



Multi-Objective task planning for multi-UAVs based on constraint satisfaction problem

Emre Ayvaz^{1*}, Yılmaz Atay², İsmail Babaoğlu¹

¹Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Konya Technical University, 42075, Selçuklu, Konya, Türkiye

²Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, 06570, Çankaya, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Dynamic optimization with enhanced temporal constraint satisfaction problem (TCSP)
- Implementation of a new decision mechanism model and hybrid CSP controls
- Resource efficiency and sustainability achieved through experimental performance evaluation

Keywords:

- Multi-Task Assignment
- Multiple UAVs
- Dynamic Programming
- Backtracking, Forward Checking
- Constraint Satisfaction Problem

Article Info:

Research Article

Received: 16.07.2024

Accepted: 16.01.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1517020

Correspondence:

Author: Emre Ayvaz

e-mail:

emre.ayvaz@hvkk.tsk.tr

phone: +90 532 604 6231

Graphical/Tabular Abstract

The Temporal Constraint Satisfaction Problem (T-CSP) is addressed through a two-phase framework, distinguishing static and dynamic constraints. Static constraints include payload capacity, entry clearance, and altitude window. Dynamic constraints, on the other hand, are analyzed at both single-task and paired-task levels. UAVs that satisfy single-task constraints are subsequently evaluated for their performance in sequential task pairs. As illustrated in Figure A, the temporal sequencing of tasks is represented via time windows, where each color corresponds to a distinct task pair. During this phase, temporal associations between tasks incorporate the following constraints: loiter time (airborne waiting duration), route trajectory, fuel status, and other time-dependent parameters. To assign airborne UAVs to subsequent tasks, several conditions must be met: the UAV must reside within the current domain of the task (node consistency), it must be feasible for the UAV to arrive on time, and it must have sufficient fuel reserves to reach the next task (arc consistency).

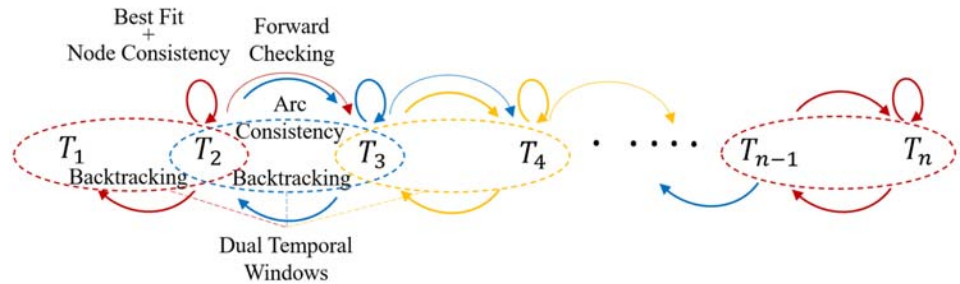


Figure A. Mission Breakdown Structure

Purpose: This study extends the traditional Constraint Satisfaction Problem (CSP) model by incorporating a temporal dimension, introducing the Temporal CSP (TCSP) framework. TCSP aligns UAV capabilities with static and dynamic constraints by assigning task pairs to sequential time windows. However, the greedy approach of TCSP poses limitations in terms of cost and efficiency. To address these limitations, the proposed Improved TCSP (Improved TCSP) introduces two key innovations.

Theory and Methods: This study provides a comprehensive explanation of the Improved Temporal Constraint Satisfaction Problem (IT-CSP) framework and its adaptation of CSP techniques-backtracking, forward checking, arc consistency, and node consistency-to aviation-specific challenges. The model aims to optimize Unmanned Aerial Vehicle (UAV) task assignments by refining constraints during mission planning. To operationalize the proposed framework, all constraints must first be normalized into binary constraints to reduce the solution space. This normalization phase identifies values that satisfy the core static constraints, thereby performing an initial narrowing of the domain. Subsequently, dynamic variables such as time-dependent location and fuel consumption are calculated to finalize the domain configuration. The process concludes with the application of consistency-checking methods to enable feasible task assignments. These steps are shortly summarized in Figure A.

Results: Results demonstrated that ITCSP achieved 12 times fewer takeoff-landing cycles than TCSP in a 64-task scenario, significantly reducing fuel and time costs. Even in an 8-task scenario, ITCSP produced more optimized solutions with comparable time complexity. These findings underscore ITCSP's superiority in multi-task planning, emphasizing its potential to enhance resource efficiency and operational sustainability in UAV deployments.

Conclusion: In problems with expansive solution spaces—where exhaustive evaluation of all options via greedy approaches is computationally intractable due to the inherent propensity for solution space growth—the integration of metaheuristic strategies becomes indispensable. This is particularly critical when traditional constraint satisfaction methods fail to balance efficiency and optimality in dynamically evolving scenarios.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Çoklu İHA'larla kısıt tatmin problemi temelli çok amaçlı görev planlaması

Emre Ayvaz^{1*}, Yılmaz Atay², İsmail Babaoğlu¹

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 42075, Selçuklu, Konya, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Bölümü, 06570, Çankaya, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- İyileştirilmiş zamansal kısıt tatmin problemi (ZKTP) ile dinamik optimizasyon yapılması
- Yeni karar mekanizması modeli ve hibrit KTP kontrolleri kullanımı
- Deneysel performans değerlendirmesi ile kaynak verimliliği ve sürdürülebilirlik sağlanması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.07.2024

Kabul: 16.01.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1517020

Anahtar Kelimeler:

Çoklu görev atama,
çoklu İHA,
dinamik programlama,
geri izleme,
ileri kontrol,
kısıt tatmin problemi

ÖZ

İnsansız hava araçlarının (İHA) çoklu görev planlamasında; sensör kapasitesi, konum, yakıt ve yük gibi dinamik yeteneklerle görevlerin uyumlaştırılması karmaşık bir optimizasyon problemidir. Bu çalışma, geleneksel Kısıt Tatmin Problemi (KTP) modelini zamansal boyutla genişleterek Zamansal KTP (ZKTP) çerçevesini sunar. ZKTP, görev çiftlerini ardışık zaman pencerelerine yerleştirerek İHA yetenekleri ile statik/dinamik kısıtları ilişkilendirir. Ancak ZKTP'nin ağırlıklı yaklaşımı, maliyet ve verimlilik açısından sınırlıdır. Bu kapsamda önerilen İyileştirilmiş ZKTP (İZKTP), iki temel yenilik getirir: (1) Görev etki alanında en uygun İHA'yı seçen ve aynı İHA'nın sonraki görevleri havada tamamlama potansiyelini değerlendiren dinamik bir karar mekanizması, (2) Zaman ve yakıt maliyetlerini optimize ederek iniş-kalkış sayısını azaltan hibrit kontrol yöntemi. Bu sayede, İHA'ların havada kesintisiz görev yapması sağlanır. Çalışma, iki aşamalı deneylerle test edilmiştir. İlk aşamada, sentetik verilerle farklı yetenekteki İHA'ların görevlere atanması simüle edilmiş; ikinci aşamada dinamik programlama ile zamansal pencereler güncellenerek düğüm tutarlılığı, geri izleme ve yay tutarlılığı yöntemleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlarda, İZKTP'nin 64 görevli bir senaryoda ZKTP'ye göre 12 kez daha az iniş-kalkışla yakıt ve zaman maliyetlerini önemli ölçüde düşürdüğü gözlemlenmiştir. Sekiz görevli küçük bir pakette bile benzer zaman karmaşıklığında daha optimize çözümler üretebilmiştir. Bulgular, İZKTP'nin çoklu görev planlamada kaynak verimliliği ve operasyonel sürdürülebilirlik açısından üstünlüğünü kanıtlamaktadır.

Multi-Objective task planning for multi-UAVs based on constraint satisfaction problem

H I G H L I G H T S

- Dynamic optimization with enhanced temporal constraint satisfaction problem (TCSP)
- Implementation of a new decision mechanism model and hybrid CSP controls
- Resource efficiency and sustainability achieved through experimental performance evaluation

Article Info

Research Article

Received: 16.07.2024

Accepted: 16.01.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1517020

Keywords:

Multi-task assignment,
multiple UAVs,
dynamic programming,
backtracking,
forward checking,
constraint satisfaction
problem

ABSTRACT

Multi-task planning for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) presents a complex optimization challenge, requiring the harmonization of tasks with dynamic capabilities such as sensor capacity, location, fuel, and payload. This study extends the conventional Constraint Satisfaction Problem (CSP) model by incorporating a temporal dimension, introducing the Temporal CSP (TCSP) framework. TCSP associates UAV capabilities with static and dynamic constraints by structuring task pairs within sequential time windows. However, the greedy nature of TCSP imposes inherent limitations in terms of cost efficiency and operational effectiveness. To address these limitations, the proposed Improved Temporal Constraint Satisfaction Problem (ITCSP) introduces two key innovations: (1) a dynamic decision-making mechanism that selects the optimal UAV for a task domain while evaluating its potential to complete subsequent tasks in-flight, and (2) a hybrid control method that reduces takeoff-landing cycles by optimizing time and fuel costs. This enables UAVs to perform missions seamlessly without intermediate landings. The framework was validated through a two-phase experimental design. In the first phase, simulations using synthetic data-inspired by real-world scenarios—assigned UAVs with heterogeneous capabilities to diverse mission requirements. The second phase employed dynamic programming to update temporal windows for task pairs, while comparing the performance of node consistency, backtracking, and arc consistency methods. Results demonstrated that ITCSP achieved 12 times fewer takeoff-landing cycles than TCSP in a 64-task scenario, significantly reducing fuel and time costs. Even in an 8-task scenario, ITCSP produced more optimized solutions with comparable time complexity. These findings underscore ITCSP's superiority in multi-task planning, emphasizing its potential to enhance resource efficiency and operational sustainability in UAV deployments.

1. Giriş (Introduction)

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar-UAVs) son zamanlarda havacılıktaki her insanlı görev tipine rakip olacak şekilde farklı türde görevler üstlenilebilmektedir. İHA'lar özellikle sıkıcı, kirli ve tehlikeli (3D – Dull, Dirty, Dangerous) görevlerde maliyet ve risk anlamında çok daha fazla tercih edilen bir teknoloji haline gelmiştir. Yüksek bedeller ödemeyi gerektiren havacılık sektöründe otonomi ve optimizasyon artarken risklerin azalması ve maliyetlerin tersi oranda düşmesi İHA'ları birçok sektörde ulaşılabilir kılmıştır. Kısıt Tatmin Problemi (KTP) temelli çözümler ise bu noktada hem anlaşılabilir hem de farklı problemlere kolay uyarlanabilir bir altyapı ve yaklaşım sunmaktadır. Günümüzde İHA'lar tam otonom ya da insan desteği gerektiren yerlerde kısmen müdahale edilerek genelde önceden belirlenmiş görevleri icra etmektedir. Fakat görevlerin kısıtları ve karmaşıklığı arttıkça, öncesinde etkin bir planlama yapılması zorlaşmaktadır. İHA'larla ilgili bilimsel çalışmaların ilk örneklerinden olan ve Archibald Montgomery Low tarafından sunulan çalışmada, birinci dünya savaşı sırasında harekât alanında görev planlama yeteneğine ihtiyaç duyulduğu için konu edilmiştir [1]. 1963 yılında yayınlanan diğer bir çalışmada [2], İHA'ların gerçek dünyada kullanıldığı ilk örneklerden biri olsa da 2000'li yıllara kadar yüksek maliyetler ve kısıtlı tecrübelerden dolayı özellikle İHA görev planlama kapsamında çalışmalar beklenenin altında kalmıştır [3]. Fakat 2000'li yıllarla birlikte bu alandaki çalışmaların yoğun bir şekilde arttığı görülmektedir [4]. 2010'lu yılların başından itibaren İHA'ların telekomünikasyon ile sağlık [5], lojistik [6], trafik kontrolü [7], halk güvenliği [8], orman izleme [9], askerli görevler [10] ve benzeri birçok farklı alanda kullanıldığı bilinmektedir [4]. İHA'ların kullanım alanları genişledikçe problem sahaları da benzer oranda artmış ve kompleks hale gelmiştir. Bu çalışmada, tüm kompleks İHA görevleri için ihtiyaç duyulan görev planlama problemine odaklanılarak, görev atamalarının nasıl optimize edileceği üzerine yoğunlaşılmıştır.

Bu çalışma beş bölüm şeklinde organize edilerek sunulmuştur. Bir sonraki bölümde görev planlama hakkında literatür taraması yapılmış ve ilgili çalışmalar alt başlıklarda açıklanmıştır. Üçüncü bölümde ilgili problemin tanımı yapılarak görevin Zamansal Kısıt Tatmin Problemi (ZKTP) olarak modellenmiş hali açıklanmış olup, önerilen yeni yeteneklerin probleme adaptasyonu hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde önerilen yöntemin başarı durumunu test edebilmek için elde edilen deneyler çıktılar verilmiştir. Son bölümde ise önerilen modelin çıktıları değerlendirilerek, gelecekte yapılması planlanan çalışmalara yer verilmiştir.

2. Literatür Araştırması (Literature Review)

İHA görev planlama çalışmaları; matematiksel programlama, sezgisel yöntemler, pekiştirmeli öğrenme (PÖ) ve Kısıt Tatmin Problemleri (KTP) temelli yaklaşımlar altında incelenmiştir [11-15].

2.1. Matematiksel Programlama temelli Görev Atama (Task Assignment based on Mathematical Programming)

Kombinatorial optimizasyon problemlerinden biri olan görev atama, Kapsamlı Metod, Dallanma-Sınırlandırma (B&B) ve Macar Algoritması gibi klasik yöntemlerle ele alınmıştır [16-18]. Ramirez, B&B için etkili bir optimizasyon çözümü sunarken [19], Schumacher vd., heterojen filolar için zaman kısıtlı görev atamada Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP) modelini başarıyla uygulamıştır [20-21]. Doherty, Zamansal Eylem Mantığı (TAL) ile insansız sistemlerde dinamik görev planlama çözümleri geliştirmiş [22, 23], ReSSAC projesi ise MDP ve dinamik programlama ile arama-kurtarma operasyonlarında test edilmiştir [24].

2.2. Sezgisel Temelli Görev Atama (Heuristic Based Task Assignment)

Çoklu Gezin Satıcı Problemi (MTSP) ve Araç Rota Problemi (VRP) gibi modeller, İHA görev planlamaya adapte edilmiştir [25-27]. Genetik Algoritmalar (GA), Shima vd. tarafından klasik yöntemlere kıyasla hesaplama verimliliğiyle öne çıkarılmıştır [28, 29]. Edison ve Shima, Dubins Araç Modeli ve hedef paketi tabanlı GA ile görev-rota optimizasyonu sağlamıştır [30-31]. Huang vd., GA, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Karınca Kolonisi Algoritması (ACO) karşılaştırmasında GA'nın doğruluk-zaman dengesini vurgulamıştır [32].

Gelişmiş Sezgisel Yöntemler: Kurt Sürüsü Arama [33], Tabu Arama [34], İyileştirilmiş Benzetimli Tavlama (ISA) [35], Gruplama Karınca Koloni Algoritması (GACO) [36], Uzlaşma Temelli Paket Algoritması (CBBA) [37-38] ve Geri Çekilen Ufuk Görev Atama (RHTA) [39-40] gibi yöntemler, geniş ölçekli problemlerde etkinlikte uygulanmıştır.

Optimizasyon Odaklı Çalışmalar: Zhang vd., klon seçim algoritmasıyla dört hedefi optimize ederken [41], yakınsak iki aşamalı yaklaşım, uçuş süresi ve yük kapasitesi kısıtlarını aşmak için önerilmiştir [42].

2.3. Pekiştirmeli Öğrenme Temelli Görev Atama (Reinforcement Learning-Based Task Assignment)

PÖ, dinamik ortamlarda "keşif-istismar" dengesiyle optimal stratejiler öğrenme yeteneğiyle dikkat çekmiştir [43, 44]. Q-öğrenme, Pareto teorisinin sınırlarını aşmak için modifiye edilmiş yoğunluk tahminiyle kullanılmıştır [45]. Gao vd., derin PÖ ile işbirlikçi algılama görevlerinde zamanlama ve rota planlama çözümleri sunarken [46], Luo, füze-hedef atamada veri tabanlı politika optimizasyonu geliştirmiştir [47]. Sullivan vd., Proksimal Politika Optimizasyonu (PPO) ile çoklu amaçlı ödül fonksiyonlarını entegre ederek istikrarlı bir ÇADTÖ algoritması tasarlamıştır [48].

2.4. Kısıt Tatmin Problemi Modeli Tabanlı Görev Atama (Constraint Satisfaction Problem-Based Task Assignment)

KTP modelinin çoklu İHA görev atama problemine uyarlanmasında ilgili kısıtları tanımlamak ve arasındaki ilişkileri doğru belirlemek önemlidir. Literatürde kısıtların çok farklı şekillerde sınıflandırıldığı görülmüştür [4, 12, 13]. Son 10 yıldır İHA görev planlamanın kısıt tatmin problemi temelli modellemesi hakkında birkaç yayın mevcuttur. Literatürdeki ilk KTP temelli çalışmalardan birinin 1968 yılında minimum yol maliyetini bulmak üzere önerildiği bilinmektedir [49]. Buna benzer şekildeki çalışmaların ortalama 20 yıl sonra artmaya başladığı görülmektedir [50, 51]. KTP'nin özellikle İHA atama problemlerinde uygulanma yöntemleri incelenmiştir. Ramirez vd., basit bir KTP modeli ile İHA'lara başarılı bir şekilde görev ataması yapılabileceğini göstermişlerdir [52]. Sonrasında MOGA (multi-objective genetic algorithm) ile KTP'nin başarılı bir şekilde hibritlendiğine dair çalışma önermişlerdir [19]. Hemen arkasından yakıt maliyeti, uçuş süresi ve uçak sayısı minimizasyonu yapmak için Dallanma ve Sınırlandırma yaklaşımı yöntemiyle bir optimizasyon fonksiyonu geliştirmişlerdir. Sonrasında ise çok amaçlı bir uygunluk fonksiyonu için MOGA kullanan çalışmalar yapılmıştır [19, 53].

3. Problemin Tanımı ve İyileştirilmiş ZKTP Modeli (Problem Definition and the Proposed TCSP Model)

Bu çalışmada, insansız hava araçları için görev planlama problemi ele alınmıştır. NP-zor sınıfında yer alan bu problem, büyük ölçekli

görevler için yüksek hesaplama maliyetleri ve optimizasyon zorlukları nedeniyle etkin algoritmalar gerektirmektedir [52]. Geleneksel çizge arama ve mantığa dayalı algoritmalar, bu tür problemlerin çözümünde yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda, ölçeklenebilir ve etkili bir çözüm modeli geliştirilmiştir. Görev planlama problemi, İnsansız Hava Sistemleri (İHS) için otonominin üç temel bileşeni olan *Yönlendirme*, *Navigasyon* ve *Kontrol* çerçevesinde ele alınmaktadır. Bu çalışma, İHS'nin yönlendirme bileşenine odaklanmakta ve "görev planlama" ile "rota planlama" süreçlerini incelemektedir. Görev planlama, Şekil 1'de gösterildiği gibi "görev atama" ve "rota planlama" olmak üzere iki alt bileşenden oluşmaktadır. Görev Atama görevlerin uygun İHA'lara atanmasını sağlarken rota planlama, atanan görevlerin fiziksel olarak nasıl gerçekleştirileceğini tanımlar. Rota planlama süreci iki alt bileşeni kapsamaktadır:

Yol Planlama: Engellerden kaçınma, akıcılık ve yakıt verimliliği gibi kriterleri optimize ederek en iyi rotayı belirler.

Güzergâh Planlama: Belirlenen rota üzerinde hız, irtifa, manevra ve zamanlama gibi detayları optimize eder.

Bu çalışmada, görev tahsisi ve rota planlama süreçleri bütünlük bir yaklaşımla ele alınmıştır. Görev atama, yol planlama sırasında tanımlanan kısıtlar dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu kısıtlar "Görevin İHA'ya göre konumu", "Başlama zamanı ve süresi", "Görev alanına yakın havaalanları", "Bir sonraki görevle olan zamansal ve mekânsal ilişkilerdir". Rota planlama ve güzergâh planlama süreçleri aşağıdaki varsayımlar altında modellenmiştir:

- Yer Kontrol İstasyonlarının (YKİ) İHA'larla sürekli iletişimde olduğu,
- Fiziksel veya meteorolojik engellerin bulunmadığı,
- İHA'nın hızı, faydalı yük veya dış etkenlerden bağımsız, sabit bir hız profiline sahip olduğu.

Güzergâh planlama kapsamında, İHA'nın görev alanına gidişinin iki boyutlu düz bir rotada gerçekleştiği ve görev sırasında ortalama yakıt tüketimiyle gerekli manevraları yaptığı varsayılmıştır. Bu varsayımlar, modelin analitik olarak incelenmesini kolaylaştırmak amacıyla kabul edilmiştir.

3.1. Görev Planlamada ZKTP (TCSP Based Mission Planning)

Görev planlama problemi, Kısıt Tatmin Problemi (KTP) çerçevesinde, değişkenler, kısıtlar ve etki alanları olmak üzere üç temel bileşene ayrılarak modellenir. Bu çalışmada, değişkenler görevleri temsil ederken; etki alanı, görevlerin gerçekleştirilmesinden sorumlu İHA'ları kapsar. Görevlerin başarıyla tamamlanmasını

etkileyen tüm parametreler ise kısıtlar olarak ele alınmıştır. Kısıtlar, çözüm uzayını daraltarak görev planlama sürecini optimize etmekte kritik bir rol oynar ve şu kategorilerde incelenir;

Derecelerine göre: Tekil (unary), ikili (binary) ve çok değişkenli (high-order).

Doğasına göre: Katı (hard), yumuşak (soft), statik (zamanla değişmeyen), dinamik (zamanla değişen), bağımlı ve bağımsız.

Kapsamına göre: Genel (global) ve yerel (local).

Zaman bağımlılığına göre: Zamansal (temporal) ve zamansal olmayan.

Bu sınıflandırmalar, kısıtların doğru bir şekilde modellenmesini ve çözüm algoritmalarının etkin çalışmasını sağlamak için gereklidir. Bu çalışmada kısıtlar iki ana gruba ayrılmıştır. Bunlar *Statik* ve *Dinamik* kısıtlardır.

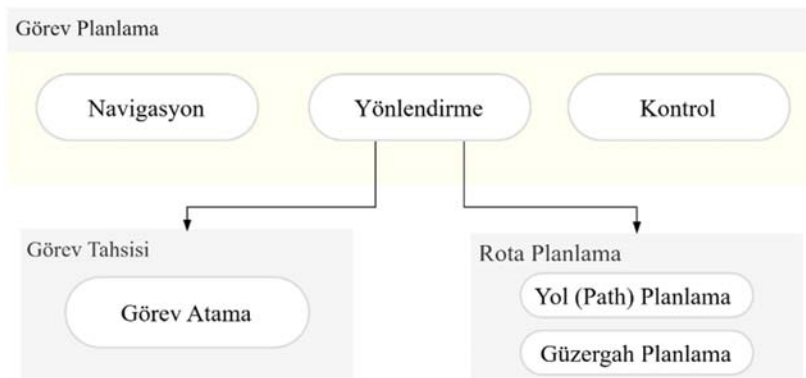
Statik Kısıtlar: Görev irtifa aralığı, bölgeye giriş izni ve dahili görev yükü gibi zamanla değişmeyen parametreler.

Dinamik Kısıtlar: Zamanla değişebilen İHA'nın konumu, yakıt durumu ve görevi tamamlama süresi gibi değişkenler.

Bu sınıflandırmalar, kısıtların doğru bir şekilde modellenmesini ve çözüm algoritmalarının etkin çalışmasını sağlamak için gereklidir. Önerilen model, Şekil 2'de gösterilen görev planlama sürecine uygun olarak iki aşamalı bir yöntemle gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, görevlerin irtifa aralığı, bölgeye giriş izni ve dahili görev yükü gibi statik kısıtlarına göre görevlerin etki alanındaki İHA'lar belirlenmiş ve problemi ZKTP için hazırlamak amacıyla bir altyapı oluşturulmuştur. Bu süreçte, zamansal komşuluğu olan görevler ikili gruplar halinde zaman pencerelerine bölünerek modellenmiş ve İHA'ların zamana bağlı yakıt ve konum gibi dinamik kısıtlarını hesaplamaya uyumlu hale getirilmiştir. İkinci aşamada, dinamik kısıtları (örneğin, yakıt ve konum gibi değişkenler) tatmin eden görev çiftleri incelenmiş ve bu görevler için İHA'lardan en uygun olanı seçilmiştir. Önerilen matematiksel model, her bir İHA'nın performansını zamana bağlı yakıt tüketimi, görev başarısı ve konum uyumluluğu gibi kriterlere göre değerlendirerek baskın bir çözüm kümesi oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu model, görev tamamlama süresini ve yakıt tüketimini minimize ederken çözüm kalitesini artırmakta ve operasyonel verimliliği iyileştirmektedir.

3.2. Görev Planlama için Önerilen Yaklaşım (The Proposed Approach for Task Planning)

Bu bölümde, İyileştirilmiş Zamansal Kısıt Tatmin Modeli'nin (İZKTP) yapısı ve KTP'nin geri izleme, ileri kontrol, yay/düğüm tutarlılığı yöntemlerinin hibritlenerek İHA görev planlamasına adaptasyonunu açıklanmaktadır. Model, statik ve dinamik kısıtları (konum, yakıt, süre) optimize ederek İHA'ların etkin atanmasını



Şekil 1. Görev planlamada yönlendirme ve alt bileşenleri (Guidance and Its Subcomponents in Mission Planning)

hedefler. İlk aşamada tüm kısıtlar iki değişkene indirgenerek çözüm uzayı daraltılır. Ardından dinamik değişkenler hesaplanır ve kontrol yöntemleriyle uygun atamalar belirlenir. Bahsedilen süreçler Şekil 2’de gösterilen işlem sırasına göre detaylandırılmıştır.

Düğüm Tutarlılığı: İlk görevde uygulanmaz, ancak sonraki görevlerde ileri kontrol ve yay tutarlılığından gelen güncellemelerle atama kısıtları yeniden değerlendirilir. Havadaki İHA’ların durumu analiz edilerek etki alanı güncellenir.

Geri İzleme: Klasik yaklaşımdan farklı olarak optimizasyon amacıyla kullanılır. En uygun aday bulunamadığında alternatif çözümler arar ve görevler arası geçişte yakıt/zaman tasarrufu sağlar.

Yay Tutarlılığı: Görevler arası uyumsuz İHA’ları elemek için kullanılır. Önceki görevlerin ileri kontrol kayıtları dikkate alınır; çakışma, yakıt yetersizliği veya görev tamamlayamama durumunda İHA’lar etki alanından çıkarılır.

İleri Kontrol: Bir İHA göreve atandığında, sonraki görevlerdeki etkisi değerlendirilir. Uygun değilse ilgili etki alanından çıkarılır. Yalnızca bir önceki görevin kayıtları dikkate alınır; havadaki ancak iniş yapmamış İHA’lar sonraki görevlerde etki alanına dahil edilmez. Bu yöntemler, İHA’ların görevler arası kesintisiz (iniş yapmadan) geçişini ve kaynak optimizasyonunu sağlayarak modelin etkinliğini artırır.

3.2.1. İZKTP ön hazırlık aşaması (ITCSP preliminary preparation phase)

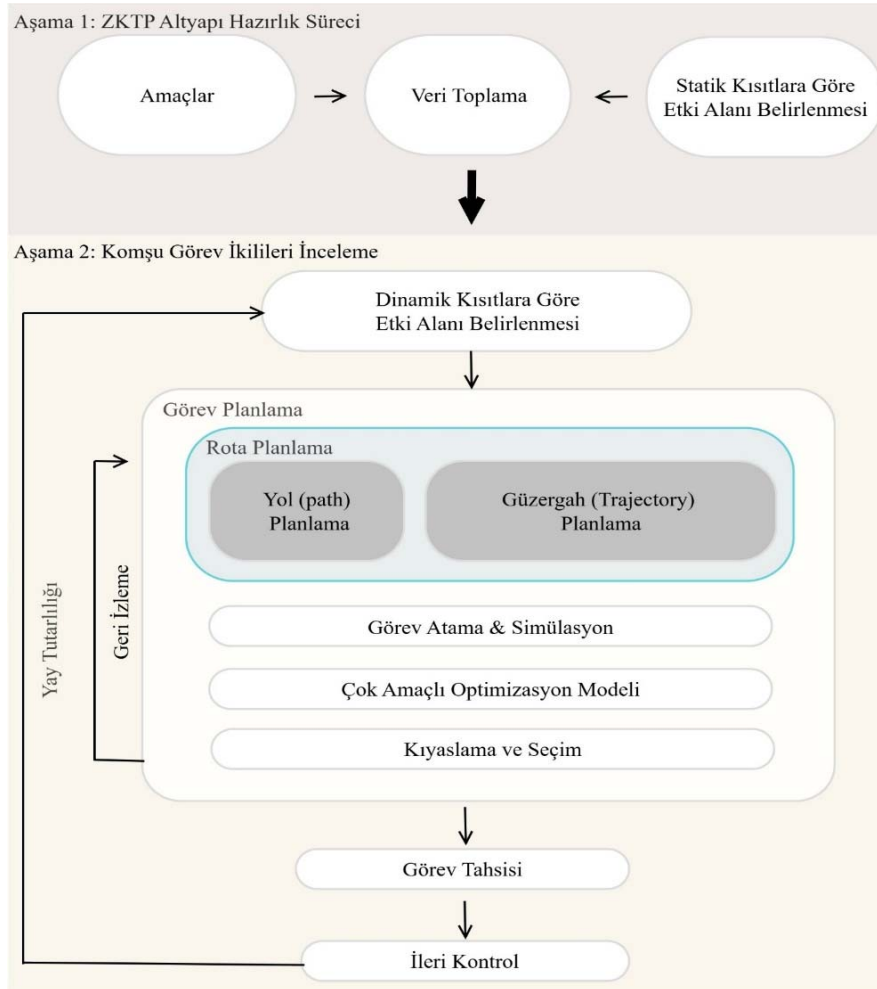
Bu problemde, görevler dizisi $T = \{T_1, T_2, \dots, T_t\}$ ’nin, İHA’lar dizisi olan $U = \{U_1, U_2, \dots, U_u\}$ filo tarafından gerçekleştirilmesi beklenir. Ayrıca hava üsleri $\mathcal{A} = \{Ab_1, Ab_2, \dots, Ab_a\}$ olarak temsil edilmiştir. Burada temel amaç görev atama ve bu kapsamda incelenen kısıtlardır. Nihayetinde ulaşılmak istenen hedef $A_T[T_t, U_u] = 1$ ’dir. Burada T_t görevine, U_u İHA’sı atanmıştır.

Zamansal kısıt (Temporal constraint): Her görev için atanan uçak zamanında göreve yetişebilmeli, görevin ifasıyla tekrar kalktığı yere inebilmelidir. Eş. 1’deki görev başlangıç zamanı $BaşlaT_T[T_t, U_u]$, kalkış zamanı $KalkışT_T$ ve göreve gidiş için geçen süre $GidişSüresi_T$ toplamına eşit olmalıdır. Benzer şekilde Eş. 2’deki görev bitiş zamanı $BitişT_T$, görev başlangıç zamanı $BaşlaT_T$ ve görev süresi $GörevSüresi$ toplamına eşit olmalıdır.

$$BaşlaT_T[T_t, U_u] = KalkışT_T[T_t, U_u] + GidişSüresi_T[T_t, U_u] \quad (1)$$

$$BitişT_T[T_t, U_u] = BaşlaT_T[T_t, U_u] + GörevSüresi_T[T_t, U_u] \quad (2)$$

Göreve giderken geçen süre $GidişSüresi_{u \rightarrow t}$, kastedilen mesafe $Mesafe_{u \rightarrow t}$ ’nin, profilde belirlenen en yüksek hızı temsil eden $Hız_{u, max}$ ’a bölünmesiyle Eş. 3’teki gibi bulunur. Hava üssünden kalkan veya daha önceki görevden döndüğü için havadayken atanan uçaklar olabilmektedir. Konumlar dinamik olarak hesaplanır.



Şekil 2. Önerilen görev planlama yaklaşımının temel adımları (Process steps of the proposed mission planning approach)

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \rightarrow \text{GidişSüresi}_{u \rightarrow t} = \frac{\text{Mesafe}_{u \rightarrow t}}{\text{Hız}_{u, \max}} \quad (3)$$

Görev süresinin tamamlanması sonrası İHA u'nun $\text{DönüşSüresi}_{t \rightarrow u}$, en yakın üsse (Ab_a) dönüş mesafesinin $\text{Mesafe}_{t \rightarrow a}$ seçilen uçuş profilinde belirlenen hızla bölünmesiyle Eş. 4'teki gibi bulunur.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \rightarrow \text{DönüşSüresi}_{t \rightarrow u} = \frac{\text{Mesafe}_{t \rightarrow a}}{\text{Hız}_{u, \max}} \quad (4)$$

Atanan İHA'ların görevlere zamanında ulaşabilmesi için gidiş geliş güzergâhları ve hızları önem taşımaktadır. Hesaplamalar İHA'nın gidiş ve geliş sürecini en yüksek hızlarda tamamlayacak şekilde yapılmakta, görev sırasında ise ortalama hız uygulanmaktadır.

İrtifa kısıtı (Altitude constraint): İHA'nın göreve atanabilmesi için çıkabileceği irtifa aralığı $\text{İrtifaAralığı}[U_u]$, görevin irtifa aralığı $\text{İrtifaAralığı}[T_t]$ 'ni Eş. 5'te ifade edildiği gibi kapsmalıdır.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U, \text{İrtifaAralığı}[T_t, U_u] \rightarrow \text{İrtifaAralığı}[T_t] \supseteq \text{İrtifaAralığı}[U_u] \quad (5)$$

Sensör kısıtı (Sensor constraint): Eş. 6'da İHA, göreve atanabilmesi için uygun faydalı yükleri (sensörlere) sahip olduğunu garanti etmelidir. İHA u'nun sahip olduğu sensörleri ifade eden $\text{İhaSensör}[U_u]$, görevin gerektirdiği sensörleri ifade eden $\text{GörevSensör}[T_t]$ 'i sağlamalıdır;

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \rightarrow \text{FaydalıYük}[T_t, U_u] \rightarrow \text{GörevSensör}[T_t] \subseteq \text{İhaSensör}[U_u] \quad (6)$$

Yetkilendirme kısıtı (Permission constraint): İHA'nın atanabilmesi için giriş izni ifadesi $\text{Girişİzni}[U_u]$, "GörevYetki" ifadesi $\text{GörevYetki}[T_t]$ ile Eş. 7'de görüldüğü üzere örtüşmelidir.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \rightarrow \text{GörevYetkilendirme}_T[T_t, U_u] \rightarrow \text{GörevYetki}[T_t] = \text{Girişİzni}[U_u] \quad (7)$$

Yakıt kısıtı (Fuel constraint): Her görev için atanan uçağın toplam yakıtı ToplamYakıt_T ; göreve gidiş GidişYakıt_T , görev bekleme $\text{GörevBeklerYakıt}_T$, görev GörevYakıt_T ve görev sonrası dönüş DönüşYakıt_T yetecek miktarda, Eş. 8'de ifade edildiği gibi olmalıdır. İHA'lar göreve hava üssünden kalkarak ya da önceki bir görevden gidilebilmektedir.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \rightarrow \text{ToplamYakıt}_T[T_t, U_u] = \text{GidişYakıt}_T[T_t, U_u] + \text{GörevBeklerYakıt}_T[T_t, U_u] \quad (8)$$

Göreve giderken ki yakıt tüketimi $\text{GidişYakıt}_T[T_t, U_u]$ hesaplanır. Bunun için Eş. 9'da gösterildiği gibi İHA u ile görev arasındaki mesafeyi temsil eden $d_{u \rightarrow t}$ ve İHA u'nun yakıt tüketim oranı $\text{YakıtTüketimOran}_u$ çarpılır.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \rightarrow \text{GidişYakıt}_T[T_t, U_u] = d_{u \rightarrow t} \times \text{YakıtTüketimOran}_u \quad (9)$$

Eş. 10'daki $\text{Yakıt}_T[T_t, U_u]$, İHA'nın görevi icra ettiği sürece harcadığı yakıtın hesaplanması işlemini tarif eder. Bunun için GörevSüresi_u , uçuş profiline bağlı Hız_t ve uçak yakıt tüketim oranı $\text{YakıtTüketimOran}_u$ çarpılır.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \rightarrow \text{Yakıt}_T[T_t, U_u] = \text{GörevSüresi}_u \times \text{Hız}_t \times \text{YakıtTüketimOran}_u \quad (10)$$

Eş. 11'de dönüşte harcanan yakıt $\text{DönüşYakıt}_T[T_t, U_u]$ hesaplanır. Bunun için görev bitimi en yakın hava üssü ile mesafeyi tarif eden $\text{Mesafe}_{t \rightarrow a}$ ile İHA'nın yakıt tüketimini ifade eden $\text{YakıtTüketimOran}_u$ ile çarpılır.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \rightarrow \text{DönüşYakıt}_T[T_t, U_u] = \text{Mesafe}_{t \rightarrow a} \times \text{YakıtTüketimOran}_u \quad (11)$$

3.2.2. KTP modelinin Oluşturulması (Generating the CSP Model)

İlk aşamayı geçen İHA'ların hangi görevleri yerine getirebileceği belirlenerek görevlerin etki alanları kısmen netleşir. İkinci aşama olan İZKTP, ardışıl görev ikililerinin zaman pencereleri kapsamında, dinamik kısıtlarla yeniden değerlendirilmesini içerir. Bu aşamada, görevler arasındaki zamansal ilişkilendirme yapılır ve şu kısıtlar dikkate alınır: havada bekleme (loiter) süresi, göreve gidiş güzergahı, yakıt durumu ve zamana bağlı diğer parametreler. Havada bulunan İHA'ların sonraki görevlere atanabilmesi için, görevlerin güncel etki alanında yer alması, süre bakımından göreve yetişebilmesi ve yakıt miktarının görev sonrası en yakın havaalanına inişe yetmesi gibi kısıtların sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle, tamamlanan her görev sonrası bir sonraki görevin etki alanı güncellenir (düğüm tutarlılığı kontrolü). Yeni görevin etki alanındaki tüm İHA'ların (havada olanlar dahil) görevi yerine getirebilme durumu yeniden değerlendirilir. Bu değerlendirme, yerde olan İHA'lar ile halihazırda havada olan İHA'lar için iki farklı şekilde gerçekleştirilir; yerde olan İHA'nın mevcut konumundan sıradaki göreve yakıt açısından ulaşabilmesi, Eş. 12'de gösterildiği gibi kontrol edilir. Havada olan İHA'larda görev sonrası iniş durumu ve yakıt gereksinimleri dikkate alınarak, mevcut görevden sonraki görevi tamamlama durumu hesaplanır.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \rightarrow \text{GidişYakıt}_T[T_{t+1}, U_u] + \text{GörevBeklerYakıt}_T[T_{t+1}, U_u] + \text{GörevYakıt}_T[T_{t+1}, U_u] + \text{DönüşYakıt}_T[T_{t+1}, U_u] < \text{İlkYakıt}_T[T_t, U_u] \quad (12)$$

Buna göre Eş. 13'de sunulan görev ikililerinde bir sonraki görevin başlangıç zamanı ifadesi $\text{BaşlaT}_T[T_{t+1}, U_u]$, önceki görevin bitiş zamanını ifade eden $\text{BitişT}_T[T_t, U_u]$ ve yeni göreve gidiş süresini ifade eden $\text{GidişSüresi}_T[T_{t+1}, U_u]$ 'in toplamından büyük olamaz. Böylece zamansal anlamda çıkan iki farklı göreve aynı uçağın atanma durumu önlenir. Hem havadan hem yerden planlanan İHA içinde aynı yöntem kullanılır.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \rightarrow \text{BaşlaT}_T[T_{t+1}, U_u] \geq \text{BitişT}_T[T_t, U_u] + \text{GidişSüresi}_T[T_{t+1}, U_u] \quad (13)$$

Fakat bir sonraki göreve de aynı İHA atanabilir ve havada bekleme süresi olursa $\text{GörevBeklerSüresi}_T[T_{t+1}, U_u]$ bu süre Eş. 14'te sunulduğu şekilde hesaplanır.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \rightarrow \text{GörevBeklerSüresi}_T[T_{t+1}, U_u] = \text{BaşlaT}_T[T_{t+1}, U_u] - (\text{BitişT}_T[T_t, U_u] + \text{GidişSüresi}_T[T_{t+1}, U_u]) \quad (14)$$

Üs'ten kalkış yapan İHA'ların (U_u) havada bekleme süresinin (loiter) $\text{GörevBeklerSüresi}_T[T_{t+1}, U_u]$ 'nin sıfır olduğu Eş. 15'de ifade edilmiştir.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \wedge \forall U_{u'} \in U \rightarrow \text{GörevBeklerSüresi}_T[T_{t+1}, U_{u'}] = 0 \quad (15)$$

Bu durumda görev ikilileri arası şartlar sağlanırsa Eş. 16'da ifade edildiği gibi aynı İHA ile her iki görevi de tamamlayabilir ya da Eş. 17'deki gibi sonraki göreve aynı İHA atanamaz ve farklı İHA atanması gerekir.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \rightarrow \text{Aynı}HA[T_t, T_{t+1}] \rightarrow A_T[T_t, U_u] = A_T[T_{t+1}, U_u] \quad (16)$$

$$\text{Farklı}HA[T_t, T_{t+1}] \rightarrow A_T[T_t, U_u] \neq A_T[T_{t+1}, U_u] \quad (17)$$

Görev ikililerinde aynı İHA'nın atandığı durumlarda karşılaşılan zamansal süreçler Allen'in Aralık Cebiri ile ilişkilendirilebilir [54] [16]. Burada kullanılan "m-meets" bir görev biterken diğerinin başladığını, "o-overlaps" görevlerin üst üste çakışan kısımları olduğunu, "s-start" görevlerin bereber başladığını, "d-during" görevlerden birinin diğer görev süresi içerisinde başlayıp bittiğini, "e-equals" görevlerin başlangıç ve bitişlerinin eşit olduğunu, "f-finish" ise görevlerin beraber bittiğini ifade eder. Bu kapsamda $A_T[T_t, U_u] = A_T[T_{t+1}, U_u] = 1$ olduğu durumlar için Allen'in alan cebirine göre zamansal çakışmalar her görev için Eş. 18-24'de ifade edilen şekilde incelenir.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \rightarrow$$

$$T_t < T_{t+1} \quad \text{Bitiş}T_t[T_t, U_u] \leq \text{Başla}T_t[T_{t+1}, U_u], \quad (18)$$

$$T_t \text{ m } T_{t+1} \quad \text{Bitiş}T_t[T_t, U_u] = \text{Başla}T_t[T_{t+1}, U_u], \quad (19)$$

$$T_t \text{ o } T_{t+1} \quad \begin{aligned} \text{Başla}T_t[T_t, U_u] &\leq \text{Bitiş}T_t[T_{t+1}, U_u], \\ \text{Bitiş}T_t[T_t, U_u] &\leq \text{Bitiş}T_t[T_{t+1}, U_u], \\ \text{Başla}T_t[T_t, U_u] &= \text{Başla}T_t[T_{t+1}, U_u], \end{aligned} \quad (20)$$

$$T_t \text{ s } T_{t+1} \quad \begin{aligned} \text{Başla}T_t[T_t, U_u] &= \text{Başla}T_t[T_{t+1}, U_u], \\ \text{Başla}T_t[T_t, U_u] &\leq \text{Bitiş}T_t[T_{t+1}, U_u], \end{aligned} \quad (21)$$

$$T_t \text{ d } T_{t+1} \quad \begin{aligned} \text{Başla}T_t[T_t, U_u] &\geq \text{Başla}T_t[T_{t+1}, U_u], \\ \text{Bitiş}T_t[T_t, U_u] &\leq \text{Bitiş}T_t[T_{t+1}, U_u], \end{aligned} \quad (22)$$

$$T_t \text{ f } T_{t+1} \quad \begin{aligned} \text{Başla}T_t[T_t, U_u] &\geq \text{Başla}T_t[T_{t+1}, U_u], \\ \text{Bitiş}T_t[T_t, U_u] &= \text{Bitiş}T_t[T_{t+1}, U_u], \end{aligned} \quad (23)$$

$$T_t = T_{t+1} \quad \begin{aligned} \text{Başla}T_t[T_t, U_u] &\geq \text{Başla}T_t[T_{t+1}, U_u] \\ \text{Bitiş}T_t[T_t, U_u] &= \text{Bitiş}T_t[T_{t+1}, U_u] \end{aligned} \quad (24)$$

Görev atamasından sonra, atanan İHA'ların yakıt durumu ve konumları değiştiği için etki alanları yeniden düzenlenir. Bu durumda, görev ikilileri arasındaki kontroller yapılmadan önce, sıradaki görev için dinamik kısıtlar (yakıt, konum vb.) güncel duruma göre incelenir. Eş. 25-27'de ifade edildiği üzere, güncel yakıt ve konum verileri kullanılarak görev etki alanı tekrar hesaplanır. Bu süreç, her görev için dinamik etki alanının güncellenmesini ve etki alanı tutarlılığının (node consistency) sağlanmasını mümkün kılar.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \quad \text{Gidiş}Yakıt_t[T_t, U_u] = \text{Mesafe}_{u \rightarrow t} \times \text{YakıtTüketimOran}_u \quad (25)$$

$$\text{Görev}Yakıt_t[T_t, U_u] = \text{GörevSüresi}_u \times \text{Hız}_{u \rightarrow t} \times \text{YakıtTüketimOran}_u \quad (26)$$

$$\text{Dönüş}Yakıt_t[T_t, U_u] = \text{Mesafe}_{u \rightarrow t} \times \text{YakıtTüketimOran}_u \quad (27)$$

Görev ikilileri arasında sensörler, giriş izni gibi değişmeyen tekil kısıtlar tekrar kontrol edilmez. Bunun yerine, yalnızca dinamik kısıtlar dikkate alınır. Özellikle, göreve gidiş, görev sırasında bekleme, görev icrası ve ardından en yakın üssün belirlenerek İHA'nın inişi gibi süreçler, yakıt yeterliliği kısıtını sağlamak için değerlendirilir. Bu değerlendirme, *göreve gidiş yakıtı* $\text{Gidiş}Yakıt_t$ üzerinden gerçekleştirilir. Örneğin, İHA u'nun bekleme süresi için harcanan yakıt $\text{Görev}Yakıt_t$, görev sırasında tüketilen yakıt $\text{Görev}Yakıt_t$ ve en yakın üsse iniş yakıtı $\text{Dönüş}Yakıt_t$ toplamı, İHA u'nun başlangıçtaki yakıt miktarı ($\text{İlk}Yakıt_t[T_t, U_u]$) ile karşılaştırılmalıdır. Bu toplamın, başlangıçtaki yakıt miktarından az

olması gerekir. $\text{Mesafe}_{t+1 \rightarrow a}$ değişkeni, son görevinden en yakın hava üssüne iniş mesafesini temsil eder. T_{t+1} görevindeki toplam yakıt tüketiminin hesaplanması Eş. 28-32'de sunulmuştur. Eş. 30'daki $\text{Hız}_{u \rightarrow t+1}$ görev süresince yapılan hızı ifade etmektedir.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \quad \text{Gidiş}Yakıt_t[T_{t+1}, U_u] = \text{Mesafe}_{u \rightarrow t+1} \times \text{YakıtTüketimOran}_u \quad (28)$$

$$\text{Görev}Yakıt_t[T_{t+1}, U_u] = \text{Mesafe}_{t+1} \times \text{YakıtTüketimOran}_u \quad (29)$$

$$\text{Görev}Yakıt_t[T_{t+1}, U_u] = \text{GörevSüresi}_u \times \text{Hız}_{u \rightarrow t+1} \times \text{YakıtTüketimOran}_u \quad (30)$$

$$\text{Dönüş}Yakıt_t[T_{t+1}, U_u] = \text{Mesafe}_{t+1 \rightarrow a} \times \text{YakıtTüketimOran}_u \quad (31)$$

$$\sum_{\substack{t \in T, u \in U \\ \text{atama}[t+1]=u}} = \text{Gidiş}Yakıt_t[T_{t+1}, U_u] + \text{Görev}Yakıt_t[T_{t+1}, U_u] + \text{Dönüş}Yakıt_t[T_{t+1}, U_u] < \text{İlk}Yakıt_t[T_t, U_u] \quad (32)$$

Sonuç olarak, görev ikilisini başaran İHA'ların görev performansı puanlanır. İHA'nın göreve gidiş süresi GidişSüresi_t ve havada bekleme süresi $\text{Görev}BeklerSüresi_t[T_{t+1}, U_u]$ ne kadar kısa olursa o kadar yüksek puan alır. İHA'nın önceki görevden dönüp inmek yerine yeni göreve atanmasının teşvik edilmesi için İHA'nın havada olduğunu belirten "Hava" ifadesi "k" katsayısı ile çarpılır ve kalan yakıt $\text{Kalan}Yakıt_t$, ilk kalkış yakıtı $\text{İlk}Yakıt_t$ 'a bölünüp "n" katsayısı eklenerek formül oluşturulur. Yakıt deposu $\text{YakıtDepo}_t[T_t, U_u]$ 'nun, yakıt tüketimi $\text{YakıtTüketimOran}_u$ 'ne oranı ise testlere göre belirlenen bir "p" katsayısı ile çarpılır. En yüksek toplam skorunu ifade eden TSkor_U ise Eş. 33'teki gibi hesaplanır ve tespit edilen İHA göreve seçilir.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U$$

$$t \in T, u \in U \quad \text{TSkor}_U = \frac{\text{YakıtDepo}_t[T_t, U_u]}{k * \text{YakıtTüketimOran}_u} - \text{atama}[t] = u$$

$$\text{GidişSüresi}_t[T_t, U_u] - \text{Görev}BeklerSüresi_t[T_{t+1}, U_u] + \left(\text{Hava} * p * \frac{\text{Kalan}Yakıt_t[T_t, U_u]}{\text{İlk}Yakıt_t[T_t, U_u]} + n \right) \quad (33)$$

Seçilen İHA ileri kontrol listesine eklenir. İleri kontrolde havada olan tüm İHA'ların görev bitiş süresi incelenir. İnme süresi dolanlar listeden çıkarılarak sonraki görev etki alanları güncellenir. Listeye yeni eklenen İHA'nın sonraki görevi başarma durumu incelenir. Başarırsa listede kalmasına izin verilir ve sonraki görevi başarma durumu havadan gidecek şekilde hesaplanır. Bunun için Eş. 34'te sunulduğu gibi İHA'nın süresi ve Eş. 35'te sunulduğu üzere yakıt durumu incelenir.

$$\forall T_t \in T \wedge \forall U_u \in U \quad \begin{aligned} \text{Bitiş}T_t[T_t, U_u] + \text{GidişSüresi}_t[T_{t+1}, U_u] + \\ \text{Görev}BeklerSüresi_t[T_{t+1}, U_u] \leq \text{Başla}T_t[T_{t+1}, U_u] \end{aligned} \quad (34)$$

$$\text{Gidiş}Yakıt_t[T_{t+1}, U_u] + \text{Görev}Yakıt_t[T_{t+1}, U_u] + \text{Dönüş}Yakıt_t[T_{t+1}, U_u] \leq \text{Kalan}Yakıt_t[T_t, U_u] \quad (35)$$

Bir sonraki görev isterlerini yerine getiremeyen İHA'lar, mevcut görevlerinin tamamlanmasının ardından en yakın üsse iniş yapar ve görev planlama listesi dışına çıkarılır. Ancak, bu İHA'lar sonraki görev atamalarında düğüm kontrolü sırasında başarılı oldukları takdirde, yeniden etki alanına dahil edilebilir. Bu bağlamda dikkate değer bir husus, gerçek dünya görev planlama problemlerinde karşılaşılan havadaki İHA'ların sonraki görevlere atanma durumu, klasik KTP'de kullanılan ileri kontrol yönteminin ötesine geçmiştir.

Önerilen çözümde, yay tutarlılığı yöntemi uyarlanarak ve dinamik programlamanın avantajlarından yararlanılarak bu sorun ele alınmıştır. İZKTP’de ileri kontrol, yalnızca bir sonraki görevin yapılabilirliğini kontrol etmekle sınırlı kalmamış; aynı zamanda havadaki İHA’ların kısıtları sağladığı sonraki görevlerle eşleşmesini mümkün kılmıştır. Bu yaklaşım, havadaki İHA’ların zaman, yakıt ve diğer dinamik kısıtlar çerçevesinde birden fazla görevle ilişkilendirilmesini sağlamaktadır.

3.3. İZKTP Modelinin Uygulanması (Implementation of the ITCSP Model)

Bu bölümde, önerilen İZKTP modeli, kurgulanan senaryolar kapsamında oluşturulan sentetik veriler üzerinde test edilmiştir. Ramirez vd.nin çalışmasından alınan sentetik veriler [52], gerçek dünya problemine yakın senaryoları denemek amacıyla belirli değişikliklerle uyarlanmıştır. Önerilen İZKTP modeli, problem dinamiğine özgü bir yaklaşımla, dinamik bir altyapı kullanılarak değerlendirilmiştir. Daha önce literatüre sunulan modelleyiciler ve çözümleyiciler (örneğin, Gecode [55], Opturion-CPX [56], Choco

[57]) genel problemler için modelleme ve çözümde hız ve kolaylık sağlasa da, bu araçlar problem dinamiklerine uyarlanırken çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu nedenle, İZKTP modelini iyileştirmek ve modelin meta sezgisel algoritmalarla entegrasyonu, görev ikilileri arası ilişkilerin farklı bir düzlemde incelenmesi gibi özellikleri desteklemek amacıyla Python’da özel bir çözüm geliştirilmiştir. Modelleme aracı kullanmak yerine sürecin Python’da kodlanması, ZKTP modeli üzerinde daha esnek işlemler yapılmasını mümkün kılmıştır. Önerilen İZKTP modeliyle, çözümün iyileştirilmesine yönelik adaptasyon sağlanmış ve dinamik problemlerin çözümüne daha etkili bir yaklaşım sunulmuştur. Senaryo kapsamında belirlenen görevler Tablo 1’de sunulmaktadır.

Benzer şekilde mevcut olan İHA’lar ve özellikleri Tablo 2’de belirtilmiştir. Çalışmada kullanılan İHA’lar heterojendir. Bunlardan sabit kanatlı ve döner kanatlı olanların farklı yakıt kapasiteleri, tüketimleri ve çeşitli faydalı yükleri mevcuttur. İHA’ların dinamik olarak değişkenlik gösteren bilgilerine kalan yakıt, ilk yakıtı, konum, zorunlu ve opsiyonel faydalı yükler sütunları ile Tablo 3’te yer verilmiştir.

Tablo 1. Görev Tanımları için Oluşturulan Sentetik Veriler (Synthetic Data Generated for Task Definitions)

ID	Görev	Süre/Dakika	Zaman	İrtifa Aralığı/km	Yetki İsteri	Öncelik	Konum
1	Alanın Resimlenmesi	25	13:30	[3 – 5] km	Hayır	5	6
2	Alanda Hareketlilik Takibi	65	13:50	[1 – 3] km	Hayır	7	4
3	Alanın Resimlenmesi	20	14:35	[0.9 – 3] km	Hayır	4	9
4	Gerçek Zamanlı görüntü aktarım	10	15:00	[3.85 – 5] km	Hayır	6	6
5	Alanın Resimlenmesi	40	16:05	[1 – 9.5] km	Hayır	1	5
6	Alanda Hareketlilik Takibi	5	18:45	[2 – 2.75] km	Evet	10	5
7	Gerçek Zamanlı görüntü aktarım	20	21:00	[3.85 – 5] km	Hayır	6	11
8	Alanda Hareketlilik Takibi	10	23:55	[2 – 4.75] km	Evet	8	8

Tablo 2. İHA Tanımları için Oluşturulan Sentetik Veriler (Synthetic Data Generated for UAV Definitions)

ID	Hız Aralığı km/h	İrtifa Aralığı km	Yakıt Tüketimi L/km	Tip	Kanat Tipi
1	[90 – 250] km/h	[0.3 – 10] km	0.272 L/km	3	1
2	[90 – 800] km/h	[0.3 – 10] km	0.0159 L/km	3	1
3	[0 – 110] km/h	[0.3 – 3] km	0.459 L/km	1	2
4	[90 – 200] km/h	[0.3 – 6] km	0.159 L/km	2	1
5	[110 – 190] km/h	[0.8 – 10] km	0.2 L/km	3	1

Tablo 3. İHA Dinamik Süreçler için Oluşturulan Sentetik Veriler
(Synthetic Data Generated for UAV Dynamic Processes)

İHA Dinamik ID	Kalan Yakıt	İlk Yakıt	Yakıt Tankı	Konum	Yasaklı Alan	Yük 1	Yük 2	Yük 1 Opsiyonel	Yük 2 Opsiyonel
1	97.52 L	97.52 L	100 L	1	YES	1	2	3	-
2	58.48 L	58.48 L	60 L	1	NO	1	2	-	7
3	140.23 L	140.23 L	150 L	1	YES	1	2	3	-
4	58.48 L	58.48 L	60 L	1	NO	-	2	3	7
5	140.23 L	140.23 L	150 L	1	YES	1	2	3	-

Tablo 4. Görev Gereği İhtiyaç Duyulan Faydalı Yükleri Tanımlayan Sentetik Veriler
(Synthetic Data Defining Mission Required Payloads)

Görev Tanımı	Grk_yük 1	Grk_yük2	Grk_yük3
Alanın Resimlenmesi	1	-	-
Alanda Hareketlilik Takibi	2	-	-
Gerçek Zamanlı görüntü aktarım	1	3	-
SAR Görüntüsü	2	-	-

3.4. Modelin Çalıştırılması (Execution of the Model)

İHA görev planlaması, en genel haliyle, “m” adet İHA’nın “n” sayıda görevi icra etmesi şeklinde tanımlanabilir. Her görev, belirli bir bölgede ve belirli bir zaman çerçevesinde gerçekleştirilir ve görevin niteliğine bağlı olarak çeşitli sensör veya ekipmanlara ihtiyaç duyar. Bu kapsamda, dört farklı görev tipi ve bu görevlerin icrası için gereken görev yükü *Grk yük* numaraları Tablo 4’te sunulmuştur. Bu değerler, farklı görev türleri için ihtiyaç duyulan Tablo 5’teki ekipman ve sensörleri temsil etmektedir.

İHA’lara takılabilecek envanterdeki faydalı yükleri gösteren Tablo 5’te sunulmuştur. Tüm görevlerin ve hava üslerinin koordinatları konum ID’si verilerek Tablo 6’da sunulmuş olup iniş yapmaya uygun üsler “Ln” olarak temsil edilmektedir. Ln sütunundaki değerler “1” olması inişe uygun olduğunu, “0” olması inişe uygun olmadığını ifade etmektedir. Tablo 7’de ise İHA’larda mevcut olan faydalı yüklerin listesi bulunmaktadır.

Bölüm 3.2’de belirtildiği üzere problem İZKTP modelinin kurgulanması için üç parçaya (değişken, etki alanı ve kısıt) ayrıldıktan sonra bir kısıt iki değişkene (binary constraint) indirgenebilmektedir. Öncelikle görevlere uçakların atanabilmesi için sabit ve tekil (unary constraint) kısıtlar (İHA’nın çıkabileceği irtifa, bölge giriş izni, sabit faydalı yük)’a göre her bir değişken için etki alanı bulunması Şekil 3’te gösterilmiştir. Dinamik kısıtların (süre, yakıt, yük, konum vb.) görev bazında incelenmesi sonrası tüm görevlerin nihai etki alanları oluşur. Bu durumda sırasıyla görevlerin tanımlı etki alanındaki İHA’lardan yakıt, süre vb. kısıtlar gözetilerek belirlenen formüle göre en uygun İHA atanır. Artık problem, her atama sonrası diğer görevlerin ardışıl ikililer şeklinde incelenerek benzer süreçlerin

tekrarlanması için uygundur. Tüm ardışıl görev ikililerinin atanmasını kapsayan görev atama konsepti Şekil 4’te gösterilmiştir.

Tablo 5. Faydalı Yükleri Tanımlayan Sentetik Veriler (Synthetic Data Defining Payloads)

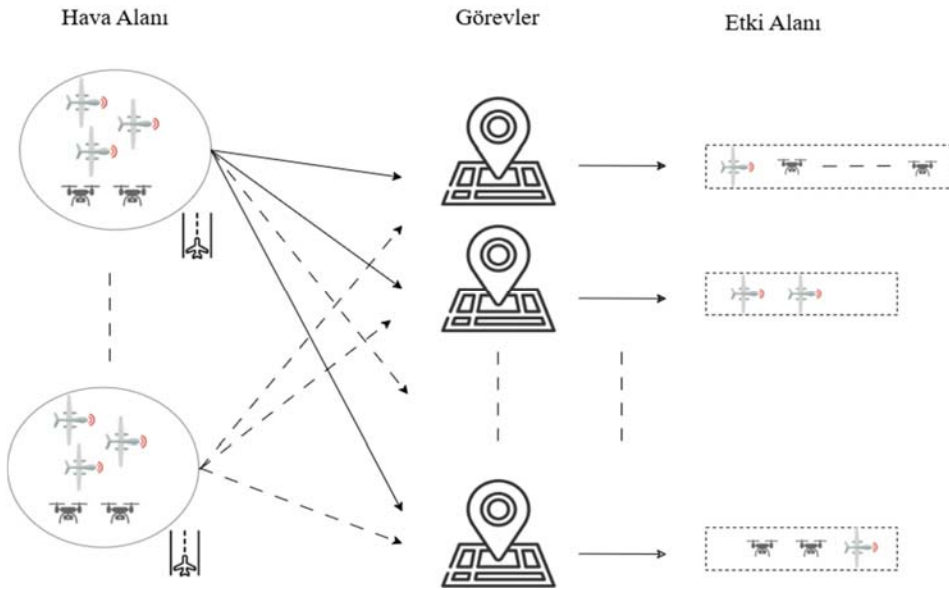
ID	Faydalı Yük Envanteri
1	Camera EO/IR
2	Radar/SAR
3	Veri İletişim Ekipmanları
4	FOX-II
5	FOX-III
6	FOX-I
7	Yakıt Tankı

Tablo 6. Görev Yeri ve Üs Koordinatlarını Tanımlayan Koordinatlar (Coordinates Defining Mission Location and Base Coordinates)

ID	X	Y	Ln
1	32.75348	39.877469	1
2	32.75799	39.87571	0
3	32.83334	39.962202	0
4	32.7652	39.869057	0
5	32.74078	39.880317	0
6	34.78647	39.747955	0
7	32.56289	40.0828	1
8	32.62219	40.50884	0
9	32.99929	40.131169	1
10	32.76139	39.875361	1
11	32.78647	39.747955	0



Şekil 3. Etki Alanına Göre İHA Görev Atama (Basics of UAV Assignment to Task from Task Domain)



Şekil 4. Çoklu Görevlere Çoklu İHA Atama (Multi-UAVs Assignment to Multi Tasks)

Tablo 7. İHA’larda Mevcut Olan Faydalı Yükleri Tanımlayan Sentetik Veriler
(Synthetic Data Describing the Payloads Available for UAVs)

PK	İHA ID	Faydalı Yük
1	1	Kamera EO/IR
2	1	Radar/SAR
3	1	Veri İletişim Ekipmanları
4	2	Radar/SAR
5	3	Kamera EO/IR
6	3	Radar/SAR
7	4	Kamera EO/IR
8	5	Kamera EO/IR
9	5	Radar/SAR
10	5	Veri İletişim Ekipmanları
11	6	Kamera EO/IR
12	6	Radar/SAR
13	6	Veri İletişim Ekipmanları
14	7	Kamera EO/IR

Görev ikilileri, zaman ve buna bağlı dinamik kısıtlar kapsamında, tüm görevler tamamlanana kadar ardışıl olarak incelenir. Görevlerin zamana bağlı çakışma durumları, Tablo 8’de sunulan Allen’in Aralık Cebiri (Allen’s Interval Algebra) ile kontrol edilir. Bu süreçte, bir önceki görev ataması ve havadaki İHA’ların durum güncellemeleri dikkate alınarak etkiler incelenir. Her bir görev çifti için, dinamik etki alanı güncellemesi yapılır ve son duruma göre görev ikilileri arasındaki güncel etki alanında en uygun İHA belirlenir. Bu süreçte; Geri İzlemeyle (Gİ) alternatif çözümlerin aranması, Yay Tutarlılığıyla (YT) görevler arasındaki kısıtların sağlanması ve en uygun İHA’nın belirlenmesi adımları kapsamında uygulanır. Eğer uygun bir İHA bulunursa, atama gerçekleştirilir. Bu işlemin görsel akışı Şekil 5’te

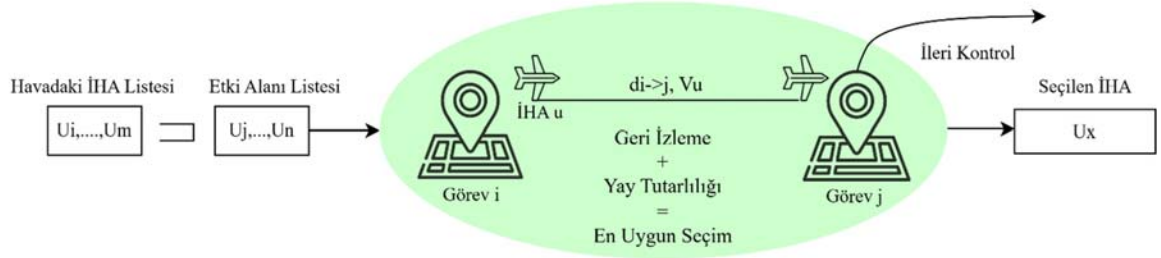
sunulmuştur. Sonraki aşamada, görev çiftleri arasındaki zaman sürekliliğini sağlamak için İleri Kontrol (İK) metodu devreye girer. Bu yöntem, görevler arasındaki uçuş sürekliliğini sağlamak için kritik bir rol oynar. İleri Kontrol metodunun görev çiftleri arasında nasıl işletildiği, Şekil 6’da gösterilmiştir.

Öncelikle ilk göreve T_1 etki alanındaki ilk uçak atanır. Sonraki atamalarda ise görev ikilileri arası İHA’ların puanlaması Bölüm 3.2’deki (33) numaralı formüle göre hesaplanır. İHA’ların seçiminde göz önünde bulundurulacak etkenler şu şekilde ifade edilebilir: havadaki uçağa öncelik verilmesi, görev için harcanan toplam yakıt, toplam sürenin düşük olması ve sonraki görevleri yapabilecek olma potansiyelidir. Denklem bu kısıtları en yüksek puanla tamamlayan İHA’yı atama üzerine tasarlanmıştır. Ataması yapılması planlanan uçağın bir sonraki görev için YT metodu ile kontrolü yapılır ve en yüksek puanlı İHA atanır. Sürecin genel işleyişini tarif eden görsel Şekil 7’de sunulmuştur. Görselde havaalanı 1’den kalkan İHA, Konum 1’deki görevini henüz tamamlamıştır, konum 2’deki görev, konum 1’deki İHA ya da diğer havaalanlarındaki İHA’lardan birisi ya da konum 3’teki görevini tamamlayan helikopter İHA ile yapabilir. Görevlerin ikili bir şekilde zamansal komşuluğuna bakılarak hangi İHA’nın göreve uygun olduğu durumu, birbirine zincirli zaman pencereleri ile takip edilip karar verilmektedir. Böylece problem küçük parçalara ayrılmakta ve ZKTP yöntemlerinin hibritlenmesi ile çözüm uzayında etkin aramalar yapılabilmektedir.

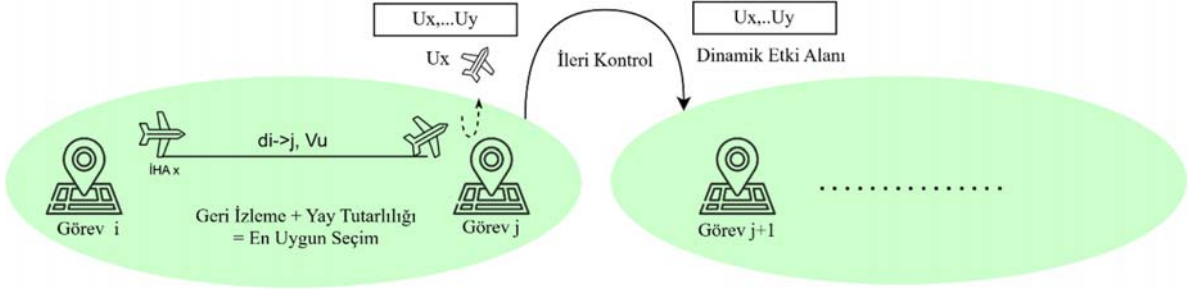
Atama sonrası havadaki tüm uçakların bir sonraki görevi yapabileceğinin kontrolü için İK metodu kullanılır. Kaynakları yetmediği belirlenen İHA’lar son görev yaptığı yerden havada bekleme olmaksızın en yakın üsse inmiş gibi hesaplanır ve maliyet hesapları kaydedilir. Döngü, bir sonraki ikilinin bahse konu süreçleri tekrarlaması ile son ikili kontrol edilene kadar devam eder. Burada her renk bir çevrimi ifade etmektedir. Bütün süreci özetleyen çevrimler boyunca hangi yöntemlerin kullanıldığı Şekil 8’de sunulmuştur.

Tablo 8. Allen’in Aralık Cebiri (Allen’s Interval Algebra) [16, 54]

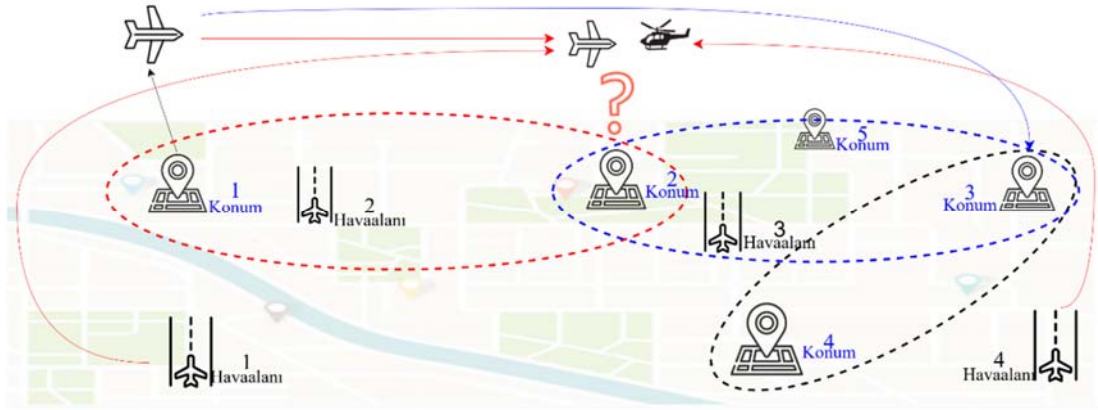
İlişki	Gösterim	Açıklama
$T_1 < T_2$	$\text{---} T_1 \text{---} T_2 \text{---}$	T_1, T_2 den öncedir
$T_1 m T_2$	$\text{---} T_1 \text{---} T_2 \text{---}$	T_1, T_2 ’ye kavuşur
$T_1 o T_2$	$\text{---} T_1 \text{---} T_2 \text{---}$	T_1, T_2 ile örtüşür
$T_1 s T_2$	$\text{---} T_1 \text{---} T_2 \text{---}$	$T_1 T_2$ ile başlar
$T_1 d T_2$	$\text{---} T_1 \text{---} T_2 \text{---}$	$T_1 T_2$ süresince
$T_1 f T_2$	$\text{---} T_2 \text{---} T_1 \text{---}$	$T_1 T_2$ ile biter
$T_1 = T_2$	$\text{---} T_1 \text{---} T_2 \text{---}$	$T_1 T_2$ ’ye eşittir.



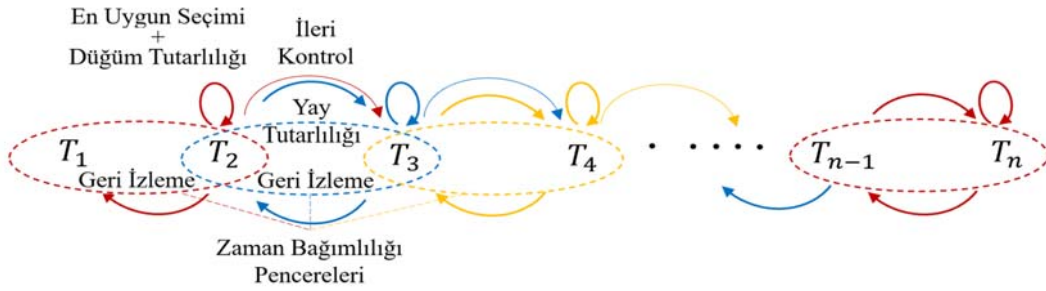
Şekil 5. Zamansal Görev İkili Penceresi (Temporal Task Pairs Window)



Şekil 6. Zamansal Görev İkili Pencere Arası Geçiş (Temporal Task Pairs Window Transition)



Şekil 7. Zamansal Görev İkili Pencere Geneli Bakış (Summary of Temporal Task Pairs Windows)



Şekil 8. Tüm Görevlerin Temel İşleyiş Mimarisi (Mission Breakdown Structure)

4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu bölümde farklı deneysel çalışmaların çıktıları sunulmuştur. Tablo 9'da sekiz farklı test iterasyonunun ilk satırı, iyileştirilmiş KTP ile; ikinci satırı ise jenerik (standart) KTP ile seçilen İHA'ları göstermektedir. Her iterasyonun ilk satırında ise görevin etki alanına giren İHA'ların listesi bulunmaktadır. Her görev için seçilen

İHA'ların Bölüm 3.2'deki (33) numaralı formüle göre hesaplanan toplam puanı Tablo 10'da sunulmuştur. İyileştirilmiş ZKTP yaklaşımı ile jenerik ZKTP arasındaki zaman ve yakıt maliyeti anlamındaki benzerlik Şekil 9'da sunulmuştur.

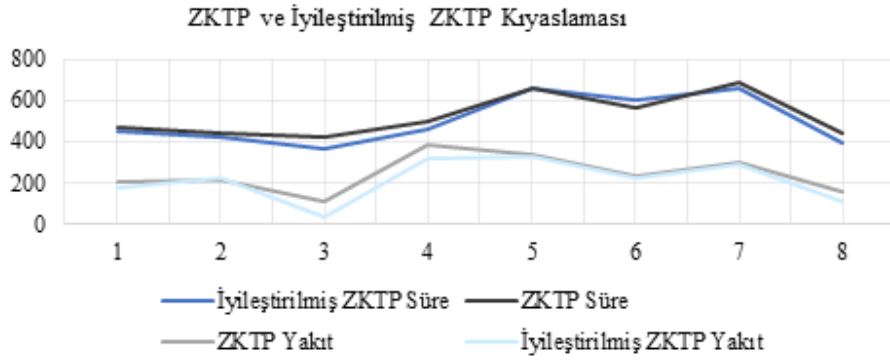
Yapılan birçok testte benzer sonuçlar alındığı için dikkat çekici test sonuçları özetlenerek sunulmuştur.

Tablo 9. Sekiz farklı Simülasyon Testi Kapsamında Görevlere Atanan İHA'lar
(Syntetic Data Produced as Assigned UAV's to the Tasks in Simulation Tests)

Görev Nu	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8
Test Nu								
Etki Alanı	[2, 5]	[1, 2, 3, 4, 5]	[1, 2, 3, 5]	[1, 5]	[1, 2, 5]	[1, 3, 5]	[1, 5]	[1, 5]
1	2	5	2	1	1	5	5	1
	2	1	2	5	1	1	1	1
Etki Alanı	[2]	[2, 3, 4, 5]	[2, 3, 5]	[1]	[1, 2, 5]	[3, 5]	[1, 5]	[5]
2	2	5	2	1	2	5	5	5
	2	3	2	1	1	3	1	5
Etki Alanı	[5]	[1, 2, 3, 4, 5]	[3, 5]	[5]	[5]	[1, 3, 5]	[5]	[1, 5]
3	5	2	5	5	5	5	5	5
	5	1	3	5	5	1	5	1
Etki Alanı	[1, 2, 3, 4]	[1, 3]	[3, 4]	[1, 3, 4]	[3, 4]	[1, 2, 3]	[1, 3, 4]	[3, 4]
4	1	3	4	1	4	2	3	3
	1	3	4	1	3	1	1	3
Etki Alanı	[5]	[1, 3, 5]	[1, 3, 5]	[5]	[1, 5]	[1, 3, 5]	[1, 5]	[1, 5]
5	5	1	3	5	1	5	5	5
	5	1	3	5	1	1	1	1
Etki Alanı	[2, 5]	[1, 2, 3, 4, 5]	[1, 2, 3, 5]	[1, 5]	[2, 5]	[5]	[5]	[5]
6	2	5	2	5	2	5	5	5
	2	1	2	1	2	1	1	1
Etki Alanı	[1, 2, 5]	[1, 2, 3, 4, 5]	[1, 2, 3, 5]	[1, 5]	[1, 2, 5]	[1, 5]	[1, 5]	[1, 5]
7	1	2	5	1	2	1	1	1
	1	2	3	1	2	1	1	1
Etki Alanı	[2, 5]	[1, 2, 3, 5]	[1, 3, 5]	[1, 2, 5]	[2, 5]	[1, 3, 5]	[1, 2, 5]	[1, 5]
8	2	5	1	2	2	5	2	5
	2	1	3	1	2	1	1	1

Tablo 10. Farklı Görevlendirmeler Sonucu Simülasyon Testlerinde Üretilen Sonuçlar
(Syntetic Data Produced as Total Scores for Each Tasks in Simulation Tests)

Toplam İterasyon		$\hat{I}_1$	$\hat{I}_2$	$\hat{I}_3$	$\hat{I}_4$	$\hat{I}_5$	$\hat{I}_6$	$\hat{I}_7$	$\hat{I}_8$	$\hat{I}_9$
İZKTP	Zaman (dk.)	446.077	419.7	366.524	459.846	659.81	602.30	660.43	389.33	446.07
	Yakıt (lt)	180.272	221.8	33.64	317.85	331.73	226.5	291.90	108.486	180.27
ZKTP	Zaman (dk.)	471.34	442.8	425.56	501.274	654.28	567.54	685.41	438.18	471.34
	Yakıt (lt)	208.53	214.3	112.73	385.011	334.73	233.50	299.90	160.28	208.53



Şekil 9. Karşılaştırmalı Çıktılar - Toplam Zaman ve Yakıt Skorları
(Comparative Outputs - Total Time and Fuel Scores)

Test sonuçlarının tümü incelendiğinde, 64 görevde ZKTP yöntemiyle 64 iniş-kalkış yapılarak İHA görevlendirme; İZKTP’de ise 52 iniş-kalkış yapılarak İHA görevlendirme ile tamamlandığı görülmektedir. 12 İHA sortisinin daha az olması, havadaki uçağın bir sonraki göreve inmeden planlanabilmesidir. İZKTP ile “yaklaşık 4004 dakika ve 1712.3” litre yakıtla tamamlanan görev paketi standart ZKTP’de yaklaşık “4186.4 dakika ve 1949 litre” gerçekleştirilmiştir. Burada sadece 5 hava aracı ve 8 görev içeren bir süreçte bile havada kalma süresi üç saatten fazla düşürülebilmekte ve 250 litreden fazla yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada önerilen İyileştirilmiş Zamansal Kısıt Tatmin Problemi (İZKTP) yaklaşımı, görev planlamasını bir Kısıt Tatmin Problemi (KTP) olarak formüle etmiş ve kısıt tatmin teknikleriyle çözmüştür. Ancak, gerçek dünya problemlerine daha yakın bir modelleme yapıldığında ve kısıtlar arttığında, çözüm maliyeti üstsel bir şekilde yükselecektir. Bu noktada, meta-sezgisel yöntemlerin hibritlenmesi, karmaşıklığı azaltmak ve geniş çözüm uzayında etkili çözümlere ulaşmak için kaçınılmaz hale gelmektedir. Önerilen İZKTP, meta-sezgisel algoritmaların arama kapasitesini artırarak çözüm uzayında daha başarılı sonuçlara ulaşmayı sağlamaktadır. Bu amaçla, ZKTP modeli iyileştirilmiş ve meta-sezgisel algoritmanın arama yönünü belirlemek için hedefler tanımlanmış, böylece arama uzayı daraltılmıştır. Önerilen geri izleme yöntemi, yalnızca kısıtları tatmin eden seçenekleri değil, aynı zamanda göreve atanabilecek en uygun seçeneği bulmak için kullanılmıştır. ZKTP’ye entegre edilmek üzere geliştirilen matematiksel model, yakıt ve süre maliyetlerini düşürmek, riskleri minimize etmek amacıyla başarılı bir şekilde test edilmiştir. Ayrıca, hibrit yaklaşım ile dinamik etki alanı, ileri kontrol ve yay tutarlılığı yöntemleri birleştirilerek ZKTP’ye entegre edilmiştir. Böylece, ardışık iki görevin iniş yapmadan yerine getirilmesi ZKTP’ye adapte edilmiştir. Farklı İHA tiplerinin yakıt depoları ve tüketimleri göz önünde bulundurularak, İHA tiplerinin görev uygunlukları etkili bir şekilde değerlendirilmiştir. Ayrıca, havadaki İHA’ların iniş yapmadan ikinci bir göreve atanmasının risk azaltıcı yönü, formülde teşvik edici bir katsayı ile tanımlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında, beş İHA ve sekiz görevin oluşturduğu 5⁸’lik çözüm uzayı, yani 390.000’den fazla olası senaryo, standart KTP ile statik ve dinamik kısıtlara bağlı olarak 5⁴’lük bir çözüm uzayına indirgenebilmektedir. İZKTP modeli ile bu çözüm kümesi daha da optimize edilmiş ve etkili çözümlerin bulunabileceği matematiksel olarak gösterilmiştir. Toplam 64 görevin yer aldığı senaryoda, ZKTP yöntemi 64 iniş-kalkış gerektirirken, İZKTP yöntemi 52 iniş-kalkış ile görevleri tamamlayabilmiştir. İZKTP’deki bu avantaj, havadaki İHA’ların bir sonraki görevlere iniş yapmadan planlanabilmesi sayesinde elde edilmiştir. ZKTP ile görev paketi yaklaşık 4004 dakika ve 1712.3 litre yakıt tüketilerek tamamlanırken, standart KTP’de aynı görevler yaklaşık 4186.4 dakika ve 1949 litre yakıt ile gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar, sadece 5 İHA ve 8 görev içeren bir süreçte bile, İZKTP’nin havada kalma süresini üç saatten fazla azaltabildiğini ve 250 litreden fazla yakıt tasarrufu sağladığını göstermektedir. Bu iyileştirmeler, hem operasyonel maliyetlerin düşürülmesi hem de zaman tasarrufu açısından İZKTP’nin etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır. Diğer yandan, ZKTP modeline entegre edilen hibrit yöntem ile ardışık iki görevi aynı İHA’nın havadayken yapabilmesi olası çözüm uzayını genişletmiştir. Görevler bağımsız kabul edilmekle birlikte, İHA’nın mevcut görevini tamamlamış olması ve dinamik kısıtları sağlaması (yakıt, zaman, faydalı yük vb.) sonraki görevlere atanabilmesi için gerekli ön kısıtları ifade eder. Bu kısıtlar, bağımsız görevleri temsil eden çözüm uzayı üzerinde dinamik bir filtreleme etkisi yapar. Göreve atanan İHA’ların sonraki diğer n adet göreve planlanabilmesi ya da m adet havaalanına inebilmesi durumu olasılık uzayına eklenir ise çözüm uzayı $(n! * m!)$ ⁸ gibi çok

büyük bir domaine sahip olur. Böylesine geniş bir çözüm uzayına sahip problemlerde, tüm seçeneklerin kaba kuvvetle denemesi pratik olmadığından, meta-sezgisel yaklaşımların adaptasyonu kaçınılmazdır.

Gelecekteki çalışmalar kapsamında, yakıt, havada kalma süresi ve risk gibi faktörlerin çok amaçlı optimizasyon ve Q-öğrenme gibi derin öğrenme yöntemleriyle detaylandırılması ve gerçek dünya problemlerine yakınsamaya yönelik İHA’ların manevra yetenekleri, engeli arazi koşulları, sinyalizasyon ve hava durumu etkilerinin modele dahil edilmesi planlanmaktadır. Gerçek zamanlı uygulama desteği sağlama, görev atamalarının önceliklendirilmesini de dikkate alarak modellenmesi ve zorunlu ya da opsiyonel görevlerin ağırlıklandırılması konuları da gelecekte yapılması planlanan çalışmalardandır. Ayrıca, operasyonel iyileştirmelere yönelik hava üslerinin yeteneklerine göre iniş planlaması, havadaki yakıt ikmali yeteneklerinin eklenmesi, ses altı (subsonic) ve ses üstü (supersonic) ayrımlarına göre İHA atamaları, eşzamanlı ve gerçek zamanlı planlama mekanizmalarının geliştirilmesi hususları da gerçek dünya koşullarına yakınsamasını sağlayacak ve daha karmaşık senaryolarda etkin çözümler sunulmasına olanak tanıyacaktır.

6. Simgeler (Symbols)

T	: Görevler kümesi
U	: Uçaklar Kümesi
$\mathcal{A}$	: Havaalanları kümesi
L	: Litre

6.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

MILP	: Mixed Integer Linear Programming
AC	: Air Consistency
BT	: Backtracking
CSP	: Cosntraint Satisfaction Problem
DT	: Düğüm Tutarlılığı
GA	: Genetik Algoritma
GI	: Geri İzleme
EO	: Elektro Optik
FC	: Forward Checking
IR	: Infrared
ITCSP	: Improved Temporal Cosntraint Satisfaction Problem
İHS	: İnsansız Hava Aracı Sistemleri
İK	: İleri Kontrol
İZKTP	: İyileştirilmiş Zamansal Kısıt Tatmin Problemi
KTP	: Kısıt Tatmin Problemi
İHA	: İnsansız Hava Aracı
MOGA	: Multi Obejective Genetic Algorithm
NC	: Node Consistency
RL	: Reinforcement Learning
TCSP	: Temporal Cosntraint Satisfaction Problem
UAV	: Unmanned Air Vehicle
YKİ	: Yer Kontrol İstasyonu
YT	: Yay Tutarlılığı
ZKTP	: Zamansal Kısıt Tatmin Problemi

Kaynaklar (References)

1. Achtelek M.C., Stumpf J., Gurdan D., Doth K.M. Design of a Flexible High Performance Quadcopter Platform Breaking the MAV Endurance Record with Laser Power Beaming. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 5166-5172, 2011.
2. Alighanbari M., Bertuccelli L., How J. Filter-Embedded UAV Task Assignment Algorithms for Dynamic Environments. Doktora Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, Cambridge, ABD, 2004.
3. Allen J.F. Maintaining Knowledge About Temporal Intervals. Communications of the ACM, 26 (11), 832-843, 1983.

4. Amazon. Prime Air. About Amazon. <https://www.aboutamazon.com/news/tag/prime-air>. Yayın tarihi: 2020. Erişim tarihi: 24 Ekim 2023.
5. Bektas T. The Multiple Traveling Salesman Problem: An Overview of Formulations and Solution Procedures. *Omega*, 34 (2), 209-219, 2006.
6. Bethke B., Valenti M., How J.P. UAV Task Assignment. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 15 (1), 39-44, 2008.
7. Byung D.S., Kyungsu P., Jonghoe K. Persistent UAV Delivery Logistics: MILP Formulation and Efficient Heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 120, 418-428, 2018.
8. Chen Y., Yang D., Yu J. Multi-UAV Task Assignment with Parameter and Time-Sensitive Uncertainties Using Modified Two-Part Wolf Pack Search Algorithm. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 54 (6), 2853-2872, 2018.
9. De Almeida D.R.A. ve diğerleri. Monitoring Restored Tropical Forest Diversity and Structure Through UAV-Borne Hyperspectral and Lidar Fusion. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112582, 2021.
10. Doherty J., Kvamström F., Heintz F. A Temporal Logic-Based Planning and Execution Monitoring Framework for Unmanned Aircraft Systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 19 (3), 332-377, 2009.
11. Edison E., Shima T. Integrated Task Assignment and Path Optimization for Cooperating Uninhabited Aerial Vehicles Using Genetic Algorithms. *Computers & Operations Research*, 38 (1), 340-356, 2011.
12. Fabiani P., Fuertes V., Piquereau A., Mampey R., Teichteil-Konigsbuch F. Autonomous Flight and Navigation of VTOL UAVs: From Autonomy Demonstrations to Out-of-Sight Flights. *Aerospace Science and Technology*, 11 (2-3), 183-193, 2007.
13. Fargier H., Lang J. Uncertainty in Constraint Satisfaction Problems: A Probabilistic Approach. *European Conference on Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning and Uncertainty*, 97-104, 1993.
14. Gao H. ve diğerleri. UAV-Assisted Multitask Allocation Method for Mobile Crowd Sensing. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2022.
15. Gao S., Wu J., Ai J. Multi-UAV Reconnaissance Task Allocation for Heterogeneous Targets Using Grouping Ant Colony Optimization Algorithm. *Soft Computing*, 25 (6), 7155-7167, 2021.
16. Gaowei J., Jianfeng W., Peng W., Qingyang C., Yujie W. Using Multilayer Coding Genetic Algorithm to Solve Time-Critical Task Assignment of Heterogeneous UAV Teaming. *International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)*, Grenoble, Fransa, 2019.
17. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4 (2), 100-107, 1968.
18. Hillier F.S. *Introduction to Operations Research*. McGraw-Hill, New York, ABD, 2001.
19. Huang H., Zhuo T. Multimodel Cooperative Task Assignment and Path Planning of Multiple UAV Formation. *Multimedia Tools and Applications*, 78 (1), 415-436, 2019.
20. Ji X., Zhao Y. Architecture Design for Unmanned Aerial Vehicle Mission Planning System. *International Conference on Modeling, Simulation and Big Data Analysis*, 419-424, 2019.
21. Jia Z., Yu J., Ai X., Xu X., Yang D. Cooperative Multiple Task Assignment Problem with Stochastic Velocities and Time Windows for Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles Using a Genetic Algorithm. *Aerospace Science and Technology*, 76, 112-125, 2018.
22. Jussien N., Rochart G., Lorea X. Choco: An Open Source Java Constraint Programming Library. *CPAIOR'08 Workshop on Open-Source Software for Integer and Constraint Programming*, 1-10, 2008.
23. Kiran B.R., Sobh I., Talpaert V., Mannion P., Al Sallab A.A., Yogamani S., Pérez P. Deep Reinforcement Learning for Autonomous Driving: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23 (6), 4909-4926, 2021.
24. Laroche P., Charpillet F., Schott R. Mobile Robotics Planning Using Abstract Markov Decision Processes. *11th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, 299-306, 1999.
25. LaValle S.R., Latombe J.C. An Approach to Mission Planning for Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1995.
26. Li J.T., Zhang S., Zheng Z., Xing L.N., He R.J. Research on Multi-UAV Loading Multi-Type Sensors Cooperative Reconnaissance Task Planning Based on Genetic Algorithm. *13th International Intelligent Computing Theories and Application*, Liverpool, İngiltere, 2017.
27. Li M. ve diğerleri. Task Allocation on Layered Multiagent Systems: When Evolutionary Many-Objective Optimization Meets Deep Q-Learning. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 25 (3), 842-855, 2021.
28. Low A.M. *The Pilotless Aircraft*. Flight, 1916.
29. Luo W. ve diğerleri. Learning-Based Policy Optimization for Adversarial Missile-Target Assignment. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51 (7), 4426-4437, 2021.
30. McGetrick R.J. The Ryan Firebee. *Proceedings of the IEEE*, 51 (3), 1963.
31. Mills-Tettey G.A., Stentz A., Dias M.B. The Dynamic Hungarian Algorithm for the Assignment Problem with Changing Costs. *Carnegie Mellon University, Robotics Institute, Pittsburgh, ABD*, 2007.
32. Mohsan S.A.H., Khan M.A., Noor F., Ullah I., Alsharif M.H. Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review. *Drones*, 6 (6), 147, 2022.
33. Nethercote N., Stuckey P.J., Becket R., Brand S., Duck G.J., Tack G. MiniZinc: Towards a Standard CP Modelling Language. *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, 529-543, 2007.
34. Nex F., Armenakis C., Cramer M., Cucci D.A., Gerke M., Honkavaara E., Kukko A., Persello C., Skaloud J. UAV in the Advent of the Twenties: Where We Stand and What Is Next. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 184, 215-242, 2022.
35. O'Rourke K.P., Carlton W.B., Bailey T.G. Dynamic Routing of Unmanned Aerial Vehicles Using Reactive Tabu Search. *Military Operations Research*, 6 (1), 5-30, 2001.
36. Ramirez-Atencia C., Bello-Organ G., R-Moreno M.D., Camacho D. A Simple CSP-Based Model for Unmanned Air Vehicle Mission Planning. *IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, Alberobello, İtalya, 146-153, 2014.
37. Ramirez-Atencia C., Bello-Organ G., R-Moreno M.D., Camacho D. A Hybrid MOGA-CSP for Multi-UAV Mission Planning. *Proceedings of the Companion Publication of the Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 120, 2015.
38. Ramirez-Atencia C., Camacho D. Constrained Multiobjective Optimization for Multi-UAV Planning. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10 (7), 2467-2484, 2019.
39. Richoux F., Uriarte A., Baffier J.F. Ghost: A Combinatorial Optimization Framework for Realtime Problems. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 8 (4), 377-388, 2016.
40. Schumacher C., Chandler P., Pachter M. UAV Task Assignment with Timing Constraints. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 5664, 2003.
41. Secrest B.R. *Travelling Salesman Problem for Surveillance Mission Using Particle Swarm Optimization*. Biblioscholar, California, ABD, 2001.
42. Shakoor S. ve diğerleri. Role of UAVs in Public Safety Communications Energy Efficiency Perspective. *IEEE Access*, 7, 140665-140679, 2019.
43. Shima T., Rasmussen S.J., Sparks A.G. Multiple Task Assignments for Cooperating Uninhabited Aerial Vehicles Using Genetic Algorithms. *Computers & Operations Research*, 33 (11), 3252-3269, 2006.
44. Shin J., Badgwell T.A., Liu K.H., Lee J.H. Reinforcement Learning -- Overview of Recent Progress and Implications for Process Control. *Computers & Chemical Engineering*, 127, 282-294, 2019.
45. Shrestha R., Bajracharya R., Kim S. 6G Enabled Unmanned Aerial Vehicle Traffic Management: A Perspective. *IEEE Access*, 9, 91119-91136, 2021.
46. Song B.D., Park H., Park K. Toward Flexible and Persistent UAV Service: Multiperiod and Multiobjective System Design with Task Assignment for Disaster Management. *Expert Systems with Applications*, 206, 2022.
47. Song J., Zhao K., Liu Y. Survey on Mission Planning of Multiple Unmanned Aerial Vehicles. *Aerospace*, 10 (3), 208, 2023.
48. Sullivan C.J., Bosanac N. Using Multiobjective Deep Reinforcement Learning to Uncover a Pareto Front in Multibody Trajectory Design. *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Virtual Event*, 9-12, 2020.
49. Techcrunch. Russian Scientists Put a Defibrillator on a Drone. TechCrunch. <https://techcrunch.com/2017/07/27/russian-scientists-put-a-defibrillator-on-a-drone/>. Yayın tarihi: 27 Temmuz 2017. Erişim tarihi: 11 Eylül 2023.

50. Turner J., Meng Q., Schaefer G., Whitbrook A., Soltoggio A. Distributed Task Rescheduling with Time Constraints for the Optimization of Total Task Allocations in a Multi-Robot System. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 48 (9), 2583-2597, 2018.
51. Wallace R.J., Freuder E.C. Stable Solutions for Dynamic Constraint Satisfaction Problems. *Proceedings of the International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, 447-461, 1998.
52. Wang X., Wang H., Zhang H., Wang M., Wang L., Cui K., Ding Y. A Mini Review on UAV Mission Planning. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 19 (5), 2023.
53. Wu X., Yin Y., Xu L., Wu X., Meng F., Zhen R. Multi-UAV Task Allocation Based on Improved Genetic Algorithm. *IEEE Access*, 9, 100369-100379, 2021.
54. Xu G., Long T., Wang Z. Target-Bundled Genetic Algorithm for Multi-Unmanned Aerial Vehicle Cooperative Task Assignment Considering Precedence Constraints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 234 (3), 760-773, 2020.
55. Yan P., Tan B. Evolutionary Group Theoretic Tabu Search Approach to Task Allocation of Autonomous Unmanned Aerial Vehicles. *10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, 687-692, 2013.
56. Ye F., Chen J., Sun Q., Tian Y., Jiang T. Decentralized Task Allocation for Heterogeneous Multi-UAV System with Task Coupling Constraints. *The Journal of Supercomputing*, 77 (1), 77-86, 2021.
57. Yi S., Long Z., Lin J. Task Assignment of Heterogeneous UAV for Antiradar Mission Using CTAP Models. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Tianjin, Çin, 1980-1985, 2019.
58. Zhang X., Chen X. UAV Task Allocation Based on Clone Selection Algorithm. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 1-9, 2021.

