarda gösterilmiştir. $\eta_i = 1 - i/20$ formülüyle üretilen verimliliklerle, stratejilerin performansı hala KB robotlarının konumlarına daha fazla bağlıdır. Bir rota, İHA'nın pil kapasitesi nedeniyle uygulanamıyorsa, ziyaret edilmeyen KB robotlarının veri verimliliklerinin toplamını en aza indirmenin önemi kalmadığı için bu beklenebilir. Burada, KB robotlarının veri verimlilikleri, KB robotlarının konumlarının aksine, İHA'nın pil kapasitesinin katı kısıtlaması üzerinde bir etkiye sahip değildir.



Şekil 5: Şekil 4'teki 8 KB robotunun İHA-Odaklı strateji, GAMEDFS ve VEFVTS altında veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyeti, $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar İHA'nın pil kapasitesine göre. İHA'nın enerji tüketimi ve KB robotlarının toplam ortak maliyeti için kullanılan birimler sırasıyla C_{UAV} ve C_{CH} 'dir. Bu sabitler, İHA ve KB robotlarının türüne bağlıdır.

5.2.4. Performans Kıyaslaması

Tablo 3, Şekil 4'de ziyaret edilmeyen KB robotlarının endekslerini sunmaktadır. Benzer şekilde, Tablo 4, ziyaret edilmeyen KB robotlarının toplam ortak enerji tüketimi maliyetini ve veri verimliliğini göstermektedir. Bu tablolardan,

Şekil 4'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak bir KB robot alt kümesini ziyaret etmeden nasıl karar verdiğini gözlemleyebiliriz. Ayrıca, ziyaret edilmeyen KB robotlarının tüketilen enerji maliyeti ve veri verimliliğinin toplamı, İHA'nın pil kapasitesine ve dolayısıyla İHA tarafından verilen vazgeçme kararlarına göre değişmektedir. Ayrıca, ziyaret edilmeyen KB robotlarının ortak maliyetleri, KB robotlarının konumlarına ve veri verimliliklerine bağlıdır.

Tablo 3: Tablo, Şekil 4'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak ziyaret edilmeyen KB robotlarının endekslerini göstermektedir. "Hiçbiri", $B = 25$ veya $B = 30$ veya $B = 35$ veya $B = 40$ veya $B = 45$ veya $B = 50$ ise İHA'nın tüm KB robotlarını ziyaret ettiği anlamına gelir.

Strateji	B=5	B=10	B=15	B=20	B=25
İHA-Odaklı	1-6,8	1-4,6-8	1,2,4-8	1,2,4-8	1,2,4-8
GAMEDFS	1-6,8	1-3,6,8	2,4,6,8	6	Hiçbir
VEFVTS	1-6,8	1-3,6,8	2,4,6,8	6	Hiçbir
Strateji	B=30	B=35	B=40	B=45	B=50
İHA-Odaklı	1,2,4-8	1,2,4-8	1,2,4-8	1,2,4-8	1,2,4-8
GAMEDFS	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir
VEFVTS	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir

Tablo 4: Tablo, Şekil 4'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak ziyaret edilmeyen KB robotlarının toplam birleşik enerji tüketim maliyetini ve veri verimliliğini göstermektedir. "X", İHA odaklı stratejinin o pil kapasitesi için uygulanamaz olduğunu ifade etmektedir.

Strateji	B=5	B=10	B=15	B=20	B=25
İHA-Odaklı	153.6	114.9	67.1	67.1	67.1
GAMEDFS	110.2	71.7	13.6	0.7	0
VEFVTS	110.2	71.7	13.6	0.7	0

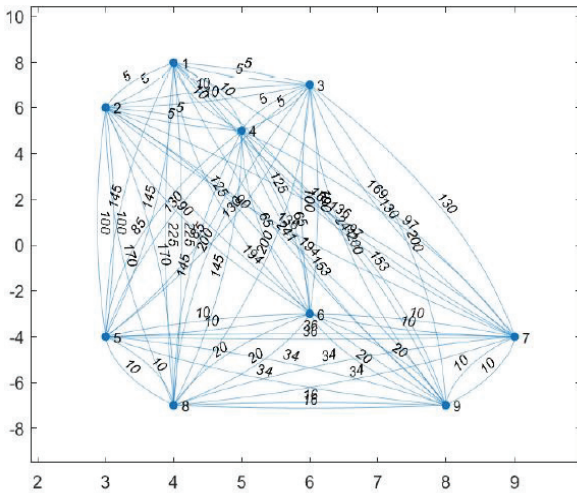
Strateji	B=30	B=35	B=40	B=45	B=50
İHA-Odaklı	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1
GAMEDFS	0	0	0	0	0
VEFVTS	0	0	0	0	0

5.3. Dağıtık Topoloji (9-KB Robotlu Durum)

Şekil 6, 9 KB robotunun yerlerini ve aralarındaki bağlantıların ağırlıklarını göstermektedir. Bu senaryoda bir dağıtık topoloji incelenmektedir. (Bu topolojide KB robotları, diğer senaryolardaki topolojilere göre bu senaryoda robotların alana daha fazla dağıtıldığını gözlemlenmektedir; bu nedenle bu topoloji dairesel topoloji olarak ele alınmıştır).

KB robotlarının konumları $(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \xi_6, \xi_7, \xi_8, \xi_9) = ((4, 8), (3, 6), (6, 7), (5, 5), (3, -4), (6, -3), (9, -4), (4, -7), (8, -7))$ m'dir; burada $(0, 0)$, İHA'nın başlangıç konumudur. KB robotlarının veri verimlilikleri

$(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6, \eta_7, \eta_8, \eta_9) = (0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60, 0.55)$ m olarak alınmıştır.



Şekil 6: Düzgünler, 9 KB robotunun konumlarını gösterir. Bir bağlantının ağırlığı, bağlantıyla birbirine bağlı iki düğüm arasındaki mesafenin karesini gösterir.

5.3.1. İHA-Odaklı Strateji

İHA Odaklı strateji uygulandığında, İHA sadece KB robot 6'yı ziyaret eder $(\xi_6 = (6, -3))$ ve $B = 13.41 \times C_{UAV}$ ise KB robotlarının tüm verilerini oradan toplar; bu sayede, İHA Odaklı strateji altında ziyaret edilmeyen her KB robotunun veri verimliliği ve tükettiği enerjinin toplam birleşik maliyetini aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$J(u, \pi^{UAV-O}) = 373.8 \times C_{CH}$$

$B = 10$ ise, İHA KB robot 5'e gidebilir; bu da KB robot 6'dan daha yakın bir başlangıç noktasına sahip olur ve şu sonucu verir:

$$J(u, \pi^{UAV-O}) = 850.3 \times C_{CH}$$

$B = 5$ ise, İHA odaklı strateji, hiçbir KB robotuna ulaşmadığı için uygulanamaz.

5.3.2. GAMEDFS

Bu alt bölümde, Şekil 6'daki yapılandırmada $B = 5$ ile $B = 50$ arasında değişen pil kapasiteleriyle ilgili literatürde önerilen GAMEDFS'nin performansına ilişkin sayısal sonuçları elde edilmektedir.

Şekil 7'de, GAMEDFS'i uygulayıp, $B = 40, 45, 50 \times C_{UAV}$ 'lı İHA tüm KB robotlarını ziyaret edebilir, yani

$$J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 0$$

Şekil 6'daki yapılandırmada, İHA'nın tüm KB robotlarını ziyaret etmesi için gereken enerji $E_{UAV}^{\pi}(u) = 39.97 \times C_{UAV}$ 'dir.

$B = 35 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, KB robot 7 ve 9'u ziyaret etmeden gider, bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 17.5 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 34.11 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi ile sonuçlanır.

$B = 30 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, KB robot 7, 8 ve 9'u ziyaret etmeden gider ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 23.5 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 29.64 \times C_{UAV}$ sonucunu verir.

$B = 25 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, KB robot 1, 3, 7, 8 ve 9'u ziyaret etmeden gider ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 32.5 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 23.71 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi sonucunu verir.

$B = 20 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, KB robot 3, 5, 6, 7, 8 ve 9'u ziyaret etmeden gider ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 118.30 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 19.18 \times C_{UAV}$ sonucunu verir.

$B = 15 \times C_{UAV}$ olan İHA yalnızca KB 2'yi ziyaret edebilir ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 127.1 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 13.41 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi ile sonuçlanır.

$B = 10 \times C_{UAV}$ olan İHA yalnızca KB 5'i ziyaret edebilir ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 222.1 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 10.00 \times C_{UAV}$ ile sonuçlanır.

$B = 5 \times C_{UAV}$ olan İHA hiçbir KB robotunu ziyaret edemez ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 303.3 \times C_{CH}$ maliyeti ile sonuçlanmaktadır.

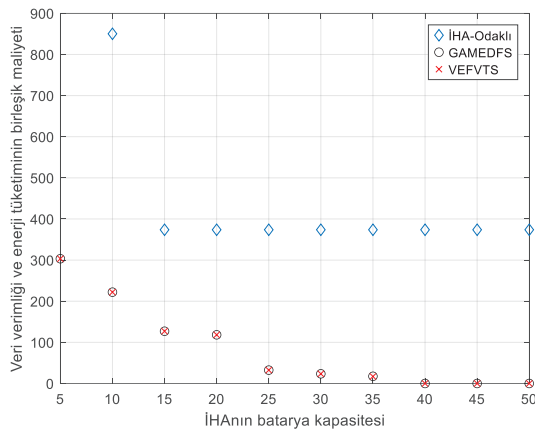
5.3.3. VEFVTS

VEFVTS, Şekil 6'daki konfigürasyonda $B = 5$ 'ten $B = 50$ 'ye kadar değişen tüm pil kapasitesi değerleri için GAMEDFS ile aynı kararları almıştır. Şekil 7'te VEFVTS, GAMEDFS ve İHA Odaklı Strateji altında veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyeti, $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar İHA'nın pil kapasitesine göre kıyaslanmıştır.

KB 6, tüm KB robotları arasında düşük veri verimliliğine sahip olmasına rağmen, İHA yine de $B = 20, 25, 30, 35$ için KB 6'yı ziyaret etmeyi tercih etmektedir çünkü KB 7, KB 8, KB 9'dan veri iletebilmektedir ve KB 1, KB 2, KB 3, KB 4 kümesine en yakın KB robotudur, bu da İHA'nın enerji tüketimi için çok önemlidir.

İHA yine de daha düşük pil kapasitelerine sahip KB 2 ve KB 5'i ziyaret etmeyi tercih etmektedir çünkü birçok KB robotu, İHA'nın daha düşük pil kapasiteleri için verilerini KB 2 veya KB 5 robotuna iletmektedir. Eğer $B = 15$ ise, İHA KB 2'yi KB 5'e tercih eder çünkü KB 2, KB 5'ten kökene daha uzaktır ve KB 1, KB 3 ve KB 4'ün verilerini iletir, bu da KB 6, KB 7, KB 8 ve KB 9'dan daha yüksek verimliliğe sahiptir. Eğer KB 2, KB

5'ten kökene çok daha yakın olsaydı, İHA toplam ortak maliyeti düşürmek için KB 5'i ziyaret etmeyi tercih edebilirdi. Tüm KB robotlarının veri verimliliklerinin eşit olması durumunda, GAMEDFS'nin Bölüm 3'te en uygun yöntem olduğu gösterilmiştir. $\eta_i = 1 - i/20$ formülüyle üretilen verimliliklerle, stratejilerin performansı hala KB robotlarının konumlarına daha fazla bağlıdır. Bir rota İHA'nın pil kapasitesi nedeniyle uygulanamıyorsa, ziyaret edilmeyen KB robotlarının veri verimliliklerinin toplamını en aza indirmenin önemini yitirmesi beklenebilir. Burada KB robotlarının veri verimlilikleri, KB robotlarının konumları gibi İHA'ların pil kapasitesinin zor kısıtı üzerinde bir etkiye sahip değildir.



Şekil 7: Şekil 6'daki 9 KB robotunun İHA-Odaklı strateji, GAMEDFS ve VEFVTS altında veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyeti, $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar İHA'nın pil kapasitesine göre. İHA'nın enerji tüketimi ve KB robotlarının toplam ortak maliyeti için kullanılan birimler sırasıyla C_{UAV} ve C_{CH} 'dir. Bu sabitler, İHA ve KB robotlarının türüne bağlıdır.

5.3.4. Performans Kıyaslaması

Tablo 5, Şekil 6'te ziyaret edilmeyen KB robotlarının endekslerini sunmaktadır. Benzer şekilde, Tablo 6, ziyaret edilmeyen KB robotlarının toplam ortak enerji tüketimi maliyetini ve veri verimliliğini göstermektedir. Bu tablolardan, Şekil 5'te İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak bir KB robot alt kümesini ziyaret etmeden nasıl hareket etmeye karar verdiğini gözlemlenebilir. Ayrıca, ziyaret edilmeyen KB robotlarının tüketilen enerji maliyeti ve veri verimliliğinin toplamı, İHA'nın pil kapasitesine ve dolayısıyla İHA tarafından verilen vazgeçme kararlarına göre değişmektedir. Ayrıca, ziyaret edilmeyen KB robotlarının ortak maliyetleri, KB robotlarının konumlarına ve veri verimliliklerine bağlıdır.

Tablo 5: Tablo, Şekil 6'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak ziyaret edilmeyen KB robotlarının endekslerini göstermektedir. "Hiçbiri", $B = 40$, $B = 45$ veya $B = 50$ ise İHA'nın tüm KB robotlarını ziyaret ettiği anlamına gelir. "X", İHA odaklı Stratejinin o pil kapasitesi için uygulanamaz olduğu anlamına gelir.

Strateji	B=5	B=10	B=15	B=20	B=25
İHA-Odaklı	X	1-4,6-9	1-5,7-9	1-5,7-9	1-5,7-9
GAMEDFS	1-9	1-4,6-9	1,3-9	3,5-9	1,3,7-9
VEFVTS	1-9	1-4,6-9	1,3-9	3,5-9	1,3,7-9
Strateji	B=30	B=35	B=40	B=45	B=50
İHA-Odaklı	1-5,7-9	1-5,7-9	1-5,7-9	1-5,7-9	1-5,7-9
GAMEDFS	7-9	7,9	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir
VEFVTS	7-9	8,9	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir

Tablo 6: Tablo, Şekil 6'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak ziyaret edilmeyen KB robotlarının toplam birleşik enerji tüketim maliyetini ve veri verimliliğini göstermektedir. "X", İHA odaklı stratejinin o pil kapasitesi için uygulanamaz olduğunu ifade etmektedir.

Strateji	B=5	B=10	B=15	B=20	B=25
İHA-Odaklı	X	850.3	373.8	373.8	373.8
GAMEDFS	303.3	222.1	127.1	118.3	32.5
VEFVTS	303.3	222.1	127.1	118.3	32.5
Strateji	B=30	B=35	B=40	B=45	B=50
İHA-Odaklı	373.8	373.8	373.8	373.8	373.8
GAMEDFS	23.5	17.5	0	0	0
VEFVTS	23.5	17.0	0	0	0

5.4. Farklı Topolojilerde Genel Karşılaştırması

Bu altbölümde, 3 farklı topolojilerdeki robotik kablosuz sensör ağındaki KB robotlarını veri toplamak için ziyaret eden sınırlı pil kapasitesine sahip İHA'nın performansı incelenmektedir.

6-KB robotlu dairesel topolojide İHA bataryasındaki enerji seviyesine göre minimum maliyeti hem GAMEDFS hem de bu makalede sunulan VEFVTS ile yakalamakta ve bu maliyet en fazla $180.20 \times C_{CH}$ olmaktadır.

8-KB robotlu dikdörtgensel topolojide İHA bataryasındaki enerji seviyesine göre minimum maliyeti hem GAMEDFS hem de bu makalede sunulan VEFVTS ile yakalamakta ve bu maliyet en fazla $110.15 \times C_{CH}$ olmaktadır.

9-KB robotlu dağıtık topolojide İHA bataryasındaki enerji seviyesine göre minimum maliyeti hem GAMEDFS hem de bu makalede sunulan VEFVTS ile yakalamakta ve bu maliyet en fazla $303.30 \times C_{CH}$ olmaktadır.

Buradan şu çıkarımlar yapılabilir.:

- İHA'nın toplam maliyeti 8-KB robotlu dikdörtgensel topolojide 6-KB robotlu dairesel topolojiye göre biraz daha azdır.
- 9-KB robotlu dağıtık topolojide ise diğer topolojilere göre daha dağıtık bir topolojiye sahip olduğu için ziyaret edilmeyen robotların veri iletmeye maliyeti diğer topolojilere göre çok daha fazladır (6-KB robotlu topolojiye göre 2 kattan fazla, 8-KB robotlu topolojiye göre 3 kattan fazla).
- Her üç topolojide de VEFVTS İHA'nın değişen batarya (pil) seviyesine göre en az maliyeti yakalamaktadır.

6. Sonuçlar

Bu makale, KB robotlarının enerji verimliliğini göz önünde bulundurarak, kısıtlı pil kapasitesine sahip İHA kullanan kümelenmiş bir robot ağında veri toplama problemine odaklanmaktadır. Tek bir KB robotu, her kümedeki diğer robotlara görevler atamaktadır. KB robotu atanmış görevlerini tamamladığında, analiz ve birleştirme için veri toplamaktadır. Daha sonra üretilen verileri İHA'ya gönderir. İHA, pil kapasitesi ve konumu gibi faktörlere bağlı olarak tüm KB robotlarını veya belirli bir seçimi ziyaret eder. Ziyaret edilmeyen her KB robotu, verilerini belirli bir KB robotuna iletir. İHA'nın amacı, toplam enerji tüketimini en aza indirmektir.

Bu problemi GSP olarak ele almak için, bu çalışma başlangıçta İHA'nın pil kapasitesindeki kısıtlamaları ortadan kaldırır. Daha sonra, İHA, İHA'nın pil kapasitesinin getirdiği sınırlamayı göz önünde bulundurarak bu problem ele alınmaktadır. Pil kapasitesi her KB robotunu ziyaret etmek için yeterli değilse, enerji tüketiminin pilin sınırları içinde kalmasını sağlamak için belirli KB robot gezilerini seçici olarak atlar. Durumu değerlendirmek ve en uygun eylem planını belirlemek için yenilikçi bir yaklaşım gösterilmiştir. Daha sonra, önerilen yaklaşım, farklı küme miktarları dikkate alınarak literatürde daha önce yayınlanmış tekniklerle karşılaştırılır. Yaklaşımımız, nicel sonuçlarla doğrulandığı gibi, KB robotlarının değişen sayıları, İHA pil kapasitesi dahil olmak üzere birçok yapılandırma önceki metodolojilerden daha iyi performans gösterir. İHA, pil kapasitesi ve konumlar gibi faktörleri dikkate alarak KB robotlarının toplam enerji tüketimini en iyileştirir.

Bu makalede İHA'nın farklı topolojilerdeki robotik ağlardaki KB robotları en az maliyetle ziyaret ettiği gösterilmiştir.

Bu makale, çevresel belirsizlikleri değerlendirerek ve öngörülen belirsizlik seviyelerine göre İHA yol planlamasını yaparak önerilen çerçeveyi genişletmeyi amaçlamaktadır. Sunulan metodolojiyi geliştirebilecek gelecekteki bir diğer araştırma alanı da kablosuz güç aktarımıdır (KGA). Bu nedenle, yakın zamandaki stratejimiz, KGA bilgisini karar alma sürecine dahil etmek için önerilen politikayı ilerletmektir. Gelecekte ayrıca, enerji eksikliklerinden kaynaklanan İHA arızalarını azaltma problemini araştırmaya öncelik verecektir.

Bu makalede probleme pratik bir yaklaşım hedeflenmiştir. Bu nedenle bu çalışmada literatürdeki GAMEDFS ve bazı klasik yaklaşımlar ile kıyaslama yapılmıştır. Diğer yandan öğrenme tabanlı yöntemlerle örneğin pekiştirmeli öğrenmenin ise çok yüksek bir hesaplama karmaşıklığı olduğu için bu makalede karşılaştırma amaçlı eklenmemiştir ama gelecekteki çalışmalarda bu yöntemlerin de uygulanabileceği durumlar ve problemler incelenecektir.

7. Kaynaklar

- [1] P. Kamalinejad, C. Mahapatra, Z. Sheng, S. Mirabbasi, V.C.M. Leung, Y.L. Guan, "Wireless Energy Harvesting for the Internet of Things", IEEE Communications Magazine, vol. 53, 2015, pp. 102-108.
- [2] C.W. Tsai, T.P. Hong, G.N. Shiu, "Metaheuristics for the lifetime of WSN: A review", IEEE Sensor Journal, vol. 16, 2016, pp. 2812-2831.
- [3] Y. Zhang, L. Sun, H. Song, X. Cao, "Ubiquitous WSN for Healthcare: Recent Advances and Future Prospects", IEEE Internet of Things Journal, vol. 1, no. 4, Aug. 2014.
- [4] C. Gomez, J. Paradells, "Urban Automation Networks: Current and Emerging Solutions for Sensed Data Collection and Actuation in Smart Cities", Sensors 2015, vol. 15, pp. 22874-22898.
- [5] Ghosh P., Gasparri A., Jin J., Krishnamachari B. (2019) Robotic Wireless Sensor Networks. Mission-Oriented Sensor Networks and Systems: Art and Science. Studies in Systems, Decision and Control, vol 164. Springer.
- [6] L. Xu, R. Falcon, A. Nayak, I. Stojmenovic, "Servicing wireless sensor networks by mobile robots", IEEE Communications Magazine, vol.50, no.7, pp.147-154, July 2012.
- [7] X. Mkhwanazi, L. Hanh, E. Blake, "Clustering between Data Mules for Better Message Delivery", WAINA 2012, 26-29 March 2012, pp.209- 214.
- [8] X. Liu, T. Wang; W. Jia; A. Liu; K. Chi, "Quick Convex HullBased Rendezvous Planning for Delay-Harsh Mobile Data Gathering in Disjoint Sensor Networks", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 51, no. 6, Dec. 2021, pp. 3844-3854.
- [9] M. Huang, A. Liu; N.N. Xiong; T. Wang, A. V. Vasilakos "A Low Latency Communication Scheme for Mobile Wireless Sensor Control Systems", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 49, no. 2, Feb. 2019.
- [10] C.-Y. Chang, G.-Jong Yu, TL Wang, and C.-Yu Lin. 2014. "Path construction and visit scheduling for targets by using data mules.", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 44, 10 (2014), 1289–1300.
- [11] E. L. Lawler, Jan Karel Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan, D. B. Shmoys, "The Traveling Salesman Problem: A Guided

- Tour of Combinatorial Optimization", Wiley; 1st edition, September 1, 1985.
- [12] O. M. Gul, A. M. Erkmen, "Energy-efficient Cluster-Based Data Collection by a UAV with a Limited-Capacity Battery in Robotic Wireless Sensor Networks", *Sensors*, vol. 20, 2020.
 - [13] O. M. Gul, A. M. Erkmen and B. Kantarci, "UAV-Driven Sustainable and Quality-Aware Data Collection in Robotic Wireless Sensor Networks," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 24, pp. 25150-25164, 15 Dec.15, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2022.3195677.
 - [14] O. M. Gul and A. M. Erkmen, "Energy-Aware UAV-Driven Data Collection With Priority in Robotic Wireless Sensor Network," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 15, pp. 17667-17675, 1 Aug.1, 2023, doi: 10.1109/ISEN.2023.3286877.
 - [15] O. M. Gul, A. M. Erkmen and B. Kantarci, "NTN-Aided Quality and Energy-Aware Data Collection in Time-Critical Robotic Wireless Sensor Networks," in *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 7, no. 3, pp. 114- 120, May 2024, doi: 10.1109/IOTM.001.2300200.
 - [16] Heinzelman, W., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H., "EnergyEfficient Communication Protocols for Wireless Microsensor Networks", *Proceedings of the 33rd Hawaiaian International Conference on Systems Science (HICSS)*, January 2000.
 - [17] S. Varshney, R. Kuma, "Variants of LEACH Routing Protocol in WSN: A Comparative Analysis", 8th IEEE International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence), 2018, pp. 199-204. doi:10.1109/confluence.2018.8442643
 - [18] C. Eris, O. M. Gul and P. S. Boluk, "An Energy-Harvesting Aware Cluster Head Selection Policy in Underwater Acoustic Sensor Networks," 2023 International Balkan Conference on Communications and Networking (BalkanCom), Istanbul, Turkiye, 2023, pp. 1-5.
 - [19] Ç. Eris, O. M. Gül, P. S. Bölük, "A novel reinforcement learning based routing algorithm for energy management in networks", *Journal of Industrial and Management Optimization*, vol. 20, no.12, pp. 3678-3696, December 2024. doi: 10.3934/jimo.2024049
 - [20] Ç . Eris, O. M. Gül, P. S. Bölük, "A Novel Medium Access Policy Based on Reinforcement Learning in Energy-Harvesting Underwater Sensor Networks" *Sensors* 24, no. 17: 5791, September 2024. <https://doi.org/10.3390/s24175791>
 - [21] Golden, B. L. , Levy, L. , Vohra, R., "The orienteering problem", *Naval Research Logistics*, 34 (3), pp. 307-318, 1987.
 - [22] W. Wen, S. Zhao, C. Shang and C. Y. Chang, "EAPC: Energy-aware path construction for data collection using mobile sink in wireless sensor networks", *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 890-901, Jan. 2018.
 - [23] H. Salarian, K.-W. Chin, and F. Naghdy, "An energy-efficient mobilesink path selection strategy for wireless sensor networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 5, pp. 2407-2419, Jun. 2014.
 - [24] X. He, X. Fu and Y. Yang, "Energy-Efficient Trajectory Planning Algorithm Based on Multi-Objective PSO for the Mobile Sink in Wireless Sensor Networks," *IEEE Access*, vol.7, pp. 176204-176217, 2019.
 - [25] A. Mehto, S. Tapaswi, K. K. Pattanaik, "PSO-Based Rendezvous Point Selection for Delay Efficient Trajectory Formation for Mobile Sink in Wireless Sensor Networks", *COMNETS 2020*, India, 2020, pp. 252-258.
 - [26] J. Zhong, Z. Huang, L. Feng, W. Du and Y. Li, "A hyper-heuristic framework for lifetime maximization in wireless sensor networks with a mobile sink," in *IEEE/CAA JAS*, vol. 7, no. 1, pp. 223-236, January 2020.
 - [27] Vera-Amaro, R.; Rivero-Angeles, M.E.; Luviano-Juarez, A. "Data Collection Schemes for Animal Monitoring Using WSNs-Assisted by UAVs: WSNs-Oriented or UAV-Oriented", (*MDPI*) *Sensors*, vol. 20, 262, 2020.
 - [28] K. Li, W. Ni, E. Tovar and M. Guizani, "Joint Flight Cruise Control and Data Collection in UAV-Aided Internet of Things: An Onboard Deep Reinforcement Learning Approach," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 12, pp. 9787-9799, 15 June15, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3019186.
 - [29] A. G. Hoong, C. Laua and P. Vansteenwegen, "Orienteering Problem: A survey of recent variants, solution approaches and applications", *European Journal of Operational Research*, pp. 315-332, 2016.
 - [30] E. Fountoulakis; G. S. Paschos; N. Pappas, "UAV Trajectory Optimization for Time Constrained Applications", *IEEE Networking Letters*, vol. 2, no. 3, Sept. 2020, pp 136-139.
 - [31] P. Larranaga, C.M.H. Kuijpers, R.H. Murga, I. Inza and S. Dizdarevic, "Genetic Algorithms for the Travelling Salesman Problem: A Review of Representations and Operators", *Artificial Intelligence Review*, vol. 13, pp. 129-170, 1999.
 - [32] Yang, Ruixiao, *Optimizing Traveling Salesman Problem in Multi-Agent Systems with Practical Constraints*, MSc Thesis, MIT, USA, 2024.
 - [33] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *IEEE Trans. Wir. Com.*, vol. 1, no. 4, pp. 660-670, Oct. 2002.
 - [34] Montiel, Edgar R., Mario E. Rivero-Angeles, Gerardo Rubino, Heron Molina-Lozano, Rolando Menchaca-Mendez, and Ricardo MenchacaMendez. 2017. "Performance Analysis of Cluster Formation in Wireless Sensor Networks" *Sensors* 17, no. 12: 2902.
 - [35] Farahzadi, H.R., Langarizadeh, M., Mirhosseini, M. et al. An improved cluster formation process in wireless sensor network to decrease energy consumption. *Wireless Netw* 27, 1077-1087 (2021).

Özgeçmişler



Ömer Melih Gül (SIEEE'17, MIEEE'21, SMIEEE'24), 2012, 2014 ve 2020 yıllarında Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ), Ankara, Türkiye Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden sırasıyla lisans, yüksek lisans ve 2020 yıllarında doktora derecelerini almış ve aynı bölümde araştırma görevlisi olarak çalışmıştır. Araştırma ilgi alanları arasında yapay zeka/makine öğrenimi uygulamaları, kablosuz güvenlik, ağ oluşturma, planlama, IoT, İHA, robotik ve blok zinciri yer almaktadır. 50'den fazla makale ve 4 kitap bölümünün ortak yazarıdır. IEEE Computer Society tarafından verilen 2019 Lance Stafford Larson Outstanding Student Paper Award ödülünde üçüncülük ödülüne layık görülmüştür. Ayrıca 2021 IEEE Yükselen Yıldızlar Küresel Konferansı'ndaki poster yarışmasında üçüncülük ödülüne layık görülmüştür. 2022 yılında Kanada Ottawa Üniversitesi Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Fakültesi'nde doktora sonrası araştırmacı olarak çalışmıştır. 2022 yılında 48. Wireless World Research Forum'da (WWRF) en iyi bildiri ödülünün sahibi oldu. 2023 yılında, 4 Yüksek Lisans tezini yönettiği ve 1 tezin eş danışmanlığını yaptığı Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, Türkiye'deki Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde Yardımcı Doçent olarak çalıştı. Mart 2024'ten bu yana, 1 Doktora ve 4 Yüksek Lisans öğrencisine danışmanlık yaptığı İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), İstanbul, Türkiye'deki Bilişim Enstitüsü'nde Doçent olarak çalışmaktadır. Ayrıca, İTÜ Araştırma Dekanlığı'nda Büyük Veri Ofisi Koordinatörü olarak görev yapmaktadır. IEEE Open Journal of Computer Society, (Elsevier) Sustainable Computing: Informatics and Systems, (Springer-Nature) Scientific Reports, (Springer) Cluster Computing, (Springer) Wireless Networks, (Springer) Telecommunication Systems, ve International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence dergilerinde Editör olarak görev yapmaktadır. Eş başkan olarak, Estonya'daki IEEE Fog and Mobile Edge Computing (FMEC) 2023'te CIEAI çalıştayını düzenledi. Ayrıca, IEEE iThings 2024'te Tanıtım Başkanı oldu. EAI International Conference on Robotic Sensor Networks (ROSENET 2023, ROSENET 2024) konferansını iki yıl ardarda genel başkan olarak düzenledi.



Aydan M. Erkmen, 1978 yılında Boğaziçi Üniversitesi'nden Elektrik Mühendisliği alanında lisans derecesi, 1981 yılında ABD'de Philadelphia'da Drexel Üniversitesi'nden Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği alanında yüksek lisans derecesi ve 1989 yılında Fairfax'ta George Mason Üniversitesi'nden Bilişim Teknolojileri ve Mühendisliği alanında doktora derecesi aldı. Prof. Dr. Aydan Müşerref Erkmen, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ)'de Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak çalıştı. Bir devlet üniversitesi olan ODTÜ'de 2914 sayılı Yükseköğretim Personel Kanunu uyarınca 01 Eylül 1989 - 13 Ocak 1992 tarihleri arasında Yardımcı Doçent, 14 Ocak 1992 - 22 Mart 2004 tarihleri arasında Doçent ve 23 Mart 2004 - 17 Temmuz 2023 tarihleri arasında Profesör unvanıyla çalıştı. Prof.Dr. Aydan Müşerref Erkmen, 17 Temmuz 2023 tarihinde ODTÜ'deki görevinden emekli olmuştur. Araştırma ilgi alanları arasında mekatronik tasarım, arama kurtarma ve gözetleme robotiği, mobil sensör ağları, biyomimetik manipülasyon, yapılandırılmamış ortamlarda biyolojik olarak ilham edilen kontrol ve belirsizlik modellemesi yer almaktadır. IEEE Robotics and Automation Society (RAS) Yönetim Kurulu'nda görev yapmıştır; 2000-2003 yılları arasında IEEE RAS başkan yardımcılığı yapmıştır; Springer Verlag-Paladyn. Journal of Behavioral Robotics dergisinin editörüdür. IEEE Robotics and Automation Dergisi'nin yayın kurulunda 3 yıl görev yapmıştır. Türkiye Bilimsel ve Teknoloji Araştırma Kurumu'nda (TÜBİTAK) endüstriyel fonlardan sorumlu başkan yardımcısı olarak 4 yıl görev yapmıştır; 2007-2009 yılları arasında ODTÜ Mühendislik Fakültesi Dekan Yardımcılığı yapmıştır.