T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTONOM HAVA ARAÇLARI İÇİN DAĞITIK PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU İLE GÜVENLİ VE VERİMLİ ROTA PLANLAMASI

Alpaslan TETİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Aviyonik Mühendisliği Anabilim Dalı
Aviyonik Mühendisliği Programı

Danışman
Doç. Dr. Yavuz EREN

Ocak, 2026

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTONOM HAVA ARAÇLARI İÇİN DAĞITIK PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU İLE GÜVENLİ VE VERİMLİ ROTA PLANLAMASI

Alpaslan TETİK tarafından hazırlanan tez çalışması 22.01.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Aviyonik Mühendisliği Anabilim Dalı, Aviyonik Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Yavuz EREN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Yavuz EREN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Bahadır ÇATALBAŞ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Zeki KUŞ, Üye
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Yavuz EREN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Otonom Hava Araçları için Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Güvenli ve Verimli Rota Planlaması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Alpaslan TETİK

İmza

Aileme

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının konusunun belirlenmesinden sonuçlandırılmasına kadar geçen tüm süreçte; engin bilgi birikimi, tecrübesi ve vizyonuyla bana yol gösteren, karşılaştığım zorluklarda yardımlarını ve sabrını esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Yavuz EREN'e en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca akademik gelişimime katkı sağlayan Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aviyonik Mühendisliği Anabilim Dalı'ndaki tüm değerli hocalarıma şükranlarımı sunarım.

Hayatımın her aşamasında olduğu gibi bu zorlu süreçte de maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen, varlıklarıyla bana güç veren kıymetli ailem'e; sabırları, fedakârlıkları ve sonsuz güvenleri için minnettarım. Tüm başarılarımın arkasındaki gizli kahramanlar onlardır.

Son olarak, çalışmalarım sırasında motivasyonumu artıran ve fikir alışverişinde bulunduğum değerli meslektaşlarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Alpaslan TETİK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

1 GİRİŞ 1

1.1 Problem Tanımı 1
1.2 Literatür Özeti 2
1.3 Çalışmanın Amacı ve Katkıları 5
1.4 Hipotez 7
1.5 Metodoloji 7

2 SİSTEM TANIMI 9

2.1 Görev Sahası ve Ortam Modeli 9
2.2 Arazi Engelleri 10
2.3 Radar Modeli 11
2.3.1 Küresel Radar Kapsama Alanı 11
2.3.2 Sayısal Stabilite İçin Ölçekleme 12
2.3.3 Radar Geometrisinin Görselleştirilmesi 12
2.4 Hava Aracı Modeli 13

3 DAĞITIK PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU 15

3.1 PSO Algoritması 15
3.1.1 PSO'nun Matematiksel Modeli 15
3.1.2 Durağanlaşma Problemi ve Rastgele İtki Mekanizması . . . 18
3.1.3 Maliyet Fonksiyonu ve Uygunluk Değerlendirmesi 19

3.1.4 Manuel Hareket Mekanizması ve Rekürsif Yerel Minimumdan Kaçış 29
3.2 Dağıtık PSO Algoritması 32
3.2.1 Nihai Rota Seçimi ve Optimizasyon Kararı 34

4 BENZETİM ÇALIŞMALARI **36**
4.1 Simülasyon Ortamının Yapılandırılması 36
4.2 Senaryo 1: Engelsiz Uçuş ve Temel Navigasyon 37
4.3 Senaryo 2: İrtifa Engelli ve Sıra Dağlı Arazi Uçuşu 39
4.4 Senaryo 3: Açısal Alan Kısıtının Çoklu Güzergah Keşfine Etkisi . . 42
4.5 Senaryo 4: Gerçek Topoğrafya ve Karmaşık Arazide Rota Optimizasyonu 44
4.6 Senaryo 5: Karmaşık Tehdit Ortamında Rekürsif Rota Planlama ve Doğrulama 48
4.7 PSO ve DPSO Performans Analizi 50

5 SONUÇ **54**

KAYNAKÇA **57**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **61**

SİMGE LİSTESİ

α	Lojistik radar tespit fonksiyonunun geçiş keskinliği parametresi
ε	Sayısal stabilite amacıyla kullanılan küçük pozitif sabit
ε_v	Parçacık hız durgunluğu (stagnation) eşik değeri
ΔH	Hataları tolere etmek için tanımlanan dikey güvenlik marjı
η	Standart normal dağılımdan üretilen rastgele değişken
λ_A	Alan ihlali ceza katsayısı
λ_C	Engel çarpışma ceza katsayısı
λ_H	İrtifa maliyeti ağırlık katsayısı
λ_L	Rota uzunluğu maliyeti ağırlık katsayısı
λ_R	Radar görünürlük maliyeti ağırlık katsayısı
Ω	Üç boyutlu görev sahası (çalışma uzayı)
ψ	Yönelim (yaw) açısı (rad)
ψ_{hedef}	Hedeflenen bir sonraki düğüm noktasına olan açı (rad)
η	İrtifa geçiş (yumuşatma) katsayısı
ω_{max}	Maksimum dönüş hızı (rad/s)
(x, y, z)	Kartezyen koordinat sistemi
(x_i, y_i)	i'inci arazi yükseltisinin merkez koordinatları
c_1	PSO bireysel öğrenme katsayısı
c_2	PSO sosyal öğrenme katsayısı
$d(\mathbf{p})$	Radar ile İHA arasındaki Öklidyen mesafe
d_{safety}	Arazi üzerinde korunması gereken minimum güvenli irtifa mesafesi
dt	Örnekleme zaman adımı ($Saniye$)
$H(x, y)$	Toplam arazi yükseklik fonksiyonu

$H_{base}(x, y)$	Temel arazi yüzeyi
H_i	i'inci lokal arazi yükseltisinin maksimum yüksekliği
$h_i(x, y)$	i'inci lokal arazi yükseltisi fonksiyonu
$J(\mathbf{x}_i)$	Toplam uygunluk (fitness) fonksiyonu
J_A	Alan ihlali maliyeti
J_C	Engel çarpışma maliyeti
J_H	İrtifa kısıtı maliyeti
J_L	Rota uzunluğu maliyeti
J_R	Radar görünürlük maliyeti
k	İterasyon indeksi
N	Parçacık sayısı
N_h	Arazi yükselti sayısı
$P_{det}(d)$	Radar tespit olasılığı
$\tilde{P}_{det}(d)$	Stabilize edilmiş radar tespit olasılığı
$\mathbf{p}$	İHA veya parçacık konum vektörü
$\mathbf{pbest}_i$	i'inci parçacığın bireysel en iyi konumu
$\mathbf{gbest}$	Sürünün küresel en iyi konumu
R	Radar algılama menzili
r_1, r_2	PSO'da kullanılan rastgele katsayılar
$\mathbf{r}_0$	Radar konum vektörü
sgn$(\cdot)$	İşaret (signum) fonksiyonu
T_{wait}	Durgunluk tespiti için beklenen eşik iterasyon sayısı
$\mathbf{v}_i^k$	i'inci parçacığın k'ıncı iterasyondaki hız vektörü
$v_{x,max}$	Maksimum x-ekseni hız sınırı
$v_{y,max}$	Maksimum y-ekseni hız sınırı
$v_{z,max}$	Maksimum z-ekseni hız sınırı
V_{max}	Genel maksimum hız sınırı
w	PSO atalet katsayısı
$w_{x,i}$	i'inci yükseltinin x-yönü yayılım parametresi

$w_{y,i}$	i'inci yükseltinin y-yönü yayılım parametresi
$\mathbf{x}_i^k$	i'inci parçacığın k'ıncı iterasyondaki konumu
X_{min}, X_{max}	Görev sahasının x-ekseni sınırları
Y_{min}, Y_{max}	Görev sahasının y-ekseni sınırları
z_{allow}	Alçalma aşamasında izin verilen anlık tavan irtifa değeri
Z_{max}	Maksimum izin verilen irtifa
$\|\cdot\|_2$	Öklidyen norm

KISALTMA LİSTESİ

ABC	Artificial Bee Colony
ACO	Ant Colony Optimization
DPSO	Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu
GA	Genetik Algoritma
GWO	Grey Wolf Optimizer
İHA	İnsanız Hava Aracı
NP	Nondeterministic Polynomial time
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
RRT	Rapidly-exploring Random Tree
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
HIL	Hardware in the Loop

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Arazi Topoğrafya Oluşumu 11
Şekil 2.2 Arazi Topoğrafya ve Radar Oluşumu 13
Şekil 3.1 Rota Boyunca İrtifa Yönetimi ve Alçalma Bölgesi Şeması 26
Şekil 3.2 Açısal Kısıt Alan Gösterimi 28
Şekil 3.3 Manuel Kaçış Mekanizması ve Rekürsif Hedef Atama 31
Şekil 3.4 Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu Mimarisi 33
Şekil 4.1 Engelsiz Uçuş Senaryosu X-Y Ekseni Hareket Görünümü 38
Şekil 4.2 Engelsiz Uçuş Senaryosu 3 Boyutlu Rota ve İrtifa Profili 39
Şekil 4.3 İrtifa Engelli Senaryo 3 Boyutlu Rota Görünümü 40
Şekil 4.4 Rota Boyunca İrtifa Değişimi ve Engel Aşma Profili 41
Şekil 4.5 Rota Boyunca İrtifa Değişimi ve Alçalma İrtifa Yönetimi Profili . 42
Şekil 4.6 Paralel Dağ Sırtları Arasında Çoklu Rota Keşfi (X-Y Düzlemi) . . 43
Şekil 4.7 Paralel Dağ Sırtları Arasında Çoklu Rota Keşfi 43
Şekil 4.8 Karmaşık Doğal Topoğrafyada DPSO Rota Planlaması (X-Y Düzlemi) 45
Şekil 4.9 Doğal Topoğrafya Üzerinde Rota Planlaması (3D Görünüm - Açı 1) 46
Şekil 4.10 Doğal Topoğrafya Üzerinde Rota Planlaması (3D Görünüm - Açı 2) 47
Şekil 4.11 Doğal Topoğrafya Üzerinde Rota Planlaması - İrtifa Yönetimi . . 47
Şekil 4.12 Karmaşık Tehdit Ortamında Rota Planlaması (X-Y Düzlemi) . . . 49
Şekil 4.13 Radar ve Doğal Engeller Arasında Rekürsif Kurtarma Manevrası (Açı 1) 49
Şekil 4.14 Radar ve Doğal Engeller Arasında Rekürsif Kurtarma Manevrası (Açı 2) 50
Şekil 4.15 Yerel Minimum Senaryosu Topoğrafik Yapısı 51
Şekil 4.16 Kapalı Vadi ve Karmaşık Engel Seti Senaryosu 52
Şekil 4.17 PSO-DPSO Rota Hesaplama Süresi (Engelsiz) 53
Şekil 4.18 PSO-DPSO Rota Hesaplama Süresi (Yerel Minimum) 53

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 Simülasyon ve PSO Algoritma Parametreleri 37
Tablo 4.2 PSO ve DPSO Algoritmalarının Başarı Oranı ve Ortalama Hesaplama Süresi Karşılaştırması 52

ÖZET

Otonom Hava Araçları için Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Güvenli ve Verimli Rota Planlaması

Alpaslan TETİK

Aviyonik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Yavuz EREN

İnsansız hava araçlarının (İHA) karmaşık görev sahalarında güvenli ve etkin bir şekilde seyrüsefer icra edebilmesi, rota planlama sürecinde navigasyon güvenliği, operasyonel kısıtlar ve uçuş verimliliği arasında hassas bir dengenin kurulmasını gerektirir. Bu tez çalışmasında, statik arazi engelleri ve aktif radar tehditleri ile çevrili üç boyutlu bir görev sahasında, İHA'nın çarpışmasız ve optimal bir yörünge izlemesini sağlayacak Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu (DPSO) tabanlı yeni bir rota planlama yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşım, hesaplama yükünü optimize etmek ve çözüm uzayındaki çeşitliliği maksimize etmek amacıyla, birbirleriyle iletişim kurmadan paralel çalışan bağımsız alt sürü mimarisine dayanmaktadır. Klasik optimizasyon yöntemlerinde sıkça karşılaşılan yerel minimuma erken yakınsama ve engellere takılma problemlerini aşmak adına çalışmada üç temel yenilikçi mekanizma entegre edilmiştir. İlk olarak, açısal sektör ayrıştırması stratejisi ile başlangıç aşamasında her bir alt sürü farklı geometrik koridorlara yönlendirilmiş; böylece arama uzayının sadece belirli bir bölgesi değil, alternatif vadi ve geçiş noktalarını içeren geniş bir alanı eş zamanlı olarak taranmıştır. İkinci olarak, karmaşık engel yapılarında (örneğin U-biçimli engeller veya radar vadileri) sürünün durağanlaşmasını tespit eden ve otonom olarak ara hedefler atayarak sürüyü sıkışıklık bölgesinden çıkaran özyinelemeli (rekürsif) bir manuel kaçış mekanizması geliştirilmiştir. Üçüncü olarak, rota planlama süreci ile uçuş profilini bütünleştiren dinamik irtifa yönetimi tasarlanmış; bu sayede İHA'nın seyir aşamasında arazi engellerini serbestçe

aşması, hedef bölgesine yaklaşıldığında ise kontrollü bir lineer alçalma profiline geçmesi sağlanmıştır. Çok amaçlı maliyet fonksiyonu; toplam rota uzunluğu, engel ihlali, radar görünürlüğü ve irtifa sınırlarını birleştiren ağırlıklı bir yapı ile modellenmiştir. Farklı zorluk seviyelerindeki senaryolar üzerinde gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları, önerilen dağıtık yöntemin tekli sürülere kıyasla daha güvenli, kısa ve uçuş mekaniğine uygun rotalar ürettiğini, aynı zamanda paralel işlem yeteneği sayesinde hesaplama süresi açısından gerçek zamanlı uygulamalara uygunluk gösterdiğini kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: PSO, DPSO, İHA, Hava Aracı,Yinelemeli.

ABSTRACT

Safe and Efficient Route Planning for Autonomous Aerial Vehicles using Distributed Particle Swarm Optimization

Alpaslan TETİK

Department of Avionics Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yavuz Eren

The ability of unmanned aerial vehicle (UAVs) to perform navigation safely and effectively in complex mission areas requires establishing a delicate balance between navigation safety, operational constraints, and flight efficiency during the path planning process. In this thesis study, a novel path planning method based on Distributed Particle Swarm Optimization (DPSO) has been developed to ensure that the UAV follows a collision-free and optimal trajectory within a three-dimensional mission area surrounded by static terrain obstacles and active radar threats. The proposed approach relies on an independent sub-swarm architecture running in parallel without communicating with each other, in order to optimize the computational load and maximize diversity in the solution space. Three fundamental innovative mechanisms have been integrated into the study to overcome the problems of premature convergence to local minima and getting stuck in obstacles, which are frequently encountered in classical optimization methods. First, with the angular sector decomposition strategy, each sub-swarm is directed towards different geometric corridors during the initialization phase; thus, a wide area containing alternative valleys and transition points is scanned simultaneously, rather than just a specific region of the search space. Second, a recursive manual escape mechanism has been developed that detects the stagnation of the swarm in complex obstacle structures (e.g., U-shaped obstacles or radar valleys) and autonomously assigns intermediate targets to extract the swarm from the congestion zone. Third, a dynamic altitude management system integrating the path planning

process with the flight profile has been designed; this ensures that the UAV freely overcomes terrain obstacles during the cruise phase and transitions to a controlled linear descent profile when approaching the target area. The multi-objective cost function is modeled with a weighted structure combining total route length, obstacle violation, radar visibility, and altitude limits. Simulation studies conducted on scenarios with different difficulty levels prove that the proposed distributed method generates safer, shorter, and flight-mechanics-compatible routes compared to single swarms, and also demonstrates suitability for real-time applications in terms of computation time thanks to its parallel processing capability.

Keywords: PSO, DPSO, UAV, Aircraft, Recursive.

1
GİRİŞ

1.1 Problem Tanımı

İnsanız hava araçları (İHA), sahip oldukları esneklik, düşük operasyonel maliyet, tehlikeli bölgelerde insan riski olmadan görev yapabilme kabiliyeti ve geniş uygulama alanı sayesinde son yıllarda hem akademide hem de endüstride yoğun ilgi görmektedir. Keşif, gözetleme, kargo taşımacılığı, afet bölgesi analizi, çevresel izleme, haberleşme kapsaması sağlama ve acil durum müdahaleleri gibi pek çok görevde kullanılan bu araçlar, özellikle karmaşık ve erişimi zor bölgelerde önemli avantajlar sunmaktadır [1]. İHA'ların operasyonel başarısı, her ne kadar sensör teknolojilerindeki gelişmeler, kontrol algoritmalarındaki iyileşmeler ve yüksek manevra kabiliyetleriyle artmış olsa da, güvenli ve doğru rota planlama ihtiyacı hâlâ bu sistemlerin en belirleyici bileşenidir [2]. Çünkü üç boyutlu bir görev sahası çoğu zaman; binalar, ağaçlar, dağlık arazi yapıları, radar kapsama bölgeleri, yasaklı alanlar, elektromanyetik tehdit unsurları, sensör kör noktaları ve değişken meteorolojik etkiler gibi karmaşık ve riskli unsurlar barındırmaktadır [3]. Bu tür ortamlar hem yoğun engel içerdiğinden hem de çevresel belirsizlikler dolayısıyla navigasyon ve rota planlama sürecini son derece zorlaştırır; küçük bir yönlendirme hatası bile çarpışmaya, görevin başarısız olmasına veya kritik veri kaybına yol açabilmektedir [4].

Bu nedenle İHA'larda rota planlama, yalnızca başlangıç ve hedef noktası arasında bir yol üretmekten ibaret değildir; engellerden kaçınma, güvenlik mesafelerinin korunması, enerji tüketiminin azaltılması, uçuş süresinin optimize edilmesi, İHA'nın maksimum hız, ivme, tırmanma/dalış oranı ve dönüş yarıçapı gibi fiziksel kısıtlarının gözetilmesi, rüzgâr ve türbülans gibi çevresel etkilerin dikkate alınması ve sensör belirsizliklerine karşı dayanıklılığın sağlanması gibi çok boyutlu gereksinimleri içerir [5]. Dolayısıyla İHA rota planlama problemi, birden çok hedefi ve birden fazla operasyonel kısıtı aynı anda değerlendirmesi nedeniyle doğası gereği NP-hard bir optimizasyon problemi olarak tanımlanmaktadır [6]. Bu yüksek karmaşıklık, İHA'nın güvenli ve verimli uçuşunu etkileyen unsurların

hem sürekli uzayda tanımlanması hem de gerçek zamanlı biçimde hesaplanması zorunluluğundan kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, geniş ve çok modlu çözüm uzayında, tüm operasyonel ve çevresel kısıtları sağlayarak global optimum veya ona en yakın, çarpışmasız ve maliyet etkin bir yörüngenin makul bir hesaplama süresi içerisinde elde edilmesi temel bir problemdir.

1.2 Literatür Özeti

Literatürde bu problemi çözmek için farklı yöntemler önerilmiş olup bunlar genelde dört ana sınıfta değerlendirilmektedir: grafik tabanlı arama algoritmaları (A*, D*, Dijkstra), potansiyel alan yöntemleri, örnekleme tabanlı algoritmalar (RRT, RRT*) ve sezgisel/biyo-esinli optimizasyon yöntemleri [7, 8]. Grafik tabanlı yöntemler deterministik yapıları sayesinde doğruluk açısından güçlü olsa da üç boyutlu (3B) sürekli ortamda arama uzayının büyüklüğü nedeniyle hesaplama maliyetleri hızla artmaktadır [6, 7]. Potansiyel alan yöntemleri hesaplama açısından hafif olmalarına rağmen yerel minimumlara sıkışma, hedefe ulaşamama ve engeller arasında osilasyon problemleri nedeniyle çoğu senaryoda güvenilir sonuçlar üretememektedir [9]. Örnekleme tabanlı yöntemler geniş alanları hızlı keşfetme konusunda avantajlıdır ancak ürettikleri yollar genellikle pürüzlüdür ve ek optimizasyon gerektirir. Bu yöntemlerin gerçek zamanlı performansları da karmaşık çevreler söz konusu olduğunda sınırlıdır [10].

Karmaşık, yüksek boyutlu ve doğrusal olmayan problemlerin çözümü, klasik deterministik optimizasyon teknikleri açısından çoğu zaman hesaplama yükü ve yakınsama garantisi bakımından önemli kısıtlar barındırmaktadır. Özellikle rota planlama gibi çok tepeli maliyet fonksiyonlarına, dinamik çevresel koşullara ve çoklu kısıtlara sahip problem yapılarında, deterministik yöntemlerin küresel optimuma ulaşması çoğu zaman pratik değildir [11, 12]. Bu nedenle, doğadan ilham alan sezgisel ve meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri, geniş arama uzaylarında küresel çözüm arayabilme yetenekleri sayesinde literatürde yaygın şekilde tercih edilmektedir [13, 14] ve kullanımı önemli ölçüde artmıştır[15].

Sezgisel yöntemlerin temel avantajı, keşif (exploration) ve sömürü (exploitation) süreçlerini dengeli bir biçimde yürütebilmeleridir. Bu yöntemler, çözüm uzayının geniş bölgelerini tarayarak yerel minimumlara erken kapılma riskini azaltmakta ve umut vadeden bölgelerde daha yoğun arama gerçekleştirerek yüksek kaliteli çözümler üretmektedir [16]. Bu özellik, rota planlama gibi çözüm uzayının oldukça karmaşık olduğu mühendislik problemlerinde sezgisel yöntemleri daha çekici hale getirmektedir.

Rota planlama alanında PSO ve diğer meta-sezgisel yöntemlerin başarısı literatürde geniş şekilde rapor edilmiştir. Genetik algoritmalar (GA), Ant Colony Optimization (ACO), Artificial Bee Colony (ABC), Grey Wolf Optimizer (GWO), Cuckoo Search ve özellikle Particle Swarm Optimization (PSO), geniş arama uzaylarını etkin şekilde tarama kabiliyetleri, hızlı yakınsama eğilimleri ve sürekli değişkenli optimizasyon problemlerine uygunlukları nedeniyle oldukça yaygın biçimde tercih edilmektedir [17, 18]. Sonuç olarak, sezgisel yöntemlerin esnek, küresel arama odaklı ve hesaplama açısından verimli karakteri; PSO gibi popülasyon-tabanlı algoritmaların güçlü keşif–sömürü dengesiyle birleştiğinde, rota planlama problemlerinde yüksek kaliteli, uygulanabilir ve güvenilir çözümler üretilmesini mümkün kılmaktadır.

PSO'nun bu denli yaygın tercih edilmesinin altında yatan spesifik teknik nedenler ise; parametrik olarak hafif olmaları, uygulanmalarının kolay olması, çok amaçlı optimizasyona doğal olarak uyum sağlamaları, çoklu hedef takibi yapabilmeleri ve kısıtlı alanlarda rota üretmeleri ve gerçek zamanlı sistemlerde verimli sonuçlar üretmeleridir [18–20]. Bu özellikleriyle PSO; engelden kaçınma, enerji optimizasyonu, şehir içi uçuş güvenliği, radar tehdit modellemesi, çoklu İHA koordinasyonu ve kapsama problemleri gibi çok çeşitli senaryolarda başarıyla kullanılmıştır [18, 20, 21]. Özellikle insansız hava aracı (İHA) rota planlama çalışmalarında PSO'nun hesaplama verimliliği ve yakınsama hızı sayesinde yüksek performans gösterdiği yapılan araştırmalarda ortaya konmuştur [19, 22].

PSO, sürü davranışlarının kolektif bilgi paylaşımı mekanizmasından yararlanarak güçlü bir dengeleme stratejisi sunmaktadır [17, 23]. PSO'da her çözüm adayı bir parçacıkla temsil edilir ve parçacıklar hem kendi en iyi deneyimlerini hem de sürünün küresel en iyi konumunu dikkate alarak güncellenir. Bu çift bileşenli yapı (bilişsel ve sosyal bileşen), PSO'nun hem yerel hem küresel arama süreçlerini etkin bir şekilde yönetmesine olanak tanır [24]. Ayrıca PSO'nun türev gerektirmeyen doğası, süreksiz, gürültülü ya da analitik olarak tanımlanması güç maliyet fonksiyonlarının bulunduğu problemlerde önemli bir avantaj sağlar.

Bununla birlikte, klasik PSO'nun da önemli sınırlamaları literatürde geniş şekilde tartışılmıştır ve PSO'nun keşif–sömürü dengesini iyileştirmeye yönelik çok sayıda geliştirme önerilmiştir. PSO'nun yüksek engel yoğunluklu problemlerde yerel minimumlara erken yakınsama eğilimi göstermesi [25], sürü çeşitliliğini hızla kaybetmesi [26], keşif–sömürü dengesini koruyamaması ve yüksek boyutlu arama uzaylarında kararsız davranması [27] yaygın olarak rapor edilmiştir. Bu sorunların aşılabilmesi için literatürde çok sayıda geliştirilmiş PSO varyantı önerilmiştir: holonik PSO [28], çoklu-sürü (multiswarm) PSO [19], kaotik PSO [26], küresel

vektör tabanlı PSO [18], hibrit PSO–RRT tabanlı yöntemler [29] önerilen yöntemlerden bazılarıdır.

Önerilen adaptif PSO yaklaşımlarında sürünün evrimsel durumu izlenerek atalet katsayısı, öğrenme katsayıları veya hız sınırları dinamik biçimde güncellenmekte; böylece algoritmanın hem arama esnekliği hem de yakınsama kararlılığı artırılmaktadır [25]. Literatürde bu tür adaptif mekanizmaların özellikle İHA çarpışma-önleme senaryolarında yakınsama hızını yükselttiği ve hesaplama verimliliğini belirgin biçimde iyileştirdiği gösterilmektedir [18]. Buna ek olarak, çok-ajanlı holonik PSO yapılarının sürü içi bilgi paylaşımını güçlendirdiği ve çeşitlilik yönetimini desteklediği de çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur [28].

Bu çalışmaların yanında, yerel minimumdan kaçış mekanizmaları da PSO'nun geliştirilmiş sürümlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Genetik algoritmalardan esinlenen mutasyon tabanlı yöntemler, belirli parçacıklara rastlantısal pertürbasyonlar ekleyerek sürü çeşitliliğini artırmakta ve global optimuma ulaşma olasılığını yükseltmektedir [11]. Bu tür yaklaşımlar özellikle yüksek boyutlu rota planlama çalışmalarında etkili olurken, çeşitliliği korumaya yönelik bir diğer önemli yöntem ise holonik ve çoklu alt-sürü tabanlı mimarilerdir. Bu yapılar, parçacıkları alt gruplara ayırarak hem yerel hem de küresel bilginin çok katmanlı bir iletişim ağı üzerinden paylaşılmasını sağlamakta ve çözüm uzayının farklı bölgelerinin eşzamanlı olarak keşfedilmesine imkân tanımaktadır [14, 28]. Bu iki strateji birlikte ele alındığında, PSO'nun hem çeşitlilik yönetimi hem de keşif kapasitesi açısından önemli ölçüde güçlendirilebildiği görülmektedir.

Literatürde PSO tabanlı yöntemler yoğun biçimde kullanılmasına rağmen mevcut çalışmalar belirgin yapısal sınırlılıklar taşımaktadır. İlk olarak, birçok araştırma tek bir sürü yapısına ya da bilgi paylaşımı yapan multiswarm mimarilerine dayanmaktadır [17, 19]. Bu yapıların büyük bölümü sürüler arası iletişim gerektiren yapılardır [19, 30, 31] ve gerçek zamanlı İHA uygulamaları için kritik olan iletişimsiz, tamamen bağımsız, doğal olarak paralelleştirilebilir sürü mimarileri ise yeterince araştırılmamıştır. Bu nedenle hem hesaplama hızını hem de çözüm kalitesini aynı çatı altında artırabilen ölçeklenebilir PSO tasarımları literatürde hâlâ eksiktir.

İkinci önemli boşluk, PSO'nun durağanlaşmasını algılayan ve bu durumu konuma bağlı olmaksızın yöneten mekanizmaların sınırlılığıdır. Literatürde erken yakınsama bilinen bir problem olsa da çözüm olarak çoğu çalışma yalnızca parametreleri zamanla değiştirmektedir [25, 32]. Sürünün uzayın herhangi bir bölgesinde uzun süre hareket üretmemesi durumunda devreye giren, duruma

bağlı rastgele kaçış mekanizmaları İHA rota planlama bağlamında yeterince geliştirilmemiştir. Bu nedenle PSO'nun yerel minimumlardan çıkma kabiliyeti büyük ölçüde algoritmanın genel dinamiklerine bırakılmaktadır.

Bir diğer eksiklik, rota planlama ile terminal irtifa kontrolünün bütünleşik ele alınmamasıdır. Çoğu çalışma 2B sabit irtifa veya kaba 3B uçuş modelleri kullanmakta, hedef bölgeye yaklaşırken irtifa değişiminin nasıl yönetileceğini optimizasyonun dışında bırakmaktadır [7, 19, 33]. İrtifa kontrollü ve alçalma modunu içeren hedef bölge irtifasına güvenle ulaşılmasını sağlayacak PSO tabanlı yapılar literatürde oldukça sınırlıdır.

Son olarak, birçok çalışma algoritmalarını sınırlı sayıda senaryoda, genellikle tek tip tehdit veya tek tip engel modeli altında değerlendirmektedir [34, 35]. Engelli ortam, radar tehdidi ve terminal irtifa kısıtlarını birlikte içeren çok katmanlı senaryo setleri nadir görülmektedir. Bu eksiklik, önerilen yöntemlerin gerçek operasyon koşullarındaki bütüncül performansını değerlendirmeyi zorlaştırmaktadır.

Bu genel çerçeve ışığında, literatür İHA'lar için rota planlamasını; engeller, yasaklı bölgeler, radar tehditleri, enerji kısıtları, dinamik çevre koşulları ve uçuş mekaniklerinin bir arada değerlendirildiği, çok amaçlı ve çok kısıtlı bir optimizasyon problemi olarak ele almaktadır. Rota planlama sırasında hedeflenen; çarpışma riskinin sıfırlanması, uçuş mesafesi ve enerji tüketiminin minimize edilmesi, uçuşun aerodinamik ve fiziksel sınırlara uygun gerçekleşmesi, sürekli uzayda geçerli ve pürüzsüz yolların elde edilmesi, hesaplama süresinin gerçek zamanlı gereksinimleri karşılaması, aynı zamanda değişken çevresel koşulların etkisine dayanıklı bir rota oluşturulmasıdır. Tüm bu unsurlar göz önünde bulundurulduğunda, İHA rota planlama sorunu hâlâ literatürde çözüm arayışlarının sürdüğü, yüksek karmaşıklık düzeyine sahip temel araştırma konularından biri olmaya devam etmektedir.

1.3 Çalışmanın Amacı ve Katkıları

Bu çalışma, PSO tabanlı İHA rota planlama literatüründe yaygın olarak karşılaşılan çeşitlilik kaybı, erken yakınsama, yerel minimumdan çıkamama ve terminal irtifa yaklaşmasının optimizasyondan kopuk ele alınması gibi temel sorunlara yönelik bütünleşik bir çözüm ortaya koymaktadır. Literatürdeki tek sürü veya bilgi paylaşımına dayalı multiswarm yaklaşımlarının aksine [17, 19], bu çalışmada sürüler başlangıçta görev geometrisine göre farklı açısal yönlere dağıtılmış ve kısıtlı alanlara sahip olacak şekilde tamamen bağımsız olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yapı, arama uzayının farklı bölgelerinin garanti edilerek taranmasını sağlamakta,

sürü çeşitliliğini doğal şekilde korumakta ve klasik PSO'nun bilinen erken yakınsama eğilimini önemli ölçüde azaltmaktadır [25, 26].

Çalışmanın bir diğer temel katkısı, literatürdeki zamana bağlı adaptif parametre değişimleriyle sınırlandırılmış erken yakınsama çözümlerinden farklı olarak [36], konumdan bağımsız bir durağanlık tespiti mekanizmasının tasarlanmasıdır. Global en iyi değerin belirli bir süre boyunca değişmemesi durumunda algoritma, sürünün hedefe yakın ya da uzak olmasına bakılmaksızın rastgele keşif moduna geçmekte ve böylece yerel minimumlardan çıkış kapasitesi artırılmaktadır. Bu duruma bağlı (state-dependent) strateji, karmaşık arama uzaylarında çeşitliliğin korunması ilkesiyle [37] örtüşerek, algoritmanın kararlılığını artıran özgün bir katkı sunmaktadır.

Literatürdeki diğer bir eksiklik, rota planlama ile terminal irtifa kontrolünün çoğunlukla birbirinden bağımsız süreçler olarak ele alınmasıdır [7, 38]. Bu çalışma ise hedef bölgeye belirli bir mesafe yaklaşıldığında serbest irtifa hareketini sınırlandırarak kontrollü bir alçalma moduna geçmekte; böylece rota planlama süreci ile hava aracının hedef irtifaya güvenli yaklaşması aynı algoritmik çerçevede bütünleşik şekilde çözülmektedir. Bu faz geçişli yapı, özellikle karmaşık arazi ve tehdit içeren ortamlarda rotaların hem uygulanabilirliğini hem de uçuş güvenliğini artırmaktadır.

Buna ek olarak önerilen tamamen bağımsız sürü yapısı, literatürdeki iletişim gerektiren paralel PSO uygulamalarından farklı olarak [19, 28, 39] sürüler arası koordinasyon ihtiyacını ortadan kaldırmakta ve gerçek zamanlı İHA görevleri için kritik öneme sahip yüksek ölçeklenebilirlik sunmaktadır. Sürülerin birbirinden tamamen bağımsız çalışması, yöntemi doğal biçimde paralelleştirilebilir hâle getirmekte ve paralel işlem teknikleriyle eşzamanlı olarak çalıştırılmasına imkân vererek gerçek zamanlı rota planlama uygulamaları için kritik öneme sahip hesaplama hızında belirgin artış sağlamaktadır.

Son olarak çalışma, literatürde sıkça görülen tek tip senaryo değerlendirmesi eğilimini aşarak [18], engelsiz ortamdan yüksek engel yoğunluklu bölgelere ve radar/irtifa kısıtlı karmaşık tehdit ortamlarına kadar uzanan çok katmanlı senaryolarda bütüncül bir performans analizi sunmaktadır. Bu yaklaşım, önerilen yöntemin farklı operasyon koşullarında genel geçer ve güvenilir bir çözüm üretebildiğini ortaya koymaktadır.

1.4 Hipotez

Bu tez çalışması, karmaşık ve çok kısıtlı ortamlarda İHA rota planlama probleminin çözümü için geliştirilen önerilerin, mevcut literatürdeki temel darboğazları aşabileceği öngörüsü üzerine inşa edilmiştir. Bu doğrultuda çalışma, başlangıç aşamasında farklı açılarla yönlendirilmiş ve birbirinden izole edilmiş bağımsız alt sürülerin, arama uzayını eş zamanlı ve sistematik bir şekilde tarayarak yerel minimum tuzaklarından kaçınma kabiliyetini doğal bir çeşitlilikle artıracağını savunmaktadır.

Buna paralel olarak, klasik PSO algoritmalarında görülen erken yakınsama sorununun çözümünde; yalnızca iterasyon sayısına bağlı parametre değişimleri yerine, sürünün gelişim durumuna odaklanan bir yaklaşımın daha etkili olduğu düşünülmektedir. Parçacığın uzaydaki konumundan bağımsız olarak, maliyet fonksiyonundaki iyileşmenin durduğu anı tespit eden ve buna dinamik bir kaçış mekanizması ile yanıt veren yaklaşımın, algoritmanın çözüm kararlılığını anlamlı düzeyde artıracağı öngörülmektedir. Rota planlama sürecinin sadece 2B düzlemle sınırlı kalmayıp bütünleşik irtifa kontrolünü de içerecek şekilde modellenmesinin, üretilen rotaların gerçekçi uçuş dinamiklerine ve güvenli iniş profillerine olan uygunluğunu optimize edeceği öngörülürken; son olarak iletişimsiz sürü mimarisinin veri senkronizasyonu yükünü ortadan kaldırarak modern çok çekirdekli işlemcilerde yüksek verimlilikle paralelleştirilebileceği ve gerçek zamanlı uygulama gereksinimlerini karşılayacağı değerlendirilmektedir. Bu öngörülerin geçerliliği, farklı zorluk derecelerine sahip senaryolar altında gerçekleştirilecek benzetim çalışmaları ile sınanacaktır.

1.5 Metodoloji

Bu tez çalışmasında, tanımlanan İHA rota planlama probleminin çözümü için aşamalı bir metodoloji izlenmiştir. Çalışma, problemin matematiksel olarak modellenmesinden, önerilen algoritmanın geliştirilmesine ve farklı senaryolarda test edilmesine kadar uzanan sistematik bir akışa sahiptir. Tezin geri kalan bölümlerinin organizasyonu ve izlenen yöntem şu şekildedir: İlk aşamada, İHA'nın görev yapacağı 3B ortam, engel modelleri ve maliyet fonksiyonlarını içeren matematiksel altyapı oluşturulmuştur. Bu modelleme süreci ve problem uzayının detayları Bölüm 2 ile sunulmuştur.

İkinci aşamada, PSO algoritmasının teorik altyapısı incelenmiş, ardından bu çalışmada önerilen bağımsız çoklu sürü yapısı, duruma bağlı kaçış mekanizmaları ve irtifa kontrol modülleri detaylandırılmıştır. Geliştirilen algoritmanın

(DPSO) çalışma prensipleri ve sözde kodları (pseudo-code) Bölüm 3 içerisinde verilmiştir. Üçüncü aşamada, önerilen yöntemin performansını doğrulamak amacıyla MATLAB® ortamında kapsamlı bir benzetim ortamı hazırlanmıştır. Algoritma; engelsiz ortamdan yoğun engelli ortamlara kadar farklı senaryolar altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve grafiksel veriler Bölüm 4 kapsamında detaylıca irdelenmiştir.

Son aşamada ise, elde edilen bulgular değerlendirilmiş, önerilen yöntemin avantajları ve sınırlılıkları tartışılmış ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur. Bu genel değerlendirme Bölüm 5 içerisinde yer almaktadır.

2
SİSTEM TANIMI

Bu bölümde, insansız hava aracının üç boyutlu bir görev sahasında gerçekleştirdiği rota takibi sürecini temsil eden simülasyon ortamı, araç modeli, çevresel engeller ve dikey kısıtlar matematiksel bir çerçevede açıklanmaktadır. Sistem tasarımı tamamen statik bir ortam üzerinde çalışan ve konuma bağlı hareket denetimiyle ilerleyen bir İHA modeline dayanmaktadır.

2.1 Görev Sahası ve Ortam Modeli

Görev sahası üç boyutlu bir uzayda Denklem (2.1) ile tanımlanmıştır ve statik bir yapıdadır. Hesaplama yükünü dengelemek amacıyla sahadaki tüm konumsal noktalar işlem kısıtlarına uygun bir çözünürlükle örneklenmiş, böylece hem geniş ölçekli simülasyonların uygulanması hem de rota üretim sürecinde konum tabanlı maliyet hesaplarının güvenilir biçimde yapılması sağlanmıştır.

$$\Omega = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x \in [X_{\min}, X_{\max}],\ y \in [Y_{\min}, Y_{\max}],\ z \in [0, Z_{\max}]\} \quad (2.1)$$

Arazi topografyası, hacimsel engeller yerine yatay düzlemde tanımlı sürekli bir yüzey fonksiyonu olarak modellenmiştir. Böylece arazi yalnızca bir yükseklik değerini temsil eder ve üç boyutlu hacimsel bir çarpışma denetimi yerine, İHA konumunun arazi yüzeyine olan dikey uzaklığı üzerinden daha hesaplanabilir bir çarpışma analizi yapılmasına olanak tanır. Bu yaklaşım, geniş alanlarda yüksek çözünürlük gerektiren topoğrafik modellemelerin daha düşük hesaplama maliyeti ile kullanılmasını sağlar.

$$z = H(x, y). \quad (2.2)$$

Denklem (2.2), sahadaki her yatay koordinat için beklenen arazi yüksekliğini tanımlar ve rota planlama sürecinde çarpışma kontrolünün temel belirleyicisi olarak kullanılır.

2.2 Arazi Engelleri

Görev sahasında yer alan arazi engelleri, hacimsel katı bloklar yerine taban yüzeyine eklenen parametrik yükselti fonksiyonları üzerinden modellenmiştir. Bu yaklaşımda temel arazi yüksekliği $H_{\text{base}}(x, y)$ olup, lokal topoğrafik yükseltiler bu yüzeye süperpoze edilen ek yüzey bileşenleriyle temsil edilmektedir. Böylece toplam arazi yüksekliği Denklem (2.3) ile ifade edilir.

$$H(x, y) = H_{\text{base}}(x, y) + \sum_{i=1}^{N_h} h_i(x, y) \tag{2.3}$$

Burada $h_i(x, y)$ terimleri her bir dağ veya yükseltiyi temsil eden lokal yüzey bileşenleridir. Yükseltinin matematiksel formu, merkez koordinatı (x_i, y_i) etrafında tanımlı iki boyutlu bir Gauss tipi yüzey ile modellenir (2.4). Rastgele gürültü terimi $\varepsilon(x, y)$ ise topografyanın daha doğal görünmesi için küçük genlikli bir pertürbasyon sağlar.

$$h_i(x, y) = \exp\left(- \left(\frac{x - x_i}{w_{x,i}} \right)^2 - \left(\frac{y - y_i}{w_{y,i}} \right)^2 \right) H_i + \varepsilon(x, y) \tag{2.4}$$

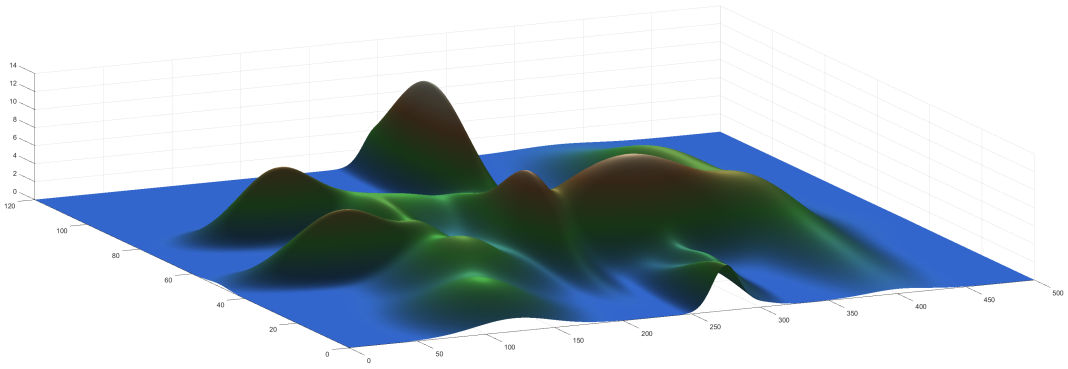
Bu modelleme ile görev sahasındaki arazi tek bir sürekli yüzey fonksiyonu altında birleşir. İHA'nın araziye olan dikey uzaklığını belirleyen bu yüzey, Denklem (2.5) ile tanımlanır.

$$z = H(x, y) \tag{2.5}$$

İnsansız hava aracının arazi ile çarpışmaması için konumunun anlık arazi yüksekliğinden ve minimum güvenlik mesafesinden daha yukarıda bulunması gerekir. Bu şart Denklem (2.6) ile ifade edilir.

$$z(t) > H(x(t), y(t)) + d_{\text{safety}} \tag{2.6}$$

Denklem 2.6'de verilen güvenlik koşulu, rota planlama ve kontrol tasarımının temel kısıtlarından biridir. Bu yöntem, yüzey tabanlı topoğrafya modellemesi sayesinde geniş görev sahalarında yüksek çözünürlüklü arazi yapılarının düşük hesaplama maliyetiyle temsil edilmesine olanak tanır ve İHA–arazi etkileşimlerinin istikrarlı ve güvenilir biçimde simüle edilmesini sağlar.



Şekil 2.1 Arazi Topoğrafya Oluşumu

Şekil (2.1), belirtilen yöntemle oluşturulan örnek arazi yükseltisi gösterilmekte olup, simülasyon ortamında kullanılan topoğrafik engellerin uzamsal dağılımı görsel olarak sunulmaktadır.

2.3 Radar Modeli

Bu çalışmada radar sistemi, İHA'nın görev sahasında karşılaşabileceği algılama tehdidini temsil eden izotropik bir algılama hacmi olarak modellenmiştir. Radarın konumu üç boyutlu uzayda Denklem (2.7) ifade edilmiştir.

$$\mathbf{r}_0 = \begin{bmatrix} x_r & y_r & z_r \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2.7}$$

Radar menzili R, bu nokta etrafında tanımlanan küresel algılama bölgesinin yarıçapını oluşturmaktadır. İHA veya parçacık konumu Denklem (2.8) ile gösterildiğinde, radar–hedef arasındaki Öklidyen mesafe Denklem (2.9) ile elde edilmektedir:

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2.8}$$

$$d(\mathbf{p}) = \|\mathbf{p} - \mathbf{r}_0\|_2 = \sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 + (z - z_r)^2} \tag{2.9}$$

2.3.1 Küresel Radar Kapsama Alanı

Radar kapsama bölgesi, merkez noktası $\mathbf{r}_0$ ve yarıçapı R olan bir küre ile tanımlanmakta olup, Denklem (2.10) ile ifade edilmektedir. Klasik ikili radar tespit göstergesi Denklem (2.11) ile verilmiştir. Ancak bu çalışma, keskin eşik yerine daha gerçekçi bir geçiş sağlayan olasılıksal bir radar modelini tercih etmektedir.

$$\mathcal{D}_{\text{radar}} = \left\{ \mathbf{p} \in \mathbb{R}^3 \ : \ d(\mathbf{p}) \leq R \right\}. \tag{2.10}$$

$$I(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1, & d(\mathbf{p}) \leq R, \\ 0, & d(\mathbf{p}) > R. \end{cases} \tag{2.11}$$

Radarın İHA'yı algılama olasılığı, mesafeye bağlı olarak değişen bir logaritmik fonksiyon ile modellenmiştir. Radar menziline yaklaşıldığında olasılık artmakta, menzilin dışına çıkıldığında ise hızla azalmaktadır.

Tespit olasılığı Denklem (2.12) ile tanımlanmaktadır.

$$P_{\text{det}}(d) = \begin{cases} \dfrac{1}{1 + \exp\left(\alpha(d - R)\right)}, & d < R, \\ 0, & d \geq R. \end{cases} \tag{2.12}$$

Burada $\alpha > 0$ lojistik eğrinin geçiş keskinliğini belirlemektedir. Bu modelin belirgin bir özelliği, radar menzili sınırında ($d = R$) tespit olasılığının her zaman Denklem (2.13) ile gösterildiği gibi olmasıdır.

$$P_{\text{det}}(R) = \frac{1}{2} \tag{2.13}$$

2.3.2 Sayısal Stabilite İçin Ölçekleme

Aşırı uç değerlerde ($P_{\text{det}} \to 0$ veya $P_{\text{det}} \to 1$) algoritmanın sayısal kararlılığını korumak amacıyla tespit olasılığı küçük bir alt–üst sınır aralığına sıkıştırılmaktadır. Kullanılan stabilize edilmiş olasılık değeri Denklem 2.14 ile verilmiştir:

$$\tilde{P}_{\text{det}}(d) = \min\left(\max\left(P_{\text{det}}(d), \varepsilon_v\right), 1 - \varepsilon_v\right), \tag{2.14}$$

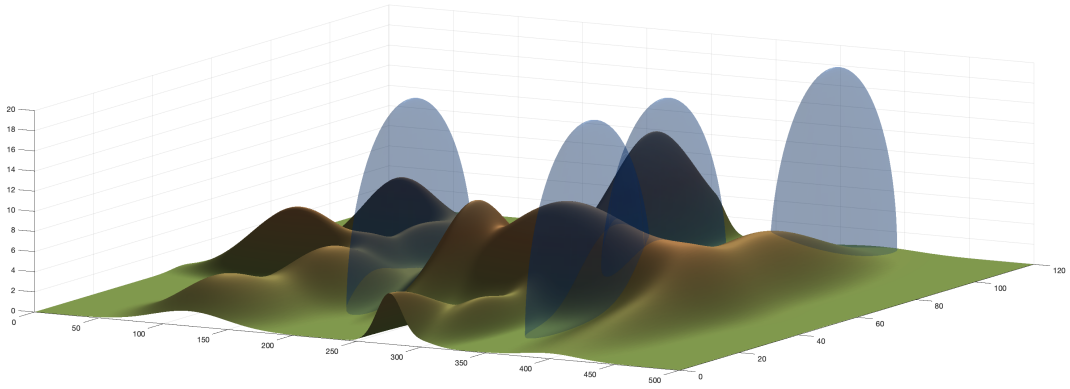
burada $\varepsilon_v = 10^{-6}$ olarak seçilmiştir. Bu yaklaşım özellikle PSO tabanlı rota planlama sırasında kullanılan maliyet fonksiyonunun çökmesini önlemekte, algoritmanın daha kararlı davranmasını sağlamaktadır.

2.3.3 Radar Geometrisinin Görselleştirilmesi

Radar kapsama alanı simülasyon ortamında yarı saydam bir küre ile temsil edilmiştir. MATLAB® ortamında birim küre verileri `sphere()` fonksiyonu ile üretilmiş ve radarın konumu ile menzili dikkate alınarak Denklem (2.15) ile gösterildiği gibi ölçeklenmiştir.

$$\begin{aligned} X_s &= R \cdot X_{\text{unit}} + x_r, \\ Y_s &= R \cdot Y_{\text{unit}} + y_r, \\ Z_s &= R \cdot Z_{\text{unit}} + z_r. \end{aligned} \tag{2.15}$$

Bu küresel yapı ile oluşturulmuş radar alanları Şekil (2.2) ile gösterilmiştir. Radar kapsama hacminin gösteriminde yarı saydam mavi küreler radarın menzilini ifade etmektedir.



Şekil 2.2 Arazi Topoğrafya ve Radar Oluşumu

2.4 Hava Aracı Modeli

Çalışma kapsamında tasarlanan İnsansız Hava Aracı (İHA), hesaplama maliyetini minimize etmek ve optimizasyon süreçlerine odaklanmak amacıyla üç boyutlu (3D) kartezyen koordinat sisteminde hareket eden *noktasal bir kütle* (point-mass model) olarak modellenmiştir. Bu yaklaşımda İHA, uzayda anlık olarak $P(x, y, z)$ koordinatları ve ψ yönelim açısı (yaw) ile temsil edilmektedir.

Hava aracının hareket dinamikleri, referans rotayı takip edecek şekilde belirli kinematik kısıtlar altında kurgulanmıştır. Aracın bir sonraki zaman adımındaki $(t + dt)$ konumu, mevcut hızı (v) ve yönelimine bağlı olarak Denklem (2.16), Denklem (2.17) ve Denklem (2.18) ile gösterildiği gibi güncellenmektedir.

$$x(t + dt) = x(t) + v \cdot \cos(\psi(t)) \cdot dt \tag{2.16}$$

$$y(t + dt) = y(t) + v \cdot \sin(\psi(t)) \cdot dt \tag{2.17}$$

$$z(t + dt) = z(t) + (z_{hedef} - z(t)) \cdot \eta \tag{2.18}$$

Burada η, dikey düzlemdeki hareketin pürüzsüzlüğünü sağlayan irtifa geçiş katsayısını ifade eder. Noktasal modelin gerçekçi manevralar yapabilmesi için yönelim açısı (ψ), hedeflenen koordinata doğru Denklem (2.19) ile gösterilen kısıt dahilinde güncellenir.

$$\Delta\psi = \text{sgn}(\psi_{hedef} - \psi) \cdot \min(|\psi_{hedef} - \psi|, \omega_{max}) \cdot dt \tag{2.19}$$

Denklem (2.19) ile gösterilen denklemde yer alan ω_{max}, aracın birim zamandaki

maksimum dönüş kapasitesini temsil ederek sistemin fiziksel sınırlarını modele dahil eder. Araç, algoritma tarafından sağlanan düğüm noktalarına (waypoints) belirli bir mesafe eşiğine kadar yaklaştığında bir sonraki hedefi dinamik olarak seçer. Bu mekanizma, noktasal modelin karmaşık rota verilerini pürüzsüz ve takip edilebilir bir yörüngeye dönüştürmesini sağlar.

3
DAĞITIK PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU

Bu bölümde, İnsansız Hava Araçları (İHA) için üç boyutlu ve engelli ortamlarda rota planlaması gerçekleştirmek üzere geliştirilen PSO tabanlı mimari ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Öncelikle PSO algoritmasının matematiksel temelleri sunulmuş; akabinde çalışmaya özgü tasarlanan maliyet fonksiyonu bileşenleri ile irtifa, radar ve engel kısıtları tanımlanmıştır. Algoritmanın performansını artırmak adına, parçacıkların hız kaybını (stagnation) önleyen 'rastgele itki mekanizması' ve yerel minimumlardan kaçınmayı sağlayan 'yinelemeli ara hedef yönlendirme' stratejisi detaylandırılmıştır. Bölümün sonunda, önerilen dağıtık-paralel PSO yapısı ve alt sürülerin birleştirilmesiyle nihai rotanın belirlenmesi süreci, kapsamlı sözde kodlar (pseudo-codes) eşliğinde sunulmuştur.

3.1 PSO Algoritması

Parçacık Sürü Optimizasyonu, kuş sürülerinin ve balık okullarının sosyal davranışlarından esinlenerek Kennedy ve Eberhart [17] tarafından geliştirilen popülasyon tabanlı bir meta-sezgisel algoritmadır. Yöntem, arama uzayındaki her bir parçacığın hızını ve konumunu, hem kendi geçmiş tecrübelerine (P_{best}) hem de sürünün o ana kadarki en iyi konumuna (G_{best}) göre güncellediği iteratif bir süreç işletir. Türev gerektirmeyen yapısı ve parametre ayarlarının sadeliği sayesinde, özellikle çok boyutlu ve karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde yüksek başarım göstermektedir.

3.1.1 PSO'nun Matematiksel Modeli

Üç boyutlu uzayda gerçekleştirilen optimizasyon sürecinde, popülasyon büyüklüğü N olan sürüdeki her bir parçacık ($i \in \{1, \ldots, N\}$), bir çözüm adayını temsil etmektedir. k. iterasyon adımı itibarıyla i. parçacığa ait konum ($\mathbf{x}_i^k$) ve hız ($\mathbf{v}_i^k$) vektörleri, Denklem (3.1) ile gösterildiği üzere üç boyutlu kartezyen koordinat sisteminde ifade edilir.

$$\mathbf{x}_i^k = \begin{bmatrix} x_i^k \\ y_i^k \\ z_i^k \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{v}_i^k = \begin{bmatrix} v_{x,i}^k \\ v_{y,i}^k \\ v_{z,i}^k \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

Optimizasyon sürecinde her parçacık, hem kendisnin en iyi konumu hem de sürünün o ana kadar ulaştığı en iyi konumu referans alarak hareket eder. Parçacığın bireysel en iyi konumu $\mathbf{p}_i^{\text{best}}$ ve sürünün küresel en iyi konumu $\mathbf{g}^{\text{best}}$ olarak ifade edilir ve Denklem (3.2) ile gösterilmektedir.

$$\mathbf{p}_i^{\text{best}} = \begin{bmatrix} p_{x,i}^{\text{best}} \\ p_{y,i}^{\text{best}} \\ p_{z,i}^{\text{best}} \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{g}^{\text{best}} = \begin{bmatrix} g_x^{\text{best}} \\ g_y^{\text{best}} \\ g_z^{\text{best}} \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

PSO algoritmasının temel dinamiğini oluşturan hız güncelleme mekanizması; Atalet, bireysel ve sosyal bileşen olmak üzere üç ana kısımdan oluşur. Bu mekanizma matematiksel olarak Denklem (3.3) ile formüle edilmiştir.

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = \underbrace{w\,\mathbf{v}_i^k}_{\text{Atalet}} + \underbrace{c_1 r_1^k \left(\mathbf{p}_i^{\text{best}} - \mathbf{x}_i^k\right)}_{\text{Bireysel Bileşen}} + \underbrace{c_2 r_2^k \left(\mathbf{g}^{\text{best}} - \mathbf{x}_i^k\right)}_{\text{Sosyal Bileşen}} \tag{3.3}$$

Burada w atalet katsayısını, c_1 bireysel öğrenme katsayısını ve c_2 sosyal öğrenme katsayısını temsil etmektedir. Stokastik yapıyı sağlayan r_1^k ve r_2^k parametreleri ise $[0, 1]$ aralığında düzgün dağılımla üretilen rastgele ve bağımsız değişkenlerdir.

İHA'nın üç boyutlu hareket uzayı göz önüne alındığında, Denklem (3.3) ile verilen vektörel ifade, eksen bileşenleri cinsinden Denklem (3.4)-(3.6) aralığında detaylandırılmıştır. Her eksen denklem birleşenleri birbirinden bağımsızdır.

$$v_{x,i}^{k+1} = w v_{x,i}^k + c_1 r_1^k \left(p_{x,i}^{\text{best}} - x_i^k\right) + c_2 r_2^k \left(g_x^{\text{best}} - x_i^k\right), \tag{3.4}$$

$$v_{y,i}^{k+1} = w v_{y,i}^k + c_1 r_1^k \left(p_{y,i}^{\text{best}} - y_i^k\right) + c_2 r_2^k \left(g_y^{\text{best}} - y_i^k\right), \tag{3.5}$$

$$v_{z,i}^{k+1} = w v_{z,i}^k + c_1 r_1^k \left(p_{z,i}^{\text{best}} - z_i^k\right) + c_2 r_2^k \left(g_z^{\text{best}} - z_i^k\right). \tag{3.6}$$

Hız vektörünün güncellenmesinden sonra, parçalıkların sonraki adımdaki konumları Denklem (3.7) ile gösterildiği gibi güncellenir. Daha açık ifade etmek gerekirse her bir parçacığın konumları eksen bazında güncellenmesi

Denklem (3.8)-(3.10) aralığında gösterilmiştir.

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \mathbf{x}_i^k + \mathbf{v}_i^{k+1} \tag{3.7}$$

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \mathbf{x}_i^k + \mathbf{v}_{x,i}^{k+1}, \tag{3.8}$$

$$\mathbf{y}_i^{k+1} = \mathbf{y}_i^k + \mathbf{v}_{y,i}^{k+1}, \tag{3.9}$$

$$\mathbf{z}_i^{k+1} = \mathbf{z}_i^k + \mathbf{v}_{z,i}^{k+1} \tag{3.10}$$

Önerilen çalışmada, sistem bütünlüğünü ve kararlılığı korumak ayrıca hava aracının fiziksel manevra sınırları dahilinde kalmak amacı ile hız birleşeni her eksen için ayrı ayrı limitlenmektedir. Limitleme ile birlikte hareket dinamikleri içerisinde ortam ile etkileşime doğru bir şekilde karar verilmektedir. Eksen hız limitleme işlemleri Denklem (3.11)-(3.13) aralığında gösterilmiştir.

$$|\mathbf{v}_{x,i}^{k+1}| \leq \mathbf{v}_{x,\max} \tag{3.11}$$

$$|\mathbf{v}_{y,i}^{k+1}| \leq \mathbf{v}_{y,\max} \tag{3.12}$$

$$|\mathbf{v}_{z,i}^{k+1}| \leq \mathbf{v}_{z,\max} \tag{3.13}$$

Matematiksel modeli verilen parçacık güncelleme sürecinin yazılımsal uygulaması Algoritma 1'de sunulmuştur. Bu algoritma; standart PSO hız güncelleme adımlarına ek olarak, hızın aşırı büyümesini engelleyen doyuma ulaştırma (clamping), hızın sönümlenmesini önleyen rastgele itki ve parçacıkların harita dışına çıkmasını engelleyen sınır kontrol mekanizmalarını içermektedir.

Algoritma 1: Parçacık Hız ve Konum Güncelleme Süreci

Girdi: $i.$ parçacığın mevcut konumu $\mathbf{x}_i$, hızı $\mathbf{v}_i$, P_{best} ve G_{best}

Çıktı: Güncellenmiş konum $\mathbf{x}_i$ ve hız $\mathbf{v}_i$

`// Rastgele katsayıların üretilmesi`

$r_1, r_2 \leftarrow$ Rastgele$(0, 1)$;

Döngü *her bir eksen* $d \in \{x, y, z\}$ *için* **yap**

`// 1. Hızın Hesaplanması`

$v_{d,i} \leftarrow w \cdot v_{d,i} + c_1 r_1 (p_{d,i}^{best} - x_{d,i}) + c_2 r_2 (g_d^{best} - x_{d,i})$;

`// 2. Hızın Limitlenmesi (Clamping)`

$v_{d,i} \leftarrow \max(\min(v_{d,i}, V_{\max}), -V_{\max})$;

`// 3. Durağanlık Kontrolü (Random Impulse)`

Eğer $|v_{d,i}| < 0.01$ **ise**

$v_{d,i} \leftarrow 0.01 \cdot \mathcal{N}(0, 1)$;

`// 4. Konumun Güncellenmesi`

$x_{d,i} \leftarrow x_{d,i} + v_{d,i}$;

`// 5. Harita Sınır Kontrolü`

$x_{d,i} \leftarrow \max(\min(x_{d,i}, Map_{MAX}), Map_{MIN})$;

return $\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i$

3.1.2 Durağanlaşma Problemi ve Rastgele İtki Mekanizması

PSO algoritmasının yakınsama sürecinde sıkça karşılaşılan problemlerden biri, iterasyonlar ilerledikçe parçacık hızlarının sönümlenmesi ve sürünün yerel minimum noktalarında hareketsiz kalmasıdır. Hız vektörlerinin sıfıra yaklaşması, arama uzayının taranmasını durdurmakta ve global optimuma ulaşılamamasına sebep olmaktadır. Yapılan çalışmada durağanlaşma tespit edildiğinde yani hız birleşeni belirli bir alt limitin altına düştüğünde rastgele bir itki eklenerek parçacık hareketinde devamlılık sağlanmıştır.

Algoritma da, her bir eksen ($d \in \{x, y, z\}$) için hız eşik değeri $\varepsilon = 0.01$ m/s olarak belirlenmiştir. Her iterasyon sonunda, $i.$ parçacığın hız bileşenleri kontrol edilmekte ve Denklem (3.14) ile verilen koşulun sağlanması durumunda müdahale edilmektedir.

$$|v_{d,i}^{k+1}| < 0.01 \tag{3.14}$$

Eğer parçacığın hız bileşeni bu kritik değerin altında kalırsa yani parçacık durma noktasına geldiyse, o bileşene mikro bir itki uygulanarak hız değeri Denklem (3.15)

ile gösterildiği şekilde güncellenir.

$$v_{d,i}^{k+1} \leftarrow 0.01 \cdot \mathcal{N}(0,1). \tag{3.15}$$

Burada $\mathcal{N}(0,1)$, ortalaması 0 ve varyansı 1 olan standart normal dağılımı (Gaussian) temsil etmektedir ve bu stokastik süreç, MATLAB® ortamındaki `randn()` fonksiyonu ile modellenmiştir. Denklem (3.15) ile tanımlanan bu mekanizma sayesinde, hız bileşeni kritik değerin altında kalan parçacığa rastgele yönlü ve düşük genlikli anlık bir hız kazandırılmakta; böylece parçacığın ataletini koruyarak arama uzayında hareketliliğinin korunması sağlanmaktadır. Özellikle maliyet yüzeyinin düzleştiği bölgelerde parçacıkların tekrar hareket kabiliyeti kazanması açısından kritik olan bu sürecin işleyişi, Algoritma 2 ile pseudo-code olarak sunulmuştur.

Algoritma 2: Durağanlaşmayı Önleyen Rastgele İtki Mekanizması

Girdi: i. parçacığın hız vektörü $\mathbf{v}_i = [v_{x,i}, v_{y,i}, v_{z,i}]^T$

Çıktı: Güncellenmiş hız vektörü $\mathbf{v}_i$

```
// Parametre tanımlaması
```

$\varepsilon \leftarrow 0.01$;

Döngü *her bir eksen* $d \in \{x, y, z\}$ *için* **yap**

  Eğer $|v_{d,i}| < \varepsilon$ **ise**

```
    // Standart Normal Dağılım
```

    $\eta \leftarrow \mathcal{N}(0,1)$;

```
    // Rastgele itki ata
```

    $v_{d,i} \leftarrow \varepsilon \cdot \eta$;

return $\mathbf{v}_i$

3.1.3 Maliyet Fonksiyonu ve Uygunluk Değerlendirmesi

Önerilen rota planlama yaklaşımında, her bir parçacığın (İHA aday rotasının) başarısı, çok kriterli bir amaç fonksiyonu ile ölçülmektedir. Amaç; İHA'nın başlangıç noktasından hedefe en kısa yoldan ulaşmasını sağlamakla birlikte, uçuş güvenliğini (engel ve irtifa) ve operasyonel gizliliği (radar) eş zamanlı olarak sağlamasıdır.

Uygulama aşamasında her bir parçacık için hesaplanan toplam maliyet değeri (fitness), Denklem (3.16) ile formüle edilmiştir. Burada $\mathbf{x}_i$, i. parçacığın anlık konumunu temsil eder. λ katsayıları ise ilgili maliyet bileşeninin toplam skor üzerindeki ağırlığını belirler. Bu ağırlık değerine göre öncelik de artış devreye

girer ve sistem yönelimi bu değere sağlanır. MATLAB® ortamında gerçekleştirilen simülasyonlarda, engel çarpışması (J_C) ve alan ihlali (J_A) gibi telafisi mümkün olmayan durumlar için λ_C ve λ_A katsayıları çok büyük değerler (örneğin 99999) seçilerek kesin bir kısıt oluşturulmuştur.

$$J(\mathbf{x}_i) = \underbrace{\lambda_L J_L(\mathbf{x}_i) + \lambda_H J_H(\mathbf{x}_i) + \lambda_R J_R(\mathbf{x}_i)}_{\text{Optimizasyon Hedefleri}} + \underbrace{\lambda_C J_C(\mathbf{x}_i) + \lambda_A J_A(\mathbf{x}_i)}_{\text{Ceza (Penalty) Kısıtları}} \quad (3.16)$$

Denklem (3.16)'te yer alan değişkenlerin ve fonksiyonların tanımları şöyledir:

- $J(\mathbf{x}_i)$: $i.$ parçacık (aday rota) için hesaplanan toplam **uygunluk (fitness) değeridir**.
- $\mathbf{x}_i$: Üç boyutlu uzayda tanımlı olan $i.$ parçacığın anlık konum vektörüdür.
- $\lambda_{\{L,H,R,C,A\}}$: Her bir maliyet bileşeninin toplam fonksiyon üzerindeki baskınlığını belirleyen **ağırlık katsayılarıdır**.
- $J_L(\mathbf{x}_i)$: İHA'nın enerji verimliliğini sağlamak adına minimize edilmesi gereken **rota uzunluğu maliyetidir**.
- $J_H(\mathbf{x}_i)$: İHA'nın belirlenen irtifa koridorunda (tavan sınırları) kalmasını sağlayan **irtifa maliyetidir**.
- $J_R(\mathbf{x}_i)$: Tehdit unsuru oluşturan radarlara yakalanma riskini ölçen **görünürlük maliyetidir**.
- $J_C(\mathbf{x}_i)$: Rotanın herhangi bir engelle (dağ vb.) çakışıp çakışmadığını kontrol eden **çarpışma cezasıdır**.
- $J_A(\mathbf{x}_i)$: Parçacığın başlangıçta limitli alan dışına çıkmasını kontrol eden **alan ihlali cezasıdır**.

Bu maliyet fonksiyonunun hesaplanması ve global en iyi (G_{best}) çözümün güncellenmesi süreci, Algoritma 3'te sunulmuştur. Bu algoritma, her adımda sistemde kullanılan parçacıklar için fitness fonksiyonunu hesaplayarak en düşük değere sahip parçacığı tespit eder. Bu parçalık sürünün bir sonraki adımını temsil eder. Bu kod hedef konuma varılıncaya kadar sürekli olarak tekrar çalışır ve PSO algoritma hesaplamasının temelini oluşturur.

Algoritma 3: Uygunluk (Fitness) Hesaplama ve En İyi Konum Güncelleme

Girdi: Mevcut parçacık popülasyonu, Hedef konumu, Engel haritası

Çıktı: Güncellenmiş P_{best} ve G_{best} değerleri, Nihai Rota

`// Ana Optimizasyon Döngüsü`

Döngü (While) *Maksimum iterasyona ulaşılmadı* ***veya*** *Hata* $< \epsilon$ **yap**

  Döngü $i = 1$ ***to*** N *(Popülasyon Sayısı)* **yap**

    `// Maliyet Bileşenlerinin Hesaplanması`

    $C_{\text{Uzunluk}} \leftarrow$ Hedefe olan Öklid mesafesi;

    $C_{\text{Irtifa}} \leftarrow$ Zemin ve tavan irtifa farkı maliyeti;

    $C_{\text{Engel}} \leftarrow$ Çarpışma durumu (0 veya 1);

    $C_{\text{Alan}} \leftarrow$ Görev sahası dışına çıkma (Açısal Alan Kısıtı) (0 veya 1);

    $C_{\text{Radar}} \leftarrow$ Radar kapsama alanına girme maliyeti;

    `// Toplam Uygunluk Değeri (Weighted Sum)`

    $Fitness_i \leftarrow \lambda_L C_{\text{Uzunluk}} + \lambda_H C_{\text{Irtifa}} + \lambda_C C_{\text{Engel}} + \lambda_A C_{\text{Alan}} + C_{\text{Radar}}$;

    `// Bireysel En İyi (Pbest) Güncellemesi`

    Eğer $Fitness_i < P_{best_score}(i)$ **ise**

      $P_{\text{best_loc}}(i) \leftarrow \mathbf{x}_i$;

      $P_{\text{best_score}}(i) \leftarrow Fitness_i$;

    `// Küresel En İyi (Gbest) Güncellemesi`

    Eğer $Fitness_i < G_{best_score}$ **ise**

      $G_{\text{best_loc}} \leftarrow \mathbf{x}_i$;

      $G_{\text{best_score}} \leftarrow Fitness_i$;

  `// Yolu Kaydet ve Kılavuzlu Hareket Kontrolü`

  RotaListesi $\leftarrow G_{\text{best_loc}}$ ekle;

  Eğer *Manuel Hareket Aktif* ***ve*** *Hedefe Yaklaşıldı* **ise**

    Sürü konumlarını hedef doğrultusunda yeniden başlat (Reset);

return *Nihai Rota*

Maliyet fonksiyonunu oluşturan alt bileşenlerin fiziksel anlamları ve hesaplama yöntemleri aşağıda detaylandırılmıştır.

3.1.3.1 Toplam Mesafe Bileşeni

İHA'nın enerji verimliliğini maksimize etmek ve görev süresini en aza indirmek adına, rota planlamasının temel hedeflerinden biri başlangıç ile bitiş noktası arasındaki Öklid mesafesini minimize etmektir. Ancak, optimizasyon probleminde kullanılan diğer maliyet fonksiyonları (radar riski, çarpışma durumu vb.) genellikle $[0, 1]$ aralığında veya birimsiz değerler üretirken; fiziksel mesafe metre cinsinden

çok büyük değerlere ($10^3, 10^4$ m) ulaşabilmektedir.

Bu ölçek farkının, toplam maliyet fonksiyonunda mesafe bileşeninin diğer kriterleri baskılamasına yol açmasını engellemek amacıyla normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Harita sınırları $[X_{\min}, X_{\max}]$ ve $[Y_{\min}, Y_{\max}]$ olmak üzere, parçacığın hedefe olan göreli uzaklığı eksen bazında normalize edilmiş farklar (dx, dy) üzerinden hesaplanır. Yapılan hesaplama Denklem (3.17) ile gösterilmiştir.

$$dx = \frac{x_i - x_{\text{goal}}}{|X_{\max} - X_{\min}|}, \qquad dy = \frac{y_i - y_{\text{goal}}}{|Y_{\max} - Y_{\min}|} \tag{3.17}$$

Bu normalize değerler kullanılarak elde edilen yatay mesafe maliyet fonksiyonu $J_L(\mathbf{x}_i)$, Denklem (3.18) ile gösterilmektedir.

$$J_L(\mathbf{x}_i) = \sqrt{dx^2 + dy^2} = \sqrt{\left(\frac{x_i - x_{\text{goal}}}{|X_{\max} - X_{\min}|}\right)^2 + \left(\frac{y_i - y_{\text{goal}}}{|Y_{\max} - Y_{\min}|}\right)^2} \tag{3.18}$$

Denklem (3.18), rotanın yatay düzlemde hedefe olan uzaklığını harita boyutundan bağımsız, birimsiz bir büyüklük olarak ifade eder. Bu yaklaşımın yazılımsal uygulaması ve hesaplama adımları Algoritma 4 ile verilmiştir.

Algoritma 4: Normalize Edilmiş Mesafe Maliyeti Hesabı

Girdi: Parçacık Konumu (x, y), Hedef Konumu (x_g, y_g), Harita Sınırları

Çıktı: Normalize Mesafe Maliyeti (out)

```
// X eksenindeki normalize fark
```

1 $dx \leftarrow (x - x_g)/|X_{MIN} - X_{MAX}|$;

```
// Y eksenindeki normalize fark
```

2 $dy \leftarrow (y - y_g)/|Y_{MIN} - Y_{MAX}|$;

```
// Öklid bağıntısı ile birleşim
```

3 $out \leftarrow \sqrt{dx^2 + dy^2}$;

4 **return** out

3.1.3.2 Engel İhlali Cezası

İHA'nın üç boyutlu ortamda güvenli seyrüseferi için, belirlenen rotanın yeryüzü şekilleri ve engellerle çarpışmaması gerekmektedir. Bu kapsamda, parçacığın yatay düzlemdeki koordinatlarına karşılık gelen arazi yüksekliği $h_{\text{map}}(x_i, y_i)$ referans alınarak bir çarpışma kontrolü gerçekleştirilir.

Sisteme, hareket anında yanlış hesaplamaları tolere etmek amacıyla $\Delta h = 0.5$ km değerinde bir güvenlik marjı tanımlanmıştır. Buna göre engel ihlali durumunu

denetleyen indikatör fonksiyon $J_C(\mathbf{x}_i)$, Denklem (3.19) ile formüle edilmiştir.

$$J_C(\mathbf{x}_i) = \begin{cases} 1, & z_i \leq h_{\text{map}}(x_i, y_i) + \Delta h, \\ 0, & z_i > h_{\text{map}}(x_i, y_i) + \Delta h. \end{cases} \tag{3.19}$$

Eğer parçacığın irtifası (z_i), güvenlik marjı eklenmiş arazi yüksekliğinin altında kalıyorsa, fonksiyon 1 değerini döndürür. Bu durum, toplam maliyet fonksiyonunda çok büyük bir ceza katsayısı (λ_C) ile çarpılarak, engelle temas eden veya araziye çok yaklaşan rotaların engellenmesini sağlar. İlgili Algoritma 5 ile gösterilmiştir. Algoritma da kullanılan çarpışma tespit metodu harita grid yapısında olduğundan dolayı parçacık hareketleri ile tam olarak kesişim tespiti yapamaz. Fakat MATLAB® $interp()$ metodu ile parçacığın anlık konumunu çevreleyen en yakın komşu ızgara noktaları üzerinden iki boyutlu doğrusal ara değerleme (bilinear interpolation) uygulayarak, ilgili koordinattaki yükseklik değerini hesaplar ve sürekli uzayda hassas bir engel kontrolünün yapılmasına olanak sağlar.

Algoritma 5: Engel Çarpışma Kontrolü

Girdi: Parçacık Konumu (x, y, z), Harita Verisi

Çıktı: Çarpışma Durumu (Bool: 0 veya 1)

```
// Parametre: Güvenlik Marjı
```

$\Delta h \leftarrow 0.5$;

```
// İlgili koordinattaki arazi yüksekliğinin
   çekilmesi
```

$h_{map} \leftarrow \text{interp2}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, x, y, \text{'linear'}, \max(\mathbf{Z}))$;

```
// İrtifa ile engel yüksekliğinin kıyaslanması
```

Eğer $z \leq (h_{map} + \Delta h)$ **ise**

```
    // Çarpışma Tespit Edildi (Ceza Uygula)
```

    $out \leftarrow 1$;

değilse

```
    // Güvenli Uçuş
```

    $out \leftarrow 0$;

return out

3.1.3.3 Radar Bölgesi Cezası

Operasyon sahasındaki hava savunma tehditleri, N_R adet aktif radar sensöründen oluşan bir küme, $\mathcal{R} = \{r_1, r_2, \ldots, r_{N_R}\}$, ile temsil edilmektedir. Her bir radar ünitesi r, uzayda sabit bir $\mathbf{x}_r$ konumuna ve etkin bir R_r tespit menziline sahiptir.

Parçacığın ilgili radara olan Öklid uzaklığı $d_{i,r}$, Denklem (3.20) ile hesaplanır.

$$d_{i,r} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_r\| = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 + (z_i - z_r)^2}. \tag{3.20}$$

Bu çalışmada, radar kapsama alanlarının modellenmesinde geleneksel keskin sınırlı yöntemler yerine, Sigmoid tabanlı olasılıksal bir yaklaşım benimsenmiştir. Keskin sınırlı modellerde içerde/dışarda mantığı kullanılır. Menzil sınırındaki ani maliyet değişimleri, optimizasyon algoritmalarının türev bilgisini kaybetmesine ve parçacıkların sınır bölgelerinde kararsız davranışlar sergilemesine neden olabilmektedir.

Buna karşın önerilen Sigmoid tabanlı model, radar merkezine yaklaşıldıkça artan sürekli ve türevlenebilir bir maliyet yüzeyi oluşturur. Bu yapı, optimizasyon algoritmasına, parçacığın tehlikeli bölgeden hangi yöne doğru uzaklaşması gerektiğine dair hassas bir gradyan bilgi sağlar. Böylece, sürünün sadece radar menzilinden çıkması değil, aynı zamanda tehdit merkezinden mümkün olan en uzak güvenli bölgelere yönelmesi matematiksel olarak teşvik edilir.

Bu doğrultuda, $i.$ parçacığın r radarı tarafından tespit edilme riskini ifade eden maliyet fonksiyonu Denklem (3.21) ile tanımlanmıştır.

$$f_r(d_{i,r}) = \begin{cases} \dfrac{1}{1 + e^{\alpha(d_{i,r} - R_r)}}, & d_{i,r} < R_r \\ 0, & d_{i,r} \geq R_r \end{cases} \tag{3.21}$$

Denklem (3.21) ile gösterilen denklemde α, algılama hassasiyetini ve risk geçişinin eğimini belirleyen katsayıdır. Denklemden görüleceği üzere; parçacık radar merkezindeyken ($d \approx 0$) maliyet maksimum (1) değerine yaklaşmakta, sınır hattında ($d \to R_r$) yumuşak bir düşüş sergilemekte ve menzil dışında hesaplama verimliliği adına 0 kabul edilmektedir.

Toplam radar cezası $J_R(\mathbf{x}_i)$, sahadaki tüm radarlardan kaynaklanan bireysel risklerin kümülatif toplamı olarak Denklem (3.22) ile gösterilmiştir.

$$J_R(\mathbf{x}_i) = \sum_{r \in \mathcal{R}} f_r(d_{i,r}). \tag{3.22}$$

Çoklu radar tehdidi altında kümülatif riskin hesaplanması ve Sigmoid fonksiyonunun algoritmik uygulaması Algoritma 6 ile gösterilmektedir.

Algoritma 6: Kümülatif Radar Tespit Riski Hesabı

Girdi: Parçacık Konumu $\mathbf{x}_p$, Radar Listesi $\mathcal{R}$

Çıktı: Toplam Radar Cezası ($TotalCost$)

// Değişkenlerin Başlatılması

$TotalCost \leftarrow 0$;

$\alpha \leftarrow 0.5$; // Sigmoid eğim parametresi

$\epsilon \leftarrow 10^{-6}$; // Sayısal kararlılık sabiti

// Sahadaki tüm radarların taranması

Döngü *her bir radar* $r \in \mathcal{R}$ *için* **yap**

  // Radar parametreleri: Merkez ($\mathbf{x}_r$), Menzil (R_r)

  // 1. Öklid Mesafesinin Hesaplanması

  $d \leftarrow \|\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_r\|$;

  // 2. Sigmoid Tabanlı Risk Değerlendirmesi

  Eğer $d < R_r$ **ise**

    // Risk Fonksiyonu: Merkeze yaklaştıkça artan maliyet

    $P_{val} \leftarrow \frac{1}{1+\exp(\alpha \cdot (d - R_r))}$;

    // Sayısal Kırpma (Clamping)

    $P_{val} \leftarrow \min(\max(P_{val}, \epsilon), 1 - \epsilon)$;

    // Kümülatif toplama ekle

    $TotalCost \leftarrow TotalCost + P_{val}$;

  değilse

    // Menzil dışı: Risk sıfır kabul edilir

    $TotalCost \leftarrow TotalCost + 0$;

return $TotalCost$

3.1.3.4 İrtifa Limit İhlali Cezası

İHA'nın görev sahası boyunca operasyonel tavan irtifasına riayet etmesi ve hedefe yaklaşırken kontrollü bir alçalma profili izlemesi gerekmektedir. Bu çalışmada irtifa yönetimi; "Seyir Aşaması" ve "Alçalma Aşaması" olmak üzere iki farklı dinamik süreç olarak modellenmiştir. Bunun amacı hedefe yönelirken irtifanın belirleyici bir faktör olmasının yerel minimumlarda sıkışma ihtimalini arttırmasıdır. Bunun yerine uygun mesafeye kadar etkin bir yönelim sağlamaz. İHA'nın yatay düzlemde hedefe olan Öklid uzaklığı $d_{i,\text{goal}}$, Denklem (3.23) ile hesaplanır.

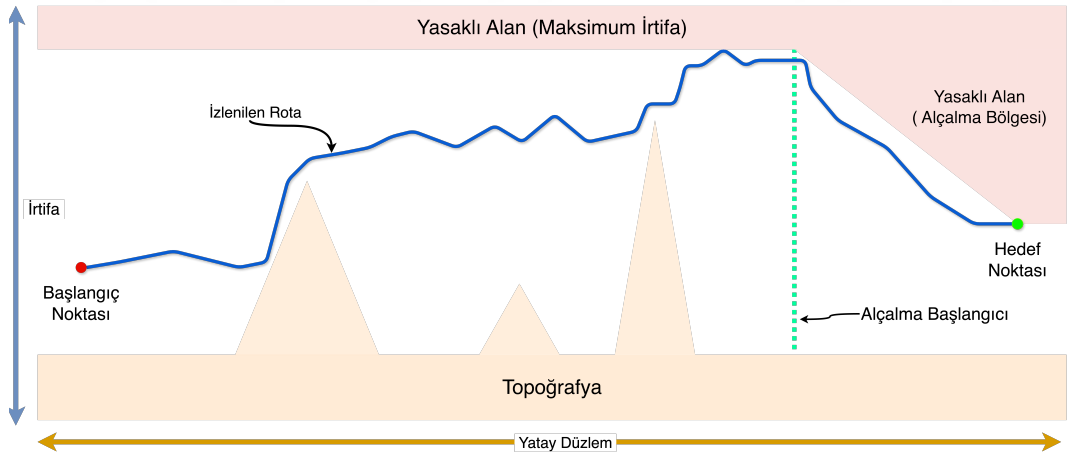
$$d_{i,\text{goal}} = \sqrt{(x_i - x_{\text{goal}})^2 + (y_i - y_{\text{goal}})^2}. \tag{3.23}$$

Algoritmada, hedefe belirli bir mesafeden (R_{descent}) daha yakın olunduğunda ve ilgili görev bayrağı aktifleştiğinde ($Flag = 2$), sabit irtifa kısıtı yerini lineer bir alçalma hattına bırakır. Bu süzülme hattının anlık tavan değeri z_{allow}, Denklem (3.24) ile hesaplanır.

$$z_{\text{allow}}(d_{i,\text{goal}}) = \left(\frac{z_{\max} - z_{\text{goal}}}{R_{\text{descent}}} \right) \cdot d_{i,\text{goal}} + z_{\text{goal}}. \tag{3.24}$$

Maliyet fonksiyonu $J_H(\mathbf{x}_i)$, İHA'nın bu referans hattına göre konumunu değerlendirir. Uygulanan mantık hedefe yaklaşıncaya kadar irtifayı maksimum irtifa dışında özgür bırakmayı hedefler ve sabit bir girdi yapar. Bu alçalma bölgesine ulaşıldığında ise Şekil 3.1 ile gösterildiği gibi yeşil taralı çizgi geçildikten sonra yasaklı alan devreye girer ve irtifa cezası sistemin yönlendirmesini sağlar. Kullanılan algoritmik akış Algoritma 7 ile sunulmuştur.

$$J_H(\mathbf{x}_i) = \begin{cases} \dfrac{z_{\text{allow}} - z_i}{Z_{\text{map_max}}}, & \text{Alçalma Modu} \wedge (z_i < z_{\text{allow}}) \\ 1, & \text{Alçalma Modu} \wedge (z_i \geq z_{\text{allow}}) \\ 1, & \text{Seyir Modu} \wedge (z_i < z_{\max}) \\ 2, & \text{Seyir Modu} \wedge (z_i \geq z_{\max}) \end{cases} \tag{3.25}$$



Şekil 3.1 Rota Boyunca İrtifa Yönetimi ve Alçalma Bölgesi Şeması

Algoritma 7: Dinamik İrtifa Cezası

Girdi: Parçacık i, Hedef Konumu, Alçalma Yarıçapı ($alcUzaklik$), Maksimum İrtifa ($maxIrtifa$)

Çıktı: İrtifa Maliyet Değeri (out)

// 1. Hedefe olan yatay mesafenin hesaplanması

$mesafe \leftarrow \sqrt{(x_i - x_{goal})^2 + (y_i - y_{goal})^2}$;

// 2. Alçalma ve Seyir Modu Kontrolü

Eğer $mesafe < alcUzaklik$ ***ve*** $limitliAlanBasladi == 1$ **ise**

    // -- Alçalma Aşaması --

    // Lineer denklem ile o noktadaki izin verilen tavan yüksekliği

    $maxYukseklik \leftarrow \frac{(maxIrtifa - z_{goal})}{alcUzaklik} \cdot mesafe + z_{goal}$;

    Eğer $maxYukseklik > z_i$ **ise**

        // Güvenli: Tavana olan fark normalize edilerek maliyet atanır

        $out \leftarrow (maxYukseklik - z_i)/Z_{MAP_MAX}$;

    değilse

        // İhlal: İzin verilen hattın üzerinde

        $out \leftarrow 1$;

değilse

    // -- Seyir Aşaması --

    Eğer $z_i < maxIrtifa$ **ise**

        // Güvenli: Standart seyir maliyeti

        $out \leftarrow 1$;

    değilse

        // İhlal: Maksimum irtifa sınırı aşıldı

        $out \leftarrow 2$;

return out

3.1.3.5 Sınırlandırılmış Alan Cezası

PSO yapısında parçacıklar ilk iterasyonlarda arama uzayına rastgele dağılma eğilimindedir. Ancak rota planlaması sırasında bir süre PSO algoritmasının yönlendirilmesi gerekebilmektedir. Bu amaçla, algoritmanın ilk safhasında aktif olan ve sınırlandırılmış alan olarak adlandırılabilecek bir açısal kısıt mekanizması geliştirilmiştir.

Başlangıç konumu $\mathbf{x}_{\text{start}}$ merkez kabul edilerek, belirli bir yarıçap (R_{sector}) ve açısal genişlik (θ_{width}) ile tanımlanan bir dairesel sektör oluşturulur. i. parçacığın başlangıç noktasına göre konum vektörü $\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{\text{start}}$ olmak üzere, parçacığın merkeze olan uzaklığı d_i ve açısı ϕ_i Denklem (3.27) ile gösterildiği gibi hesaplanır.

$$d_i = \|\mathbf{v}_i\| = \sqrt{(x_i - x_{\text{start}})^2 + (y_i - y_{\text{start}})^2}, \tag{3.26}$$

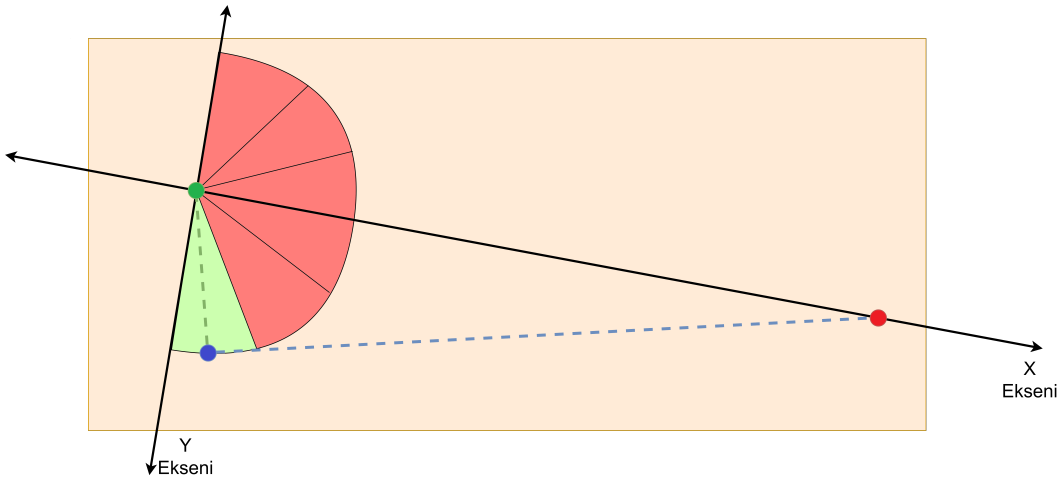
$$\phi_i = \text{atan2}(y_i - y_{\text{start}}, x_i - x_{\text{start}}) \pmod{360^\circ} \tag{3.27}$$

Burada açısal değerler, sürekliliği sağlamak adına $[0, 360^\circ]$ aralığına normalize edilmektedir.

Tanımlanan sektörün başlangıç açısı ϕ_{start} olmak üzere, bir parçacığın izin verilen güvenli bölge içinde sayılabilmesi için hem mesafe hem de açı şartını aynı anda sağlaması gerekmektedir. Aksi takdirde parçacığa ceza uygulanır. Alan dışı kalma durumunu (J_A) kontrol eden mantıksal fonksiyon Denklem (3.28) ile ifade edilmiştir:

$$J_A(\mathbf{x}_i) = \begin{cases} 0, & (d_i \leq R_{\text{sector}}) \wedge (\phi_i \in [\phi_{\text{start}}, \phi_{\text{start}} + \theta_{\text{width}}]), \\ 1, & \text{aksi halde.} \end{cases} \tag{3.28}$$

Bu kısıtlama, sadece parçacıklar belirlenen R_{sector} yarıçaplı bölgeyi geçene kadar veya algoritmanın belirli bir aşamasına kadar aktif tutulur. Kısıtın kalkmasıyla birlikte parçacıklar tüm arama uzayında serbestçe hareket ederek hedefe doğru yönelirler. Bu mekanizmanın şematik gösterimi ve rota üzerindeki etkisi Şekil 3.2 üzerinde, algoritmik uygulama adımları ise Algoritma 8 ile sunulmuştur.



Şekil 3.2 Açısal Kısıt Alan Gösterimi

Şekil 3.2 üzerinde bulunan yeşil nokta başlangıç konumunu, mavi nokta açısal kısıt

bölgesinin hedef noktasını ve kırmızı nokta ise hedef noktayı ifade etmektedir. Kırmızı alanlar kısıtlı alan kontrolünde bulunan yasaklı alanları, yeşil alan ise hareket edilebilecek alanı gösterir.

Algoritma 8: Açısal Alan Kısıtı Kontrolü

Girdi: Parçacık Konumu $\mathbf{x}_i$, Başlangıç $\mathbf{x}_{start}$, Parametreler ($R_{sec}, \phi_{start}, \theta_{width}$)

Çıktı: Alan İhlali Durumu (Bool: 0 veya 1)

`// Kısıtlamanın aktiflik kontrolü (Sadece başlangıç fazında)`

Eğer $limitliAlanBasladi < 2$ **ise**

  `// 1. Göreli vektör ve kutupsal koordinatlar`

  $\vec{v} \leftarrow \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{start}$;

  $d \leftarrow \|\vec{v}\|$;

  $\phi \leftarrow \text{atan2d}(v_y, v_x)$; `// Derece cinsinden`

  `// 2. Açıların 0-360 aralığına normalize edilmesi`

  $\phi \leftarrow \phi \pmod{360}$;

  $\phi_{start} \leftarrow \phi_{start} \pmod{360}$;

  `// 3. Sektör İçinde mi?`

  `// Açısal farkın modüler aritmetikle kontrolü`

  $angleCheck \leftarrow (\phi - \phi_{start} + 360) \pmod{360} \leq \theta_{width}$;

  Eğer $(d \leq R_{sec})$ ***ve*** $(angleCheck == True)$ **ise**

    `// Güvenli: İzin verilen sektör içinde`

    out $\leftarrow 0$ (False);

  değilse

    `// İhlal: Sektör dışına çıktı, ceza uygula`

    out $\leftarrow 1$ (True);

değilse

  `// Kısıt pasif: Normal PSO davranışı`

  out $\leftarrow 0$ (False);

return *out*

3.1.4 Manuel Hareket Mekanizması ve Rekürsif Yerel Minimumdan Kaçış

Karmaşık engellerin ve yoğun tehdit unsurlarının bulunduğu ortamlarda (örneğin "U" şeklindeki kapalı engeller veya radar vadileri), PSO algoritması global optimuma ulaşmadan yerel bir minimum noktasına saplanıp kalabilmektedir. Bu durumda, tüm parçacıklar yerel en iyi (G_{best}) etrafında toplanır ve hız vektörleri sönümlenerek arama kabiliyeti kaybolur. Literatürde ve bu çalışmada bu sorunu

çözmek için parçacıklara rastgele hız verilmektedir. Fakat bu yapı sadece küçük ölçekli takılma durumlarında sistemi yerel minimumdan kurtarabilir; ancak daha büyük kapalı ortamlarda yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada, sürünün sıkışılan bölgeden bilinçli bir manevra ile kurtulmasını sağlayan deterministik ve **rekürsif** bir hareket mekanizması geliştirilmiştir.

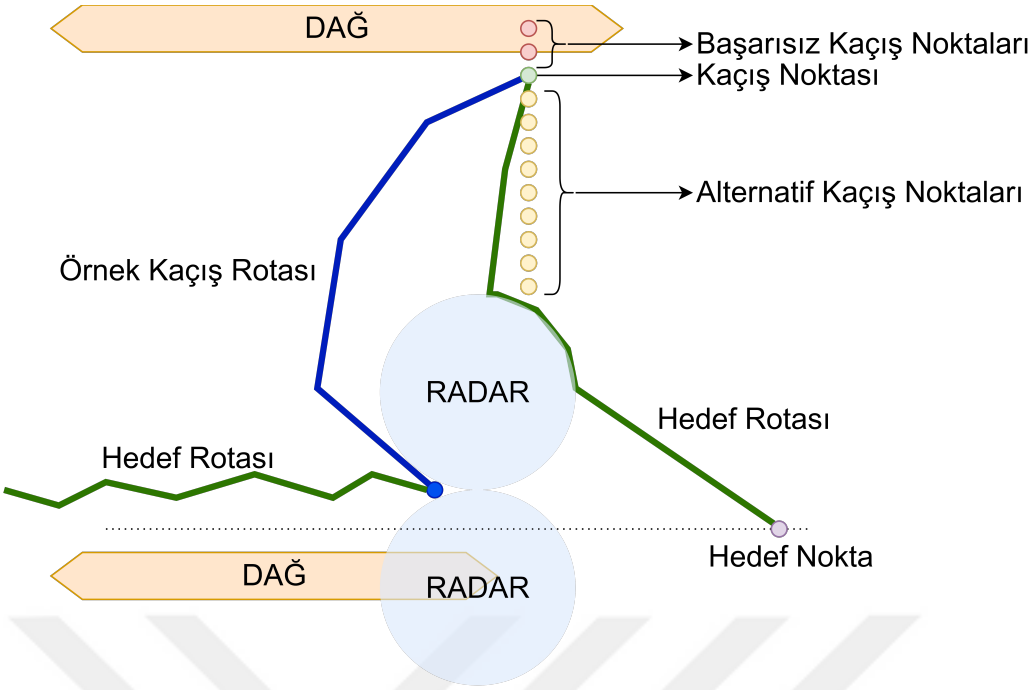
Önerilen manuel hareket mekanizması 4 temel aşamadan oluşur:

1. **Durgunluk Tespiti**
   Algoritma, küresel en iyi uygunluk değerini (G_{best_score}) her iterasyonda izler. Eğer bu değer, belirlenen bir eşik iterasyon sayısı ($T_{wait} = 25$) boyunca değişmezse, sürünün bir engele takıldığı veya yerel minimuma düştüğü kabul edilir.

2. **Kaçış Noktası Tespiti**
   Durgunluk tespit edildiğinde, sistem ana hedefi geçici olarak askıya alır. Sürünün mevcut konumundan ileriye (x yönünde) ve hedefin bulunduğu konuma göre yan tarafa (y yönünde) doğru ofset verilerek sanal bir **"Kaçış Noktası"** aranır.

3. **Rekürsif Hareket Başlatma**
   Uygun bir kaçış noktası tespit edildiğinde, sürünün mevcut hafızası (P_{best}, G_{best} ve hızlar) sıfırlanır. PSO algoritması, bu kaçış noktasını yeni bir alt hedef olarak kabul eder ve optimizasyon sürecini bu nokta için rekürsif olarak yeniden başlatır.

4. **Hedef Güncelleme ve Dönüş**
   Sürünün kaçış noktasına ulaşıp ulaşmadığı, anlık G_{best} konumu ile belirlenen kaçış noktası arasındaki öklid mesafesi hesaplanarak kontrol edilir. Hesaplanan mesafe belirli bir yakınsama eşiğinin (örneğin 1 birim) altına düştüğünde rekürsif alt süreç tamamlanmış sayılır. Akabinde hedef nokta, geçici konumdan tekrar asıl nihai hedef konumuna güncellenir ve parçacıkların ana rotaya adapte olmaları için sürünün mevcut hafızası (P_{best}, G_{best} ve hızlar) sıfırlanır.



Şekil 3.3 Manuel Kaçış Mekanizması ve Rekürsif Hedef Atama

Manuel kaçış algoritmasının işleyişi Şekil 3.3 üzerinde gösterilmektedir. Şekilde bulunan mavi nokta, sürünün ilerleyemediği ve 2 radar alanı kıskacında yerel minimuma saplandığı son noktayı ifade etmektedir. Algoritma 9 ile detaylandırılan süreçte, en uzaktan başlayacak şekilde kaçış noktası olmaya aday sarı noktalar sezgisel bir yaklaşımla taranır. Bu tarama en uzak noktadan yakın noktaya olacak şekilde gerçekleştirilir. Ara nokta arama algoritmasının uzak noktadan başlanmasının amacı yerel minimumda sabit kalınan eksenden diğer eksene doğru uzaklaşmanın sıkışılan eksenin PSO algoritmasında yarattığı hareket önceliğini azaltarak daha yüksek bir hareket kabiliyeti sağlamasıdır. Ayrıca uzak noktaya hareketin sağlanması engel büyüdükçe engeli aşmayı kolaylaştırmaktadır.

Bu uygulanan süreç, problemin ana hedefe ulaşmak yerine geçici bir ara hedefe ulaşmak şeklinde alt parçalara ayrıldığı rekürsif bir optimizasyon yapısıdır. Aday noktanın geçerli bir kaçış hedefi olabilmesi için şu şartlar aranır:

- Herhangi bir engelle çakışmaması ($J_C = 0$),
- Radar tehdit seviyesinin çok düşük olması ($J_R < 0.005$).

Uygun bir kaçış noktası bulunduğunda, sürü bu noktayı yeni hedef kabul edecek şekilde yeniden başlatılır. Böylece sürü, engelin etrafından dolaşmaya zorlanmış olur. İlgili rekürsif kurtarma süreci Algoritma 9'te sunulmuştur.

Algoritma 9: Manuel Hareket Mekanizması ile Yerel Minimumdan Kaçış

Girdi: Küresel En İyi Skor (G_{best}), Sayaç, Parametreler

Çıktı: Sürü Durumu ve Ara Hedef ($\mathbf{x}_{esc}$)

```
// 1. Durgunluk (Stagnation) Kontrolü
```

Eğer $G_{best_score} == G_{best_gecmis}$ **ise**
    $Sayac \leftarrow Sayac + 1$;
değilse ise *Kaçış Modu Aktif Değil* **ise**
    $Sayac \leftarrow 0$;

```
// 2. Eşik Değer Aşıldı mı? (Sürü sıkıştı mı?)
```

Eğer $Sayac > 25$ **ise**

```
    // Ara Hedef Arama Döngüsü: Yanal ofset taranır
```

    Döngü $offsetY \leftarrow 30$ ***downto*** 25 **yap**

```
        // Aday konum: 15 br ileri, offsetY kadar yana
```

        $\mathbf{x}_{try}.x \leftarrow G_{best}.x + 15$;
        Eğer $(y_{goal} - G_{best}.y) > 0$ **ise**
            $\mathbf{x}_{try}.y \leftarrow G_{best}.y - offsetY$; `// Zıt yöne manevra`
        değilse
            $\mathbf{x}_{try}.y \leftarrow G_{best}.y + offsetY$;

```
        // Güvenlik Kontrolü: Engel ve Radar yoksa
           onayla
```

        Eğer *(*$\neg$*Collision*$(\mathbf{x}_{try})$*)* ***ve*** *(Radar*$(\mathbf{x}_{try}) < 0.005$*)* **ise**
            $\mathbf{x}_{esc} \leftarrow \mathbf{x}_{try}$;
            $KaßModu \leftarrow$ True;
            $Sayac \leftarrow 0$;

```
            // Sürüyü kaçış noktasına yönlendir ve
               REKÜRSİF BAŞLAT
```

            parcacikSifirla($G_{best}, \mathbf{x}_{esc}$);
            break;
        W

```
// Geçmiş skorun güncellenmesi
```

$G_{best_gecmis} \leftarrow G_{best_score}$;

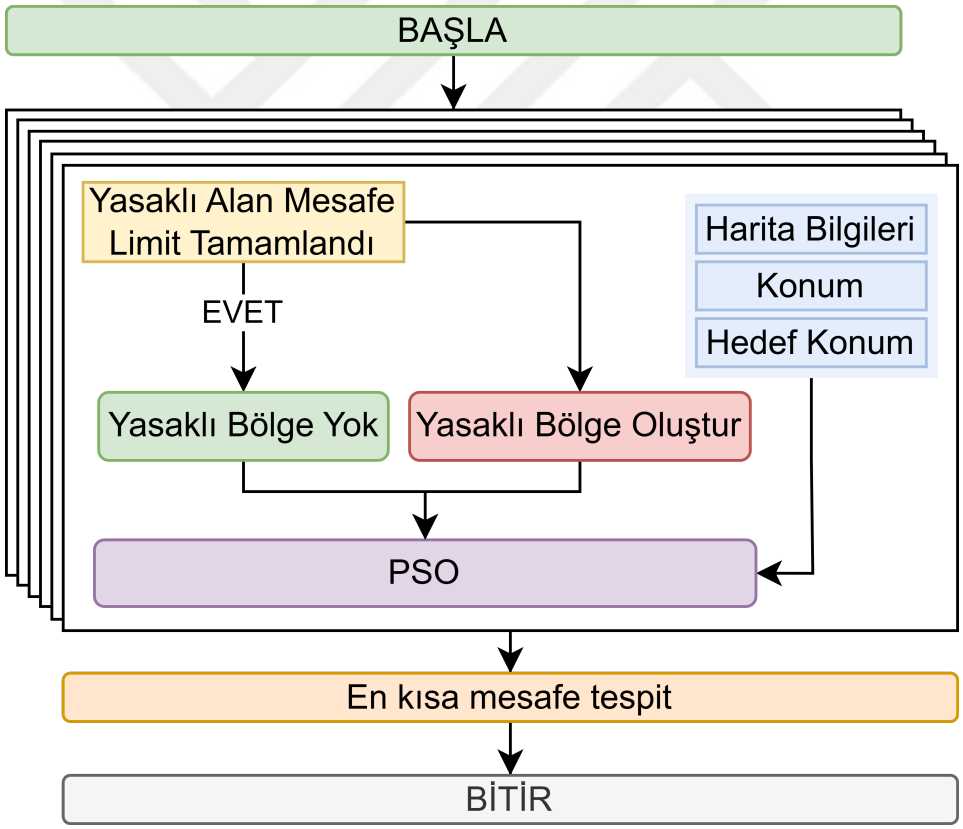
3.2 Dağıtık PSO Algoritması

Standart PSO algoritması, karmaşık ve engelli ortamlarda (özellikle "U" tipi engeller veya labirent yapılarında) tüm sürünün tek bir yerel minimum noktasına sürüklenmesi riskiyle karşı karşıyadır. Bu çalışmada, arama uzayının çeşitliliğini

artırmak ve farklı rota alternatiflerini eş zamanlı olarak değerlendirmek amacıyla Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu (DPSO) mimarisi geliştirilmiştir.

Önerilen yapı, MATLAB® *Parallel Computing Toolbox* altyapısı kullanılarak, birbirinden bağımsız çalışan 6 farklı PSO alt sürüsünün paralel olarak koşturulması esasına dayanır. Tek bir çekirdek üzerinde seri işlem yapmak yerine, çok çekirdekli işlemci gücü kullanılarak hesaplama süresi optimize edilmiş ve çözüm uzayı parçalanarak taranmıştır.

Paralel mimarinin çalışma prensibi, "Açısal Alan Ayrıştırması" yöntemine dayanır. Başlangıç ve hedef noktası arasındaki vektörün açısı (θ_{ref}) referans kabul edilerek ($0°$), arama uzayı $180°$'lik bir ön sektör olarak tanımlanır. Bu sektör, her biri $30°$ genişliğinde olan 6 adet alt dilime ayrılır. Her bir PSO alt sürüsü ($P_1, P_2, \ldots, P_6$), başlangıç aşamasında kendisine atanan bu spesifik açısal koridor içinde arama yapmaya zorlanır.



Şekil 3.4 Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu Mimarisi

Bu strateji sayesinde; örneğin 1. sürü engelin en solundan, 6. sürü en sağından, diğer sürüler ise merkezden geçiş imkanlarını eş zamanlı olarak sorgular. Kısıtlı alan taraması tamamlandıktan sonra, alt sürüler kısıtlardan kurtularak hedefe yönelir. Bu yapı, yerel minimumlardan kaçınmayı sağladığı gibi, çözüm uzayının

global ölçekte çok daha etkin taranmasına olanak tanır.

DPSO mimarisinin paralel işleyişi ve görev dağılımı Algoritma 10'de sunulmuştur.

Algoritma 10: Dağıtık ve Paralel PSO (D-PSO) Ana Döngüsü

Girdi: Harita (M), Başlangıç (S), Hedef (E), Görev Sayısı ($N_{task} = 6$)

Çıktı: Hesaplanan Tüm Rotalar ($PathList$)

```
// 1. Referans Açının Hesaplanması
```

$\vec{v} \leftarrow E - S$;

$\theta_{ref} \leftarrow \text{atan2}(v_y, v_x)$;

```
// 2. Açısal Sektörlerin Belirlenmesi ve Paralel İş Emri
```

$Futures \leftarrow$ ParallelJobArray(N_{task});

$\Delta\theta \leftarrow 180/N_{task}$; `// Her sektör 30 derece`

Döngü $i \leftarrow 1$ ***to*** N_{task} **yap**

```
    // Alt sürüye ait merkez açının atanması
```

    $\theta_{start} \leftarrow \theta_{ref} + \Delta\theta \times (i - \frac{N_{task}}{2} - 1)$;

```
    // MATLAB parfeval ile asenkron görev başlatma
```

    $Futures(i) \leftarrow$ parfeval($\ldots$, runPSO, $M, S, E, \theta_{start}, \Delta\theta$);

```
// 3. Sonuçların Beklenmesi ve Toplanması
```

Wait(Futures) ; `// Tüm çekirdeklerin işi bitirmesi beklenir`

Döngü $i \leftarrow 1$ ***to*** N_{task} **yap**

    $PathList\{i\} \leftarrow$ fetchOutputs($Futures(i)$);

return $PathList$

3.2.1 Nihai Rota Seçimi ve Optimizasyon Kararı

Paralel süreç tamamlandığında, elimizde 6 farklı alt sürüden elde edilen 6 adet aday rota bulunmaktadır. Ancak bu rotaların tamamı geçerli veya optimal olmayabilir. Bazı sürüler engellere takılarak hedefe ulaşamamış olabilir veya hedefe ulaşsa bile yolu gereksiz yere uzatmış olabilir. Bu nedenle, elde edilen çözüm havuzu içerisinden en iyi rotanın seçilmesi için iki aşamalı bir filtreleme uygulanır.

Birinci aşama geçerlilik kontrolüdür. Elde edilen rotanın son noktasının ($\mathbf{p}_{end}$), tanımlanan hedef konuma ($\mathbf{x}_{goal}$) olan Öklid mesafesi kontrol edilir. Eğer bu mesafe belirli bir tolerans değerinden (örneğin 1 km) büyükse, ilgili sürü hedefe ulaşamamış kabul edilir ve çözüm elenir.

İkinci aşama toplam mesafe kontrolüdür. Geçerli rotalar arasında, toplam yol

uzunluğu (L_{total}) en küçük olan aday belirlenir. Yol uzunluğu, rotayı oluşturan ardışık noktalar arasındaki Öklid mesafelerinin toplamıdır:

$$L_{total} = \sum_{k=1}^{M-1} \|\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k\|. \tag{3.29}$$

Tüm alt sürülerin sonuçları karşılaştırılarak, L_{total} değeri en küçük olan rota, sistemin nihai çözüm yolu olarak atanır ('Ana Rota'). Bu seçim mekanizmasının sözde kodu Algoritma 11'da verilmiştir.

Algoritma 11: Nihai Rota Seçimi ve Uzunluk Kontrolü

Girdi: Aday Rota Listesi ($PathList$)

Çıktı: En İyi Rota ($BestPath$)

$MinDistance \leftarrow \infty$;
$BestPath \leftarrow \emptyset$;
Döngü $i \leftarrow 1$ ***to*** N_{task} **yap**
    $CurrentPath \leftarrow PathList\{i\}$;
    Eğer $CurrentPath$ ***is not Empty*** **ise**
        `// 1. Hedefe Varış Kontrolü`
        $DistToGoal \leftarrow \|\mathbf{p}_{end} - \mathbf{x}_{goal}\|$;
        Eğer $DistToGoal \leq 5.0$ **ise**
            `// 2. Toplam Yol Uzunluğunun Hesaplanması`
            $PathLen \leftarrow \sum \|\Delta\mathbf{p}\|$;
            `// 3. En Kısa Yolun Güncellenmesi`
            Eğer $PathLen < MinDistance$ **ise**
                $MinDistance \leftarrow PathLen$;
                $BestPath \leftarrow CurrentPath$;
return $BestPath$

4
BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, önerilen Dağıtık ve Paralel Parçacık Sürü Optimizasyonu tabanlı rota planlama algoritmasının performansı, farklı zorluk seviyelerine sahip senaryolar üzerinden test edilmiştir. Simülasyonlar, algoritmanın engelsiz ortamdaki temel seyrüsefer yeteneğinden başlayarak, karmaşık engeller ve radar tehditleri altındaki kaçış manevralarına kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Elde edilen görsel ve sayısal sonuçlar, geliştirilen maliyet fonksiyonlarının ve manuel hareket mekanizmasının etkinliğini doğrulamak amacıyla analiz edilmiştir. Buna ek olarak, algoritmanın karmaşık topoğrafyalarda ki başarısını ve yerel minimum noktalarından kurtulma kabiliyetini somut verilerle ortaya koymak adına standart PSO algoritması ile karşılaştırmalı testler gerçekleştirilmiştir.

4.1 Simülasyon Ortamının Yapılandırılması

Tüm benzetim çalışmaları, M4 işlemciye sahip bir Macbook Air üzerinde, MATLAB® ortamı ve Parallel Computing Toolbox altyapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Harita ortamı, gerçekçi bir araziyi simüle etmek amacıyla X ve Y eksenlerinde ayrık ızgara (grid) yapısında oluşturulmuştur. Arazi topoğrafyası dağları tek bir yüzey oluşturacak bir yapıda tasarlanmıştır.

Algoritmanın kararlılığını test etmek için her senaryoda sabit popülasyon büyüklüğü ve iterasyon sınırları kullanılmıştır. DPSO mimarisinde paralel olarak çalışan 6 adet alt sürünün her biri için geçerli olan temel PSO parametreleri Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Simülasyon ve PSO Algoritma Parametreleri

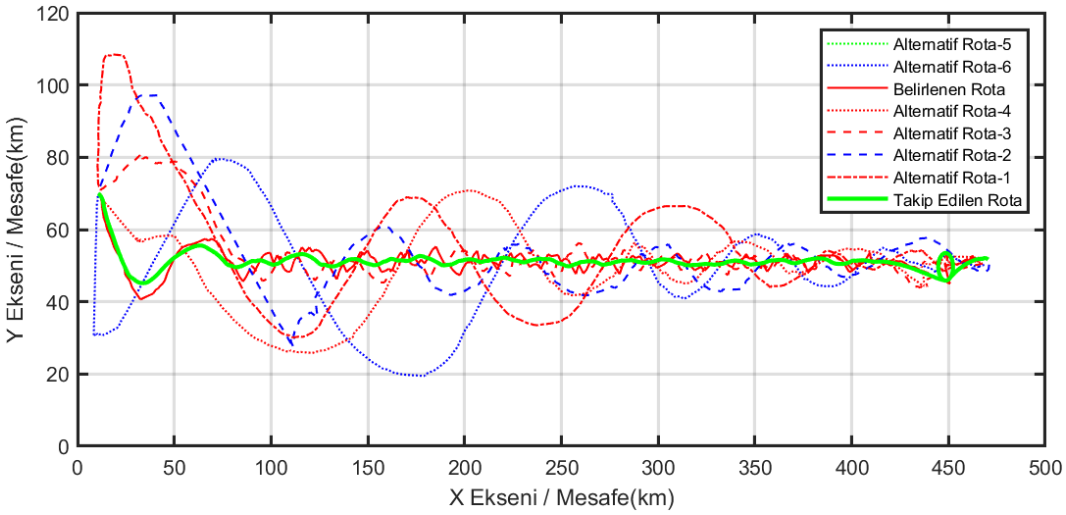
Parametre	**Sembol**	**Değer**
Popülasyon Büyüklüğü (Her Alt Sürü)	N	100
Maksimum İterasyon	T_{max}	1000
Paralel Görev Sayısı	N_{task}	6
Bireysel Öğrenme Katsayısı	c_1	2.5
Sosyal Öğrenme Katsayısı	c_2	0.5
Atalet Ağırlığı	w	0.7
Maksimum Hız Sınırı	V_{max}	2.0 m/s
Harita Boyutları	X, Y, Z	$500 \times 120 \times 20$ km
Güvenlik Marjı	Δh	0.5 km
Maksimum Hava Aracı İrtifası	$h_{max}^{aircraft}$	6.5 km
Alçalma Mesafesi	R_{descent}	50 km

4.2 Senaryo 1: Engelsiz Uçuş ve Temel Navigasyon

İlk senaryoda, önerilen algoritmanın herhangi bir engel veya tehdit unsuru bulunmayan "ideal" koşullar altındaki davranışı incelenmiştir. Bu testin temel amacı; mesafe maliyet fonksiyonunun (J_L) ve irtifa yönetim mekanizmasının (J_H) doğruluğunu, diğer cezalandırıcı faktörler (J_C, J_R) devreye girmeden izole bir şekilde analiz etmektir.

Başlangıç noktası $\mathbf{x}_{start} = [10, 70, 2]$ ve hedef noktası $\mathbf{x}_{goal} = [472, 51, 2]$ olarak belirlenmiştir. Ortamda herhangi bir fiziksel engel veya radar bulunmadığı için, beklenen ideal davranış, İHA'nın iki nokta arasındaki en kısa Öklid doğrusunu takip etmesi ve tanımlanan seyir irtifasını korumasıdır.

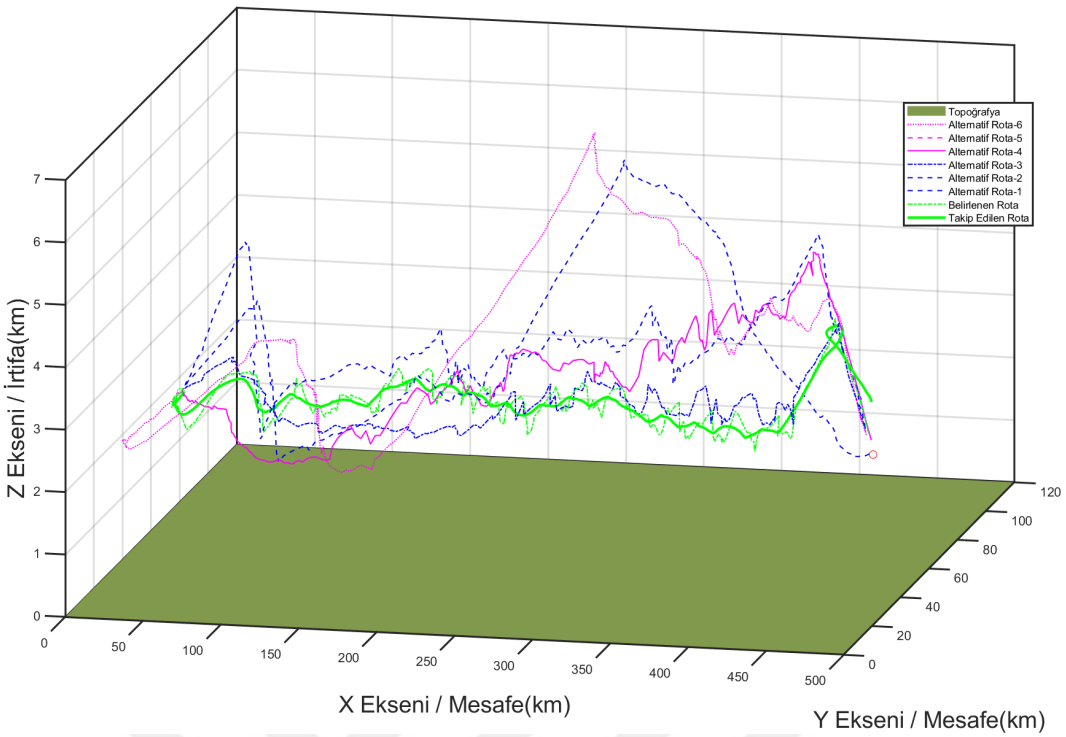
Şekil 4.1'de sunulan X-Y düzlemi hareket görünümü incelendiğinde, noktalı çizgiler önerilen rotaları, kırmızı çizgi belirlenen rotayı ve yeşil çizgi hava aracının hareket rotasını göstermektedir. DPSO algoritmasının başlangıçta açısal sektörlere yayılarak geniş bir arama yaptığı, ancak engelsiz ortamı tespit eden sürülerin hızla merkez hatta yani en kısa yola yakınsadığı görülmektedir. Paralel çalışan alt sürülerden elde edilen nihai rota, başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki ideal diyagonal hat üzerinde ilerlemiştir.



Şekil 4.1 Engelsiz Uçuş Senaryosu X-Y Ekseni Hareket Görünümü

Şekil 4.1 incelendiğinde, özellikle dağıtık yapının dış çeperlerinde görev yapan alt sürülerin, merkez hatta yakın olan sürülere kıyasla daha yüksek genlikli sinüzoidal salınımlar sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, PSO algoritmasının hareket dinamiği ve "Yanal Hız Bileşeni" ile açıklanabilir.

Merkez sektörde ilerleyen parçacıkların hareket vektörü ağırlıklı olarak hedefe doğru (x-ekseni) olduğundan, yanal (y-ekseni) hız değişimleri minimum düzeydedir. Ancak dış sektörlerdeki parçacıklar, hem ileri gitmek hem de açısal konumlarını korumak veya hedefe yönelmek için daha yüksek bir yanal hıza ihtiyaç duyarlar. PSO algoritması, matematiksel olarak sönümlü bir yay-kütle sistemi gibi davrandığından; yüksek yanal hıza sahip parçacıklar, anlık hedef doğrultusuna ulaştıklarında ataletleri sebebiyle duramaz ve hedef hattını geçerek **aşma (overshoot)** yaparlar. Bu durum, dış sürülerde daha belirgin bir dalgalanma olarak yansımaktadır.



Şekil 4.2 Engelsiz Uçuş Senaryosu 3 Boyutlu Rota ve İrtifa Profili

Şekil 4.2 ile verilen 3D görünüm ise algoritmanın irtifa yönetimi performansını ortaya koymaktadır. Şekilde mavi ve magenta renkli çizgiler alternatif rotaları gösterirken, yeşil renkli olan gösterimler tercih ve takip edilen rotayı gösterir. Tercih edilen rota profili incelendiğinde; İHA'nın kalkıştan sonra herhangi bir irtifa şartı aktif olmadığından kalkış irtifasında devam ettiği görülmüştür. Alçalma alanına geldiğinde ise hedef irtida bulunulan rotadan daha yukarıda olduğundan dolayı İHA yükselmeye başlamış **aşma (overshoot)** yaparak hedef irtifaya alçalmıştır.

Bu senaryodan elde edilen sonuçlar, algoritmanın temel güdümleme fonksiyonlarının hatasız çalıştığını, gereksiz manevralardan kaçınarak enerji verimliliği açısından optimuma yakın bir çözüm ürettiğini ve yanal dinamiklerin beklendiği gibi davrandığını kanıtlamaktadır.

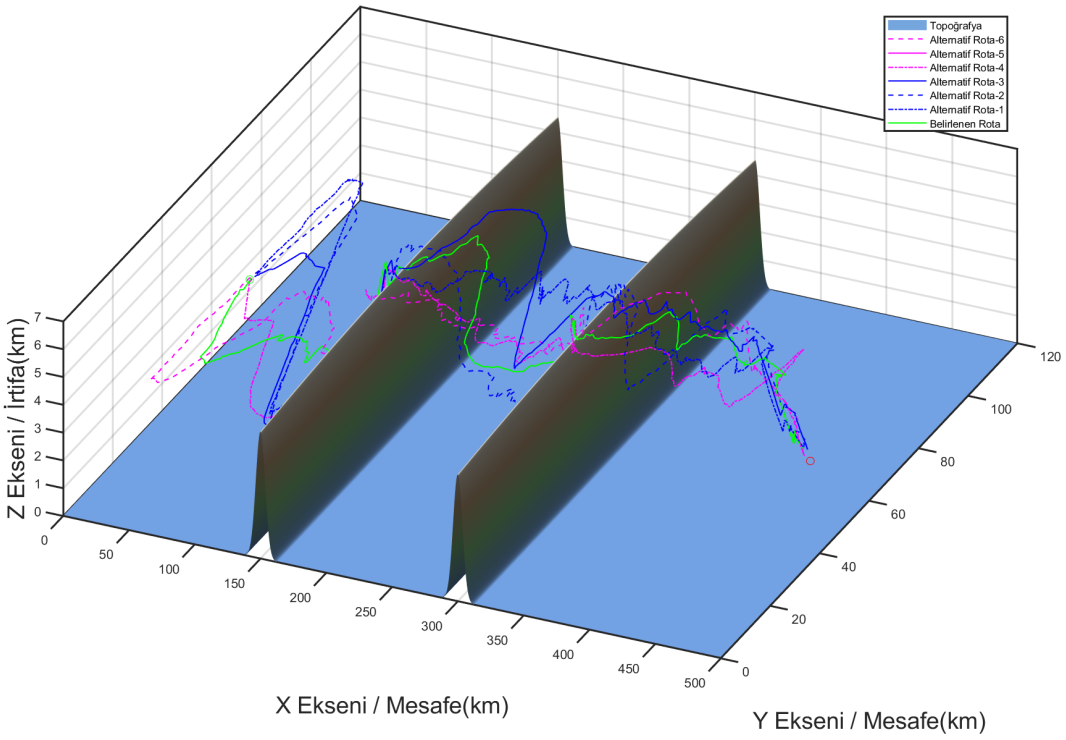
4.3 Senaryo 2: İrtifa Engelli ve Sıra Dağlı Arazi Uçuşu

İkinci senaryoda, DPSO algoritmasının dikey düzlemdeki kaçınma manevraları ve arazi takibi yeteneği test edilmiştir. Bu senaryonun temel amacı; algoritmanın Z eksenindeki dinamik irtifa değişimlerine tepkisini ölçmek ve engel geçişlerinde güvenli irtifa marjını koruyup korumadığını doğrulamaktır.

Simülasyon ortamında, başlangıç noktası $\mathbf{x}_{start} = [10, 70, 2]$ ve hedef noktası $\mathbf{x}_{goal} = [472, 51, 2]$ olarak belirlenmiştir. İHA'nın rotası üzerinde Y ekseni boyunca set oluşturacak şekilde uzanan ve "sıra dağ" formunu simüle eden iki adet yapay yükselti tanımlanmıştır:

- **Engel 1:** $x = 150$ km konumunda, genişliği 200 km ve yüksekliği 5 km.
- **Engel 2:** $x = 300$ km konumunda, genişliği 200 km ve yüksekliği 5 km.

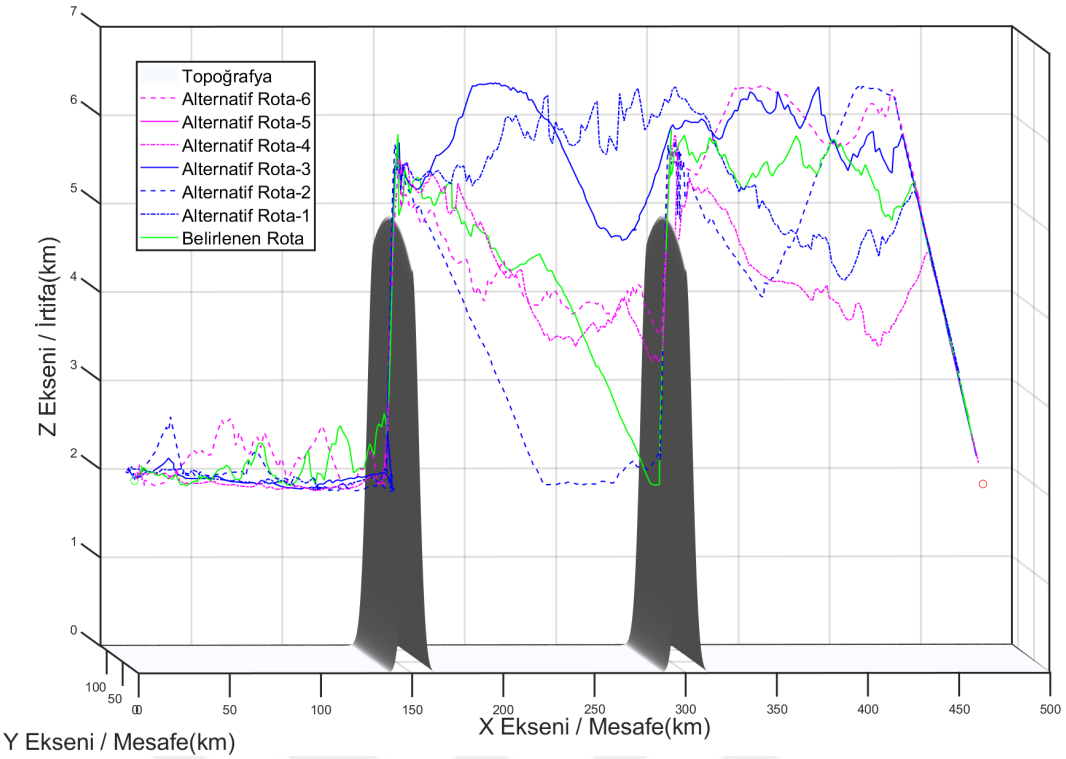
Bu engeller, İHA'yı rota boyunca dikey eksende tırmanmaya zorlayacak şekilde konumlandırılmıştır.



Şekil 4.3 İrtifa Engelli Senaryo 3 Boyutlu Rota Görünümü

Şekil 4.3 ile verilen 3D görünüm ise algoritmanın irtifa yönetimi performansını ortaya koymaktadır. Şekilde bulunan mavi ve magenta renkli çizgiler alternatif rotaları, yeşil çizgi tercih edilen rotayı göstermektedir. 3 boyutlu izometrik görünüm incelendiğinde; İHA'nın dağdan alçalışlar sırasında tercih edilen rotada yatay eksende (X-Y) kazandığı hız doğrultusunda ideal rotadan uzaklaşarak dalgalandığı görülmüştür. Bu PSO'nun rastgelesel yapısından kaynaklı olarak doğal bir davranıştır. Alternatif rotaların bazılarında ise bu davranış görülmemiştir.

Algoritmanın dikey düzlemdeki hassasiyeti ve arazi takip yeteneği ise Şekil 4.4 ile verilen irtifa profil grafiğinde detaylıca gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Rota Boyunca İrtifa Değişimi ve Engel Aşma Profili

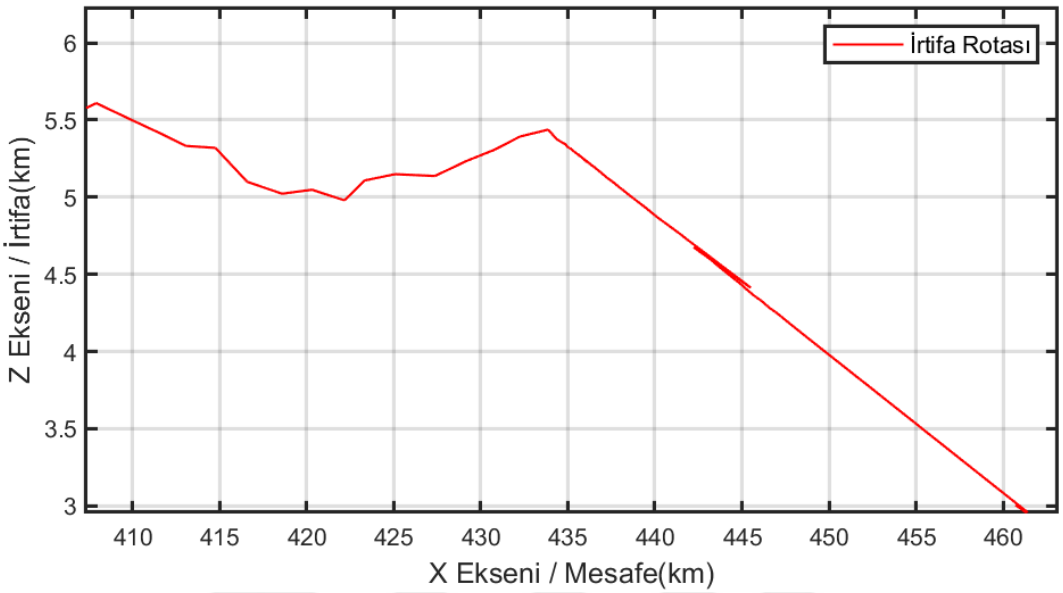
İrtifa grafiği incelendiğinde şu davranışlar gözlemlenmiştir:

1. **Tespit ve Tırmanma:** İHA, $x = 150$ ve $x = 300$ birim bantlarındaki engellere yaklaşırken, engel ile temas etmeden hemen önce tırmanışa geçmiş ve engeli aşmıştır.

2. **Maksimum İrtifa Noktası Ulaşma:** İHA 1. engel üzerinde yükselirken hızlanmış ve maksimum irtifaya ulaşmıştır. Maksimum irtifada aldığı ceza puanı kaynaklı irtifa azalış trendine girmiştir. Fakat 2. engel üzerinden yükselirken maksimum irtifaya ulaşmasına rağmen alçalış mesafesine kadar bulunduğu irtifada dalgalanarak hareket etmiştir. Alçalma yönünde bir hız birikimi yapmamıştır.

Önerilen seyrüsefer modelinde, alçalma bölgesine ($R_{descent}$) ulaşılana kadar olan seyir safhasında katı bir irtifa takibi yerine yalnızca maksimum tavan irtifası (z_{max}) kısıtı uygulandığından, operasyonel sınırlar dahilindeki irtifa değişimlerine müsaade edilmiştir. Bu esneklik, hava aracının güzergah üzerindeki engelleri maksimum irtifa izni dahilinde dikey manevralarla aşmasına olanak tanıyan, hava aracı dinamiğine uygun doğal bir engel sakınma davranışı olarak değerlendirilmiştir.

Buna karşın, alçalma bölgesine girilmesiyle birlikte uçuş rejimi değişmekte ve hedef irtifaya (z_{goal}) güvenli erişim sağlamak amacıyla irtifa lineer bir fonksiyonla kademeli olarak azaltılmaktadır. Bahsi geçen alçalma dinamiği ve yaklaşma profili Şekil 4.5 üzerinde gösterilmiştir.



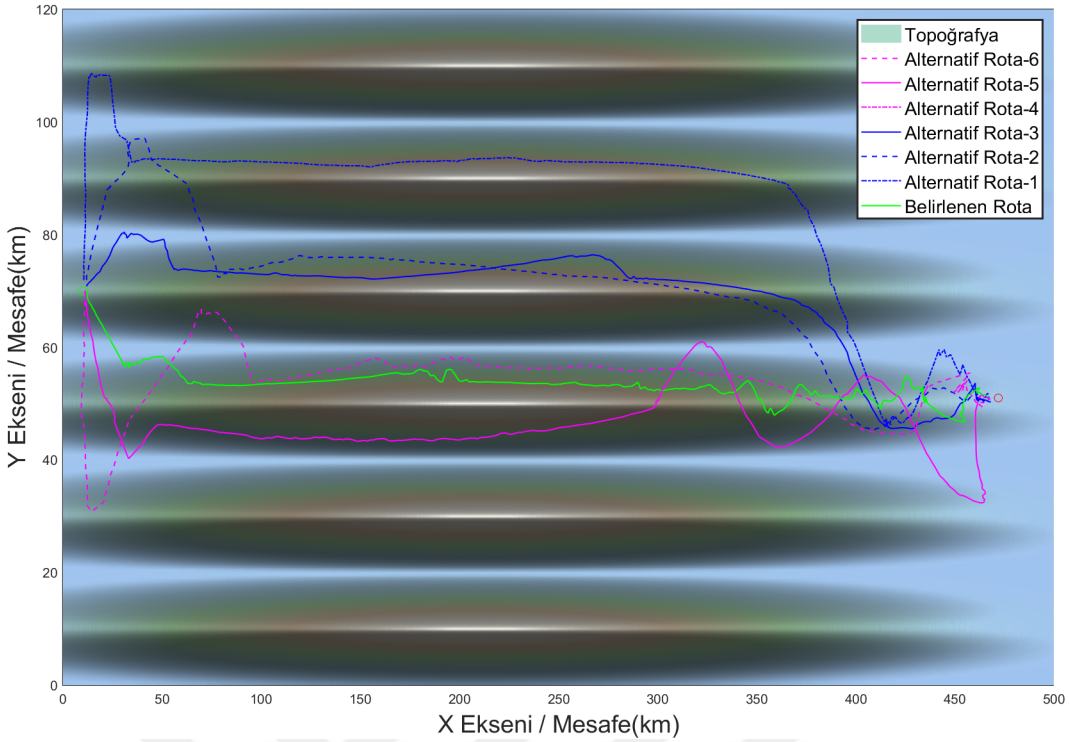
Şekil 4.5 Rota Boyunca İrtifa Değişimi ve Alçalma İrtifa Yönetimi Profili

4.4 Senaryo 3: Açısal Alan Kısıtının Çoklu Güzergah Keşfine Etkisi

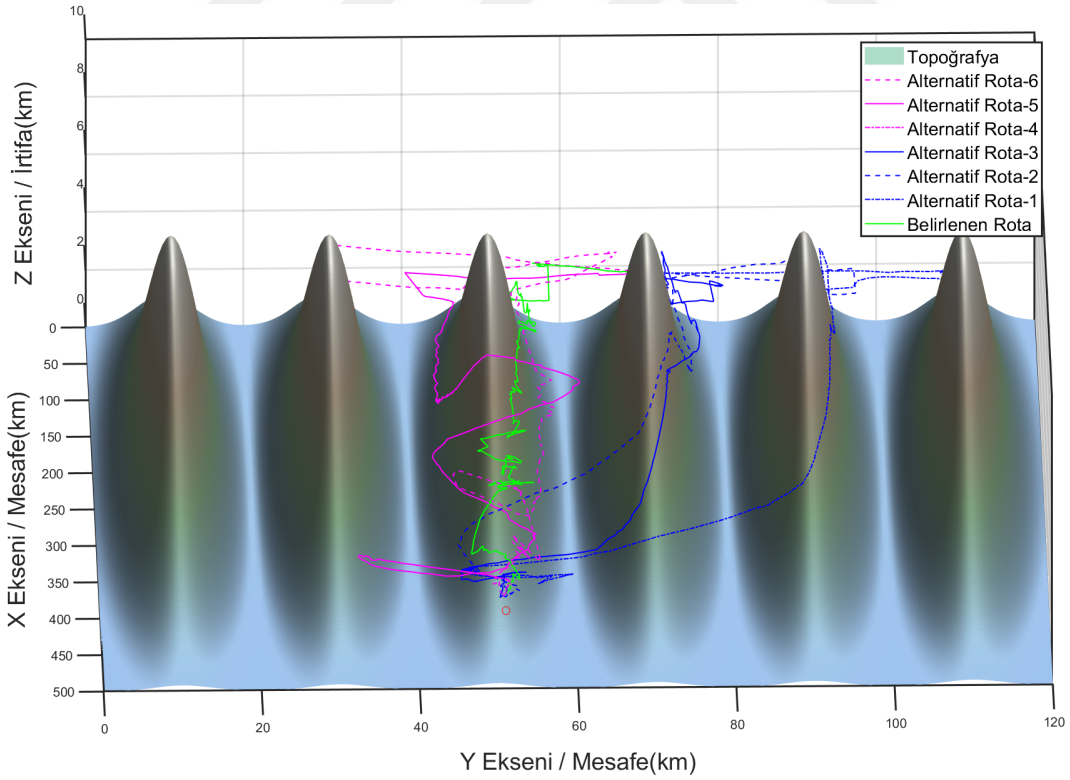
Üçüncü senaryoda, DPSO mimarisinin "Yönlendirilmiş Arama" mekanizmasının, topografik engellerin bulunduğu arazilerde farklı geçiş koridorlarını (vadileri) keşfetme yeteneği test edilmiştir. Bu senaryonun amacı; algoritmanın başlangıçta uyguladığı açısal dağılım sayesinde, tek bir rotaya saplanıp kalmak yerine, arazi üzerindeki alternatif geçiş güzergahlarını eş zamanlı olarak değerlendirip değerlendiremediğini doğrulamaktır.

Test ortamında, başlangıç noktası $\mathbf{x}_{start} = [10, 70, 2]$ ve hedef noktası $\mathbf{x}_{goal} = [472, 51, 2]$ olarak belirlenmiştir. Arazi yapısı, X ekseni boyunca birbirine paralel uzanan dağ sırtları ve bu sırtlar arasında kalan vadi yataklarından oluşmaktadır.

Şekil 4.6 ile sunulan X-Y düzlemi haritası, bir yükselti haritası niteliğindedir. Haritada beyaz ve mavi bölgeler alçak irtifalı vadileri, yeşil ve kahverengi bölgeler ise yükseltinin arttığı dağ sırtlarını temsil etmektedir. Görselde yer alan mavi ve magenta çizgiler paralel çalışan alt sürülerin önerdiği aday rotaları, yeşil çizgi ise maliyet fonksiyonu açısından en uygun bulunan nihai rotayı göstermektedir. Ayrıca Şekil 4.7 ile PSO sürülerinin hareket rotaları 3 boyutlu olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Paralel Dağ Sırtları Arasında Çoklu Rota Keşfi (X-Y Düzlemi)



Şekil 4.7 Paralel Dağ Sırtları Arasında Çoklu Rota Keşfi

Görsel analiz edildiğinde DPSO algoritmasının şu davranışları sergilediği tespit edilmiştir:

1. **Topografik Keşif ve Vadi Kullanımı:** Mavi ve magenta çizgiler incelendiğinde; başlangıçta farklı açılara yönlendirilen alt sürülerin, arazideki dağ sırtlarına (kahverengi bölgeler) tırmanmak yerine, doğal geçiş koridoru olan paralel vadilere yönelerek x ekseni boyunca hareket ettikleri ve vadiyi kullandıkları görülmektedir. Engeli aşmak için herhangi bir irtifa değişimi yapmayarak engel sonrasında hedefe yönelim göstermektedirler. Ayrıca açısal kısıt mekanizması, sürüleri tek bir vadiye yönlendirmek yerine, y ekseni boyunca bulunan alternatif vadi yataklarını taramaya teşvik etmiştir.

2. **Alternatif Rota Havuzu:** Algoritma, sadece hedef doğrultusundaki merkezi vadiyi değil, aynı zamanda komşu vadileri de potansiyel çözüm olarak değerlendirmiştir. Mavi ve magenta rotaların dağılımı, algoritmanın çözüm uzayındaki yerel minimumlara (örneğin bir vadinin sonu kapalı olsaydı) karşı dirençli olduğunu, çünkü eş zamanlı olarak diğer vadilerde de arama yapan ajanlarının bulunduğunu kanıtlamaktadır.

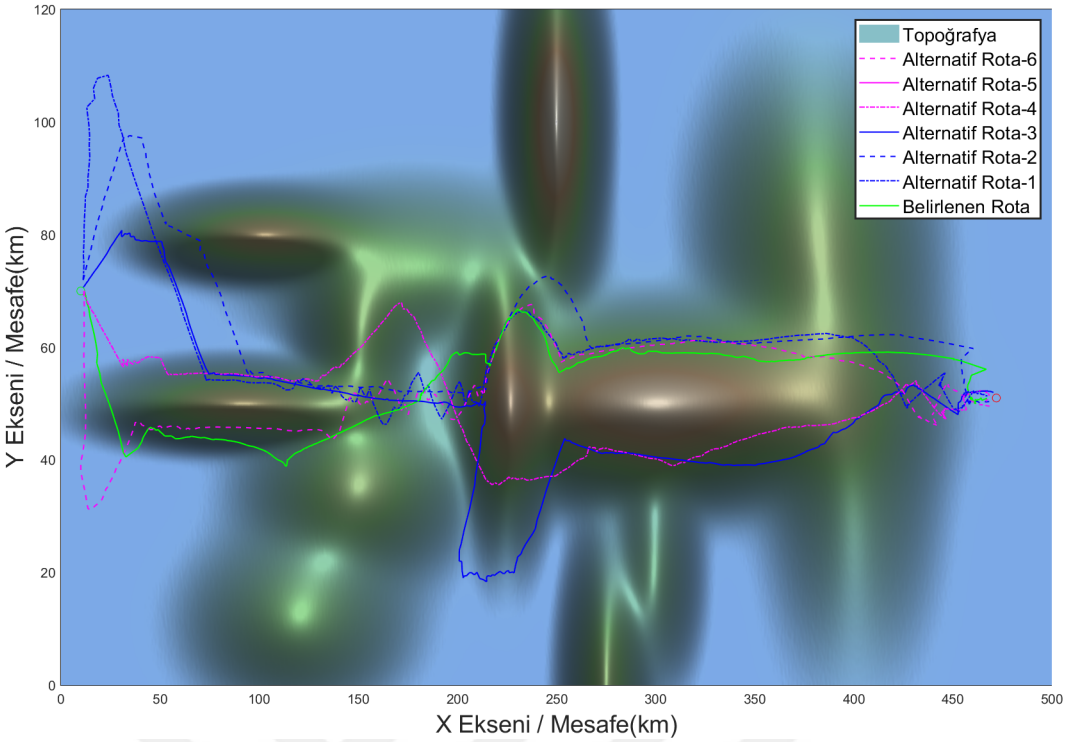
3. **Global Optimum Seçimi:** Yeşil ile gösterilen nihai rota, adaylar havuzu içerisinden en düşük maliyetli (mesafe açısından) çözüm olarak seçilmiştir. Seçilen rotanın, arazi topolojisine tam uyum sağlayarak düzgün bir şekilde vadi yatağını takip ettiği görülmektedir.

Sonuç olarak bu senaryo; DPSO'nun açısal yönlendirme yeteneğinin, engebeli arazilerde "en uygun vadiyi bulma" ve "araziye uygun sürüş" konusunda klasik yöntemlere göre daha geniş bir çözüm uzayı taradığını doğrulamaktadır.

4.5 Senaryo 4: Gerçek Topoğrafya ve Karmaşık Arazide Rota Optimizasyonu

Bu bölümde, DPSO algoritmasının performansı; rastgele yükselti değişimlerine sahip, yapılandırılmamış ve karmaşık bir doğal topoğrafya üzerinde test edilmiştir. Çalışmanın bu aşamasındaki temel amaç, algoritmanın çoklu tepe ve vadi yapılarının bulunduğu heterojen bir arazide, operatör müdahalesi olmaksızın en uygun uçuş koridorunu tespit edebildiğini doğrulamaktır.

Test ortamı, farklı taban genişliklerine ve değişken tepe yüksekliklerine sahip dağ kütleleri ile bu kütleler arasında oluşan düzensiz vadi yataklarından meydana gelmektedir. Haritada renk skalası yükselti değerlerini temsil etmekte olup; mavi alanlar deniz seviyesine yakın düzlükleri, yeşil ve kahverengi alanlar yamaçları, koyu bölgeler ise yüksek irtifalı zirve noktalarını göstermektedir.



Şekil 4.8 Karmaşık Doğal Topoğrafyada DPSO Rota Planlaması (X-Y Düzlemi)

Şekil 4.8 üzerinde sunulan X-Y düzlemi yörünge izleri ve nihai rota, algoritmanın maliyet fonksiyonu bileşenleri arasındaki dengeyi nasıl kurduğunu göstermektedir. Yapılan analizde şu kritik davranışlar gözlemlenmiştir:

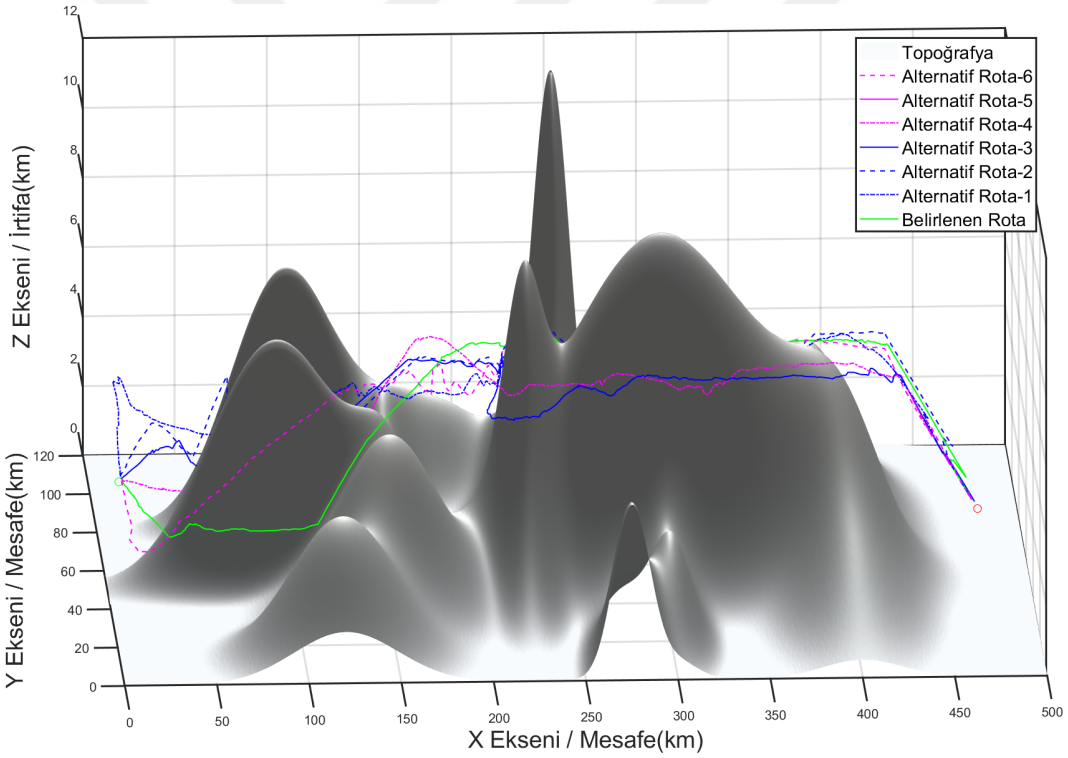
1. **Maksimum İrtifa Kısıtı ve Stokastik Engel Aşma:** Algoritmanın çalışma mantığı gereği, İHA hedefe belirli bir mesafeden ($R_{descent}$) daha uzaktayken, herhangi bir "ideal irtifa" zorlamasına maruz bırakılmamıştır. Bu bölgede uygulanan tek kısıt, operasyonel tavan irtifasıdır (Z_{max}). Görseldeki dağlık bölgelerde İHA'nın rotasını değiştirmesi veya yükselmesi, bir irtifa cezasından kaçmak için değil, tamamen **çarpışma riskini** (J_C) **önlemek** ve **toplam yol uzunluğunu** (J_L) **kısaltmak** içindir. Engeli aşma stratejisi (üzerinden tırmanma veya etrafından dolaşma), önceden tanımlanmış katı kurallarla değil, **parçacıkların rastgele hareket kabiliyeti** ve arama uzayını taraması sonucunda, maliyeti en aza indiren seçeneğin kendiliğinden belirmesiyle oluşturulmuştur.

2. **Arazi Uyumu ve Hibrit Geçiş Profili:** Elde edilen rota incelendiğinde, algoritmanın sadece derin vadileri takip etmek gibi kısıtlayıcı bir davranış sergilemediği görülmektedir. Sistem, irtifa değişimini "yasaklı bir bölge" olarak görmediği için; yolu yatayda aşırı uzatmak yerine, limitler dahilinde kontrollü irtifa kazanarak engelleri aşmayı tercih etmiştir. Bu durum,

DPSO'nun arazi eğimlerini okuyarak hem yatay hem de dikey manevraları birleştiren **hibrit bir geçiş profili** oluşturduğunu ve toplam yol uzunluğunu optimize etmek için irtifayı bir araç olarak kullandığını göstermektedir.

3. **Geniş Alan Taraması:** Mavi ve magenta renkli çizgilerle ifade edilen alt sürülerin hareketleri, DPSO mimarisinin arama uzayını geniş bir yelpazede taradığını göstermektedir. Algoritmada kullanılan anlık hızlanma ve açısal yönlendirme mekanizmaları sayesinde sürüler sadece ana vadiye sıkışmamış, alternatif güzergahları da test etmiştir. Sonuçta, bu seçenekler arasından toplam maliyeti en düşük olan ve hedefe başarılı bir şekilde ulaşan yeşil çizgi ile gösterilen rota "Optimum" olarak seçilmiştir.

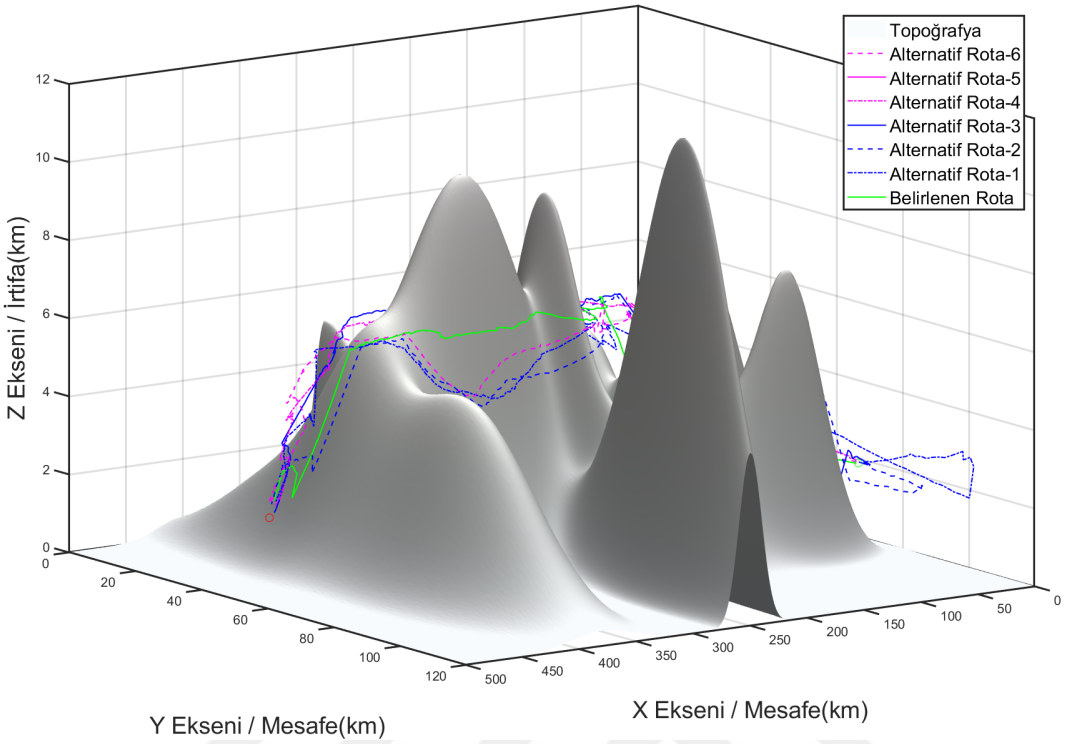
Algoritmanın dikey düzlemdeki davranışı, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 ile sunulan farklı açılara sahip 3 boyutlu görsellerle detaylandırılmıştır.



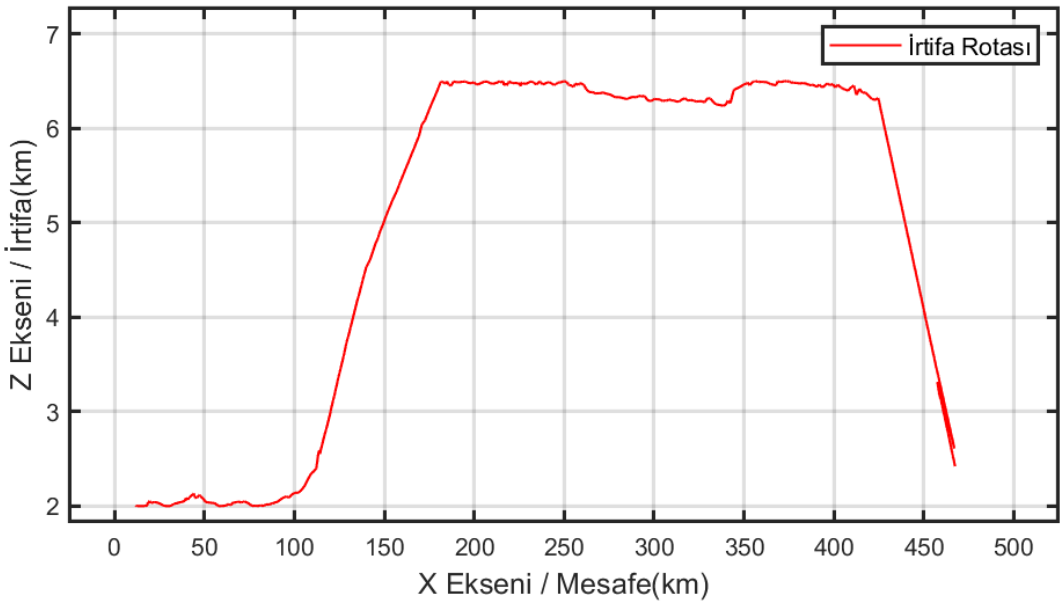
Şekil 4.9 Doğal Topoğrafya Üzerinde Rota Planlaması (3D Görünüm - Açı 1)

Üç boyutlu analizler incelendiğinde; İHA'nın seyir aşamasında karşılaştığı yükseltileri, yalnızca maksimum irtifa sınırını (Z_{max}) referans alarak aştığı görülmektedir. Bu aşamada algoritma, aracı sabit bir irtifaya zorlamadığından, İHA arazi eğimiyle uyumlu doğal bir tırmanma ve süzülme profili sergilemiştir. Ancak hedef bölgesine (alçalma alanı) girilmesiyle birlikte serbest seyir rejimi sona ermiş ve hedefe güvenli inişi sağlayan **lineer alçalma cezası** devreye girmiştir. Şekil 4.11

ile gösterilen irtifa grafiğindeki kararlı alçalma profili, bu mekanizmanın yaklaşma safhasında etkin bir şekilde çalıştığını doğrulamaktadır.



Şekil 4.10 Doğal Topoğrafya Üzerinde Rota Planlaması (3D Görünüm - Açı 2)



Şekil 4.11 Doğal Topoğrafya Üzerinde Rota Planlaması - İrtifa Yönetimi

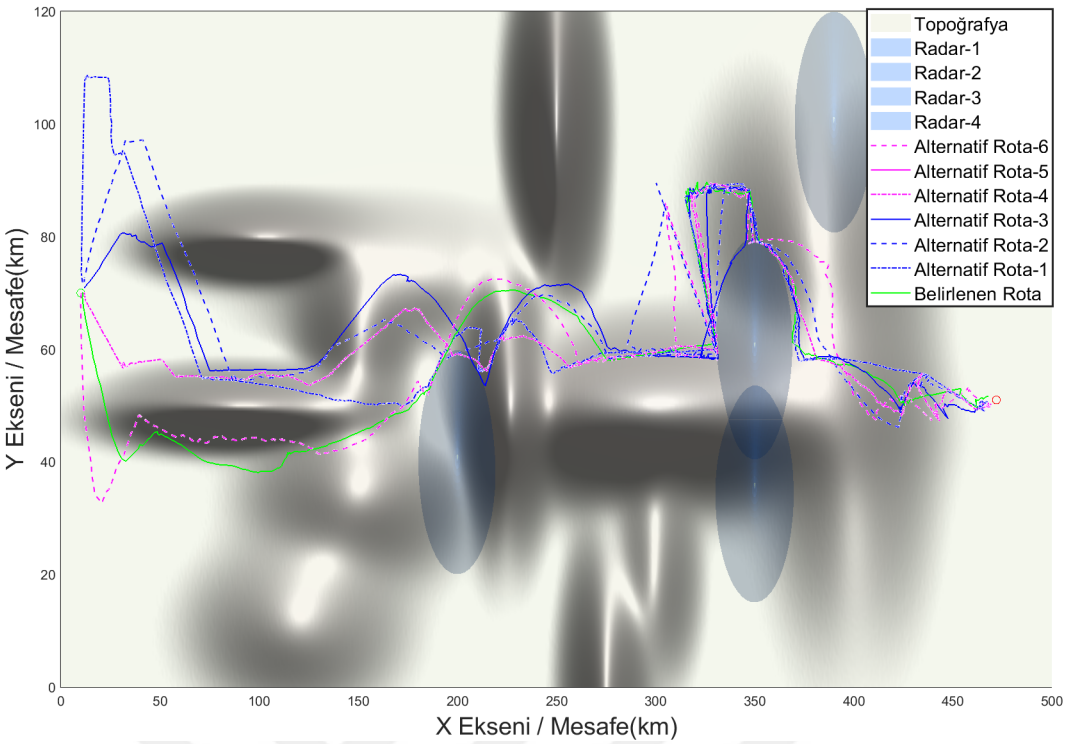
4.6 Senaryo 5: Karmaşık Tehdit Ortamında Rekürsif Rota Planlama ve Doğrulama

Bu çalışmanın nihai doğrulama aşaması olan beşinci senaryoda, önerilen DPSO mimarisinin performansı; doğal topoğrafya yükseltileri ve aktif radar tehdit bölgelerinin bir arada bulunduğu bütünleşik bir ortamda değerlendirilmiştir. Bu senaryonun temel amacı; başlangıç alanı dışında herhangi bir yapay sınırın bulunmadığı bu serbest ortamda, sürünün yerel minimum tuzaklarına düşmesi durumunda geliştirilen **"Manuel Hareket Mekanizması"**nın otonom bir karar verici gibi davranarak süreci **rekürsif (özyinelemeli)** bir yaklaşımla nasıl kurtardığını doğrulamaktır.

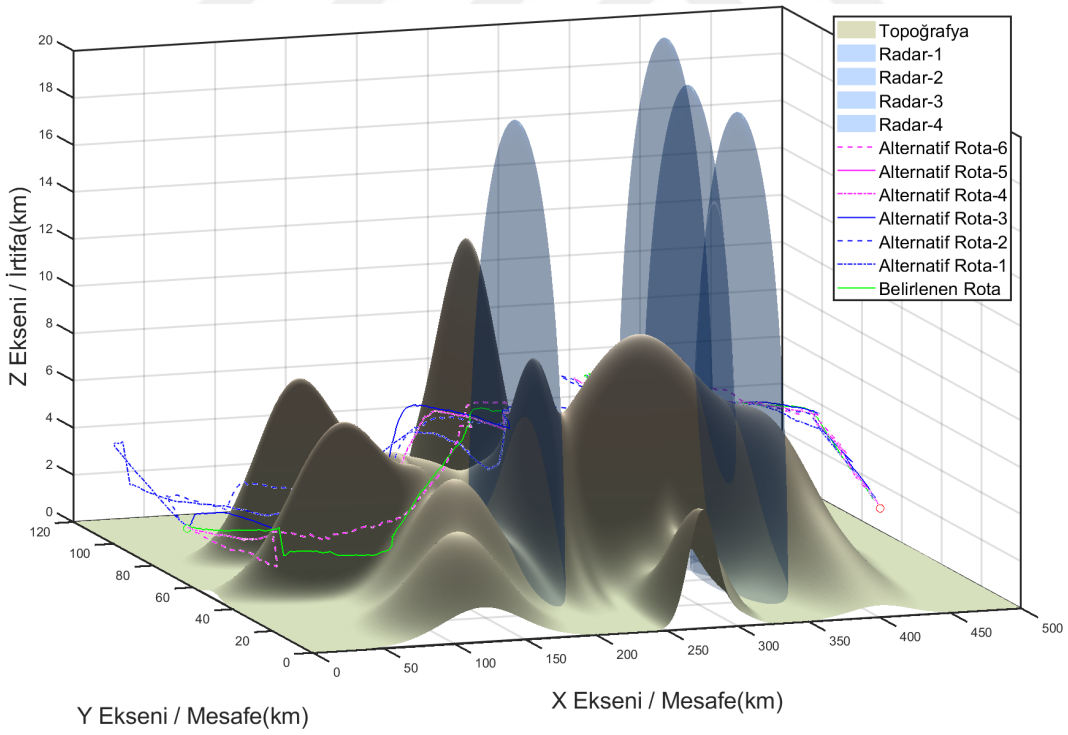
Test ortamı, İHA'nın karşılaşabileceği en zorlu operasyonel koşulları temsil edecek şekilde kurgulanmıştır. Ortamda, aşılması yüksek irtifa maliyeti gerektiren ve harita üzerinde kahverengi ile yeşil tonlarla temsil edilen doğal dağ kütleleri bulunmaktadır. Buna ek olarak, geçişi kesin olarak yasaklayan ve şeffaf mavi küresel yapılarla görselleştirilen aktif radar kapsama alanları stratejik noktalara yerleştirilmiştir. Başlangıç ve hedef noktaları, sürüyü kasıtlı olarak dağlar ve radar kubbeleri arasında kalan, geçişi zor ve "çıkmaz sokak" niteliğindeki bir dar boğaza yönlendirecek şekilde seçilmiştir.

Simülasyon başlatıldığında, paralel alt sürüler arama uzayını taramaya başlamış, ancak rotanın orta kesiminde karşılaşılan yoğun engel ve radar bloğu nedeniyle ilerleme durmuş ve optimizasyon süreci yerel minimumda tıkanma noktasına gelmiştir. Global en iyi çözümün (G_{best}) belirli bir süre değişmediğini algılayan mekanizma, algoritmanın standart akışını keserek rekürsif olarak çalışan manuel hareket yapısını devreye sokmuştur. Bu süreç, problemi ara hedeflere bölerek sürüyü sıkışıklık bölgesinin dışına yönlendirmiş ve ardından tekrar ana hedefe yönlendirmiştir.

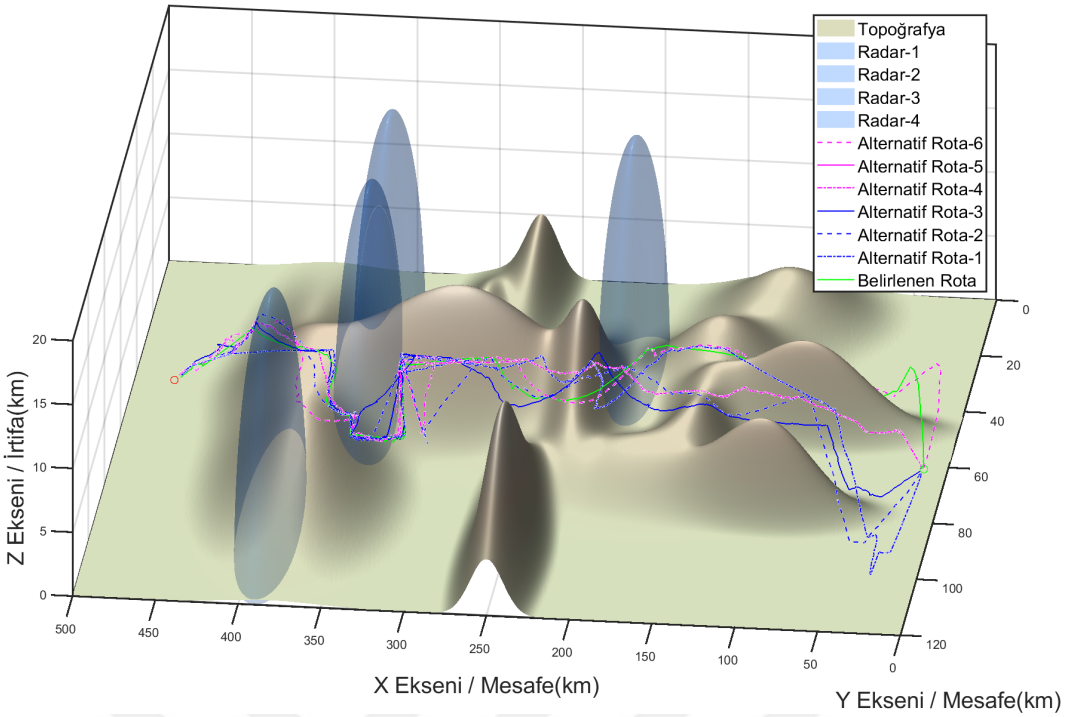
Şekil 4.12 ile sunulan X-Y düzlemi üstten görünümü, algoritmanın tehdit algısını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Görselde yer alan şeffaf mavi daireler aktif radar tehdit bölgelerini, gri çizgiler alt sürülerin denediği alternatif rotaları ve sarı çizgi ise seçilen nihai optimum rotayı simgelemektedir. Dikkatlice incelendiğinde, yeşil rotanın radar kapsam alanlarına kesinlikle girmediği, radar ve dağ kütleleri arasında kalan güvenli koridorları kullanarak ilerlediği görülmektedir. Özellikle haritanın orta kısmındaki yoğun tehdit bölgesinde, rotanın keskin bir manevra ile engellerin etrafından dolaşması, rekürsif kurtarma mekanizmasının başarısını kanıtlamaktadır.



Şekil 4.12 Karmaşık Tehdit Ortamında Rota Planlaması (X-Y Düzlemi)



Şekil 4.13 Radar ve Doğal Engeller Arasında Rekürsif Kurtarma Manevrası (Açı 1)

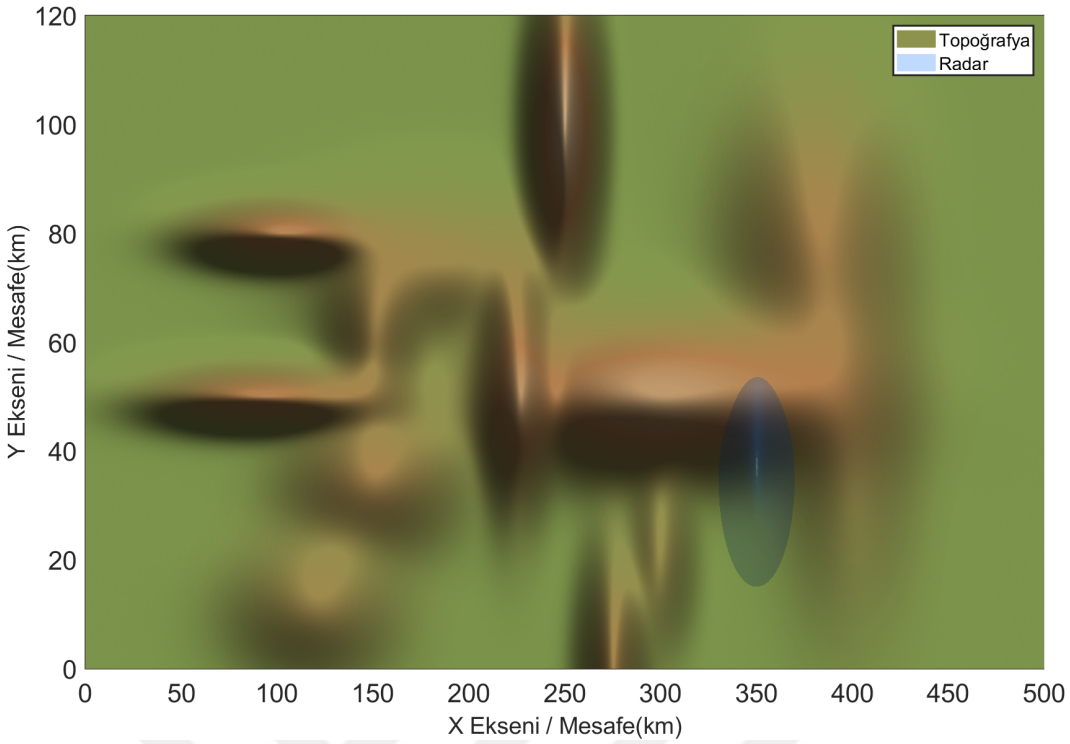


Şekil 4.14 Radar ve Doğal Engeller Arasında Rekürsif Kurtarma Manevrası (Açı 2)

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 ile sunulan 3 boyutlu görünümler ise bu manevranın topoğrafya üzerindeki başarısını teyit etmektedir. Belirlenen rota, sadece yatayda radarlardan kaçmakla kalmamış, aynı zamanda dikeyde dağ kütlelerinin zirve noktalarından sakınarak arazi eğimine uygun optimum bir uçuş profili çizmiştir. Bu sonuçlar, DPSO mimarisinin en karmaşık ve çok kriterli ortamlarda dahi operatör müdahalesi olmadan, hem güvenli hem de maliyet-etkin bir rota oluşturabildiğini doğrulamaktadır.

4.7 PSO ve DPSO Performans Analizi

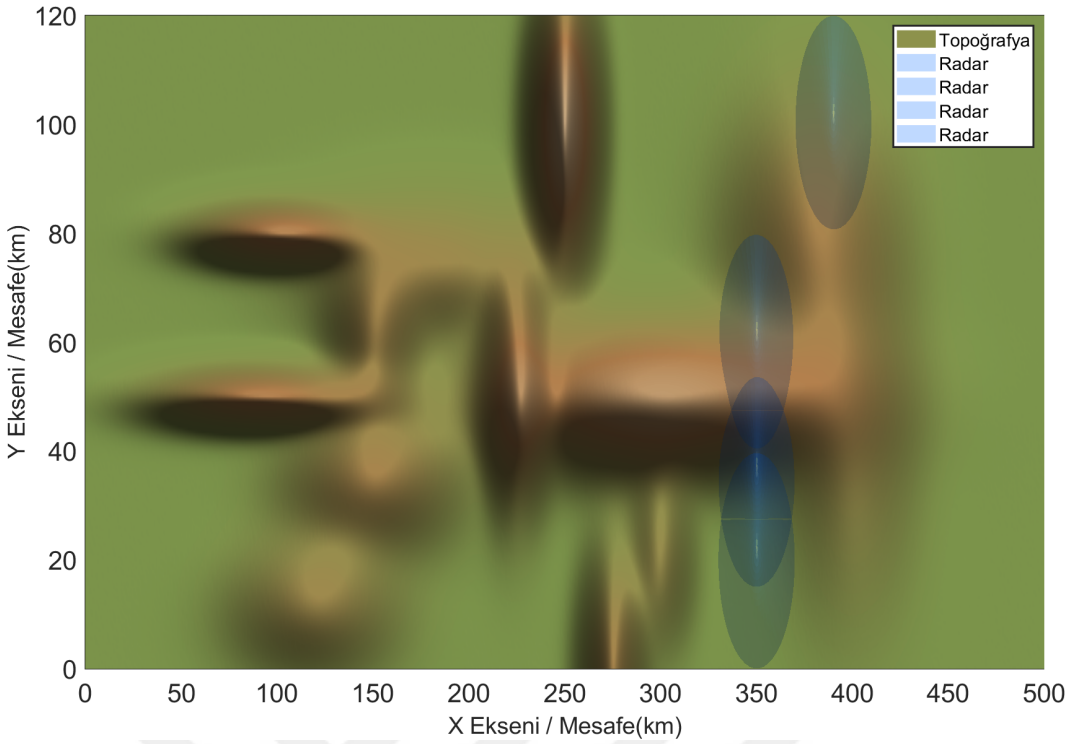
Bu bölümde, önerilen DPSO algoritmasının operasyonel başarısı ve hesaplama verimliliği, literatürde temel alınan standart PSO algoritması ile karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Analizler; algoritmaların dinamik arama kapasitelerini, karmaşık topoğrafyalarda yerel minimum noktalarından kurtulma yeteneklerini ve hesaplama maliyetlerini ölçmek üzere tasarlanmıştır. Algoritmaların stokastik yapısından kaynaklanabilecek sapmaları minimize etmek amacıyla, her test senaryosu için 50 adet bağımsız simülasyon koşturulmuş ve elde edilen veriler istatistiksel olarak anlamlandırılmıştır.



Şekil 4.15 Yerel Minimum Senaryosu Topoğrafik Yapısı

Performans değerlendirme süreci, artan zorluk seviyelerine sahip üç ana senaryo üzerinden yürütülmüştür. İlk aşamada, algoritmaların ideal koşullardaki baz performansını belirlemek amacıyla engelsiz bir çalışma alanı kullanılmıştır. İkinci aşamada, Şekil 4.15 üzerinde gösterilen ve iki vadiden oluşan topoğrafya kullanılarak algoritmaların yerel minimum noktalarına karşı direnci test edilmiştir.

Çalışmanın en kritik aşamasını teşkil eden üçüncü senaryoda ise Şekil 4.16 ile sunulan; bir ucu kapalı vadi yapısı ve yerel minimum noktasının bir arada bulunduğu karmaşık bir engel seti kurgulanmıştır. Bu senaryo, İHA rota planlamasında karşılaşılabilecek zorlu geometrik ve matematiksel kısıtları temsil etmektedir.



Şekil 4.16 Kapalı Vadi ve Karmaşık Engel Seti Senaryosu

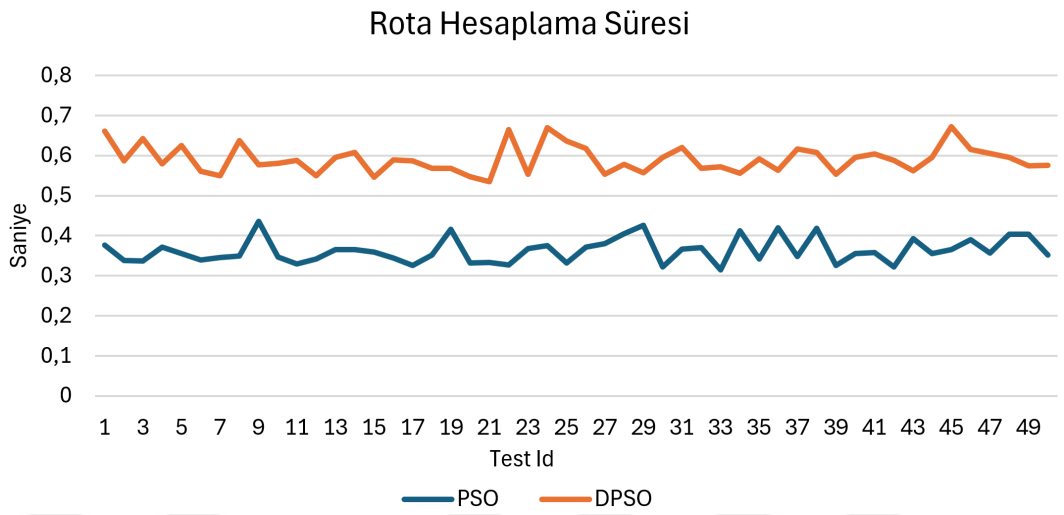
Elde edilen başarı oranları ve zamansal metrikler Tablo 4.2 ile sunulmuştur. Bulgular incelendiğinde, engelsiz ortamda her iki algoritmanın da tam başarı sağladığı görülmektedir. Ancak topoğrafik zorluk düzeyi arttıkça, standart PSO algoritmasının yerel minimuma takıldığı ve başarı oranının Yerel Minimum senaryosunda %68'e gerilediği, "Kapalı Vadi" senaryosunda ise %0 düzeyinde kalarak çözüm üretemediği saptanmıştır. Buna karşın önerilen DPSO algoritması, paralel yapıdaki sürü, açısal alan ayrıştırma ve manuel kaçış mekanizmaları sayesinde tüm senaryolarda %100'lük bir başarı kararlılığı sergilemiştir.

Tablo 4.2 PSO ve DPSO Algoritmalarının Başarı Oranı ve Ortalama Hesaplama Süresi Karşılaştırması

Test Senaryosu	**PSO Başarı (%)**	**DPSO Başarı (%)**	**PSO Ort. Süre (sn)**	**DPSO Ort. Süre (sn)**
Boş Arazi	%100	%100	0,3626	0,5907
Yerel Minimum	%68	%100	0,7559	1,1689
Kapalı Vadi	%0	%100	1,2825	1,7745

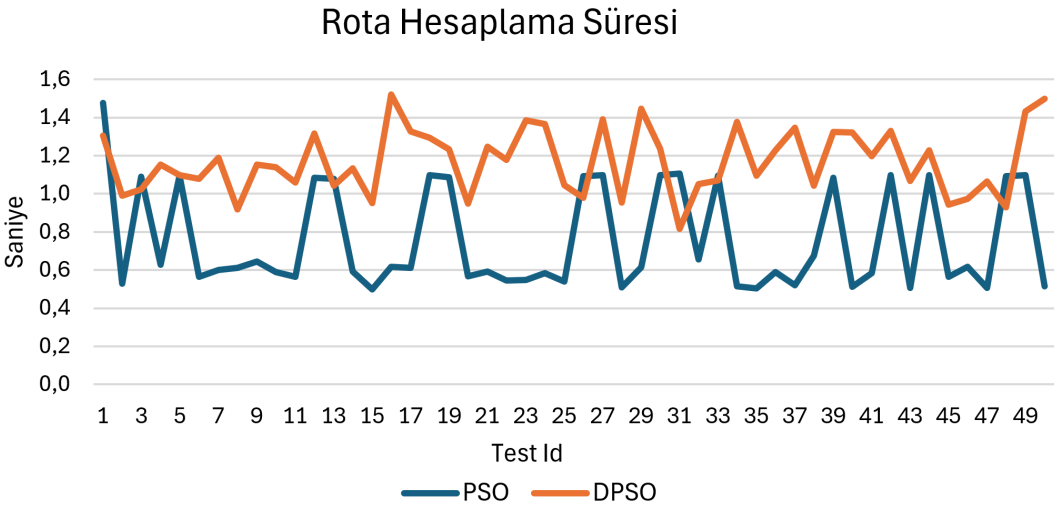
Hesaplama maliyetleri açısından Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 üzerinden yapılan incelemeler, DPSO algoritmasının engelsiz ortamda standart PSO'ya kıyasla yaklaşık 1,6 kat daha yüksek bir hesaplama yüküne sahip olduğunu göstermektedir.

Bu durum, 6 adet paralel PSO algoritmasının eş zamanlı işletilmesinden kaynaklanan veri paylaşımı ile açıklanabilmektedir.



Şekil 4.17 PSO-DPSO Rota Hesaplama Süresi (Engelsiz)

Ancak topoğrafya karmaşıklaştıkça, standart PSO'nun yerel minimumlarda çözüm aramaya devam etmesi nedeniyle işlem süreleri arasındaki farkın oransal olarak daraldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, DPSO algoritmasının sağladığı mutlak çözüm garantisinin, hesaplama süresinde oluşan kabul edilebilir ek maliyeti operasyonel güvenilirlik bağlamında tolere ettiği değerlendirilmektedir.



Şekil 4.18 PSO-DPSO Rota Hesaplama Süresi (Yerel Minimum)

5
SONUÇ

İnsansız Hava Araçları'nın karmaşık, belirsiz ve çoklu tehdit içeren ortamlarda güvenli seyrüsefer gerçekleştirebilmesi, modern havacılık ve robotik alanının en kritik problemlerinden biri olmaya devam etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, üç boyutlu görev sahalarında bulunan dağ, radar gibi engellerden sakınarak başlangıç noktasından hedef noktasına güvenli olarak seyahat edilecek olan rotayı bulan DPSO tabanlı yenilikçi bir rota planlama mimarisi geliştirilmiştir. Literatürde yer alan klasik yöntemlerin ve standart PSO algoritmalarında görülen ve özellikle "U" tipi kapalı engeller, yoğun radar ağları ve karmaşık topoğrafyalar karşısında yaşadığı erken yakınsama ve yerel minimuma saplanma sorunları ele alınmıştır. Bu sorunlara yönelik geliştirilen özgün mekanizmalarla algoritmanın küresel arama kapasitesi ve çözüm kararlılığı artırılmıştır. Çalışma sonucunda, gerçek bir topoğrafya simülasyonunda engellere karşın başarılı bir rota belirleme yapıldığı doğrulanmıştır.

Bu çalışmasının en temel çıktılarından biri, önerilen DPSO mimarisinin sağladığı yapısal avantajlardır. Literatürdeki hesaplama yükü yüksek çoklu sürü yapılarının aksine, bu çalışmada sürüler arası bilgi paylaşımının olmadığından dolayı tamamen izole bir yapı kurulmuştur. Kurulan izole yapı sayesinde aynı işlemler paralel çalışan bir mimari haline getirilmiştir. Bu yapı sayesinde alt sürüler, başlangıçta "Açısal Alan Ayrıştırması" yöntemiyle arama uzayının farklı sektörlerine zorunlu olarak yönlendirilmiştir. Bu strateji bize iki kritik kazanım sağlamıştır: Birincisi, sürülerin tek bir rotaya veya vadiye yığılması engellenerek çözüm uzayının homojen taranması garanti edilmiş; ikincisi ise bağımsız sürü yapısı sayesinde algoritmanın çok çekirdekli işlemcilerde tam paralel çalışarak hesaplama hızının artırılması mümkün olmuştur. Özellikle paralel vadi yapılarının bulunduğu topoğrafik testlerde, sürülerin klasik yöntemlerin aksine alternatif geçiş koridorlarını eş zamanlı keşfetmesi, bu dağıtık yapının keşif uzayını büyüttüğünü doğrulamıştır. Yapılan performans analizleri, paralel mimarinin getirdiği yükün, özellikle kritik senaryolarda elde edilen çözüm istikrarı karşısında kabul edilebilir

bir operasyonel maliyet olduğunu ortaya koymuştur.

Çalışmanın literatüre sunduğu bir diğer önemli katkı, "Dinamik İrtifa Yönetimi" yaklaşımıdır. Mevcut rota planlama algoritmalarının çoğu irtifayı sadece aşılması gereken statik bir engel veya sabit bir uçuş seviyesi olarak ele alırken; bu çalışma irtifayı alçalma bölgesine kadar sadece maksimum irtifayı kontrol ederek katı bir yönetim yerine özgür bırakmaktadır. Hedef bölgesine kritik mesafede yaklaşıldığında ise otonom olarak "Alçalma Modu"na geçerek iniş prosedürlerine uygun güvenli bir süzülme hattı oluşturmuştur. Ayrıca, algoritmanın işleyişinde parçacıkların hızlarının sönümlendiği durumlarda rastgele hız bileşenleri atanarak hareketliliğin korunması sağlanmış; ancak asıl çözüm gücü, bu standart yöntemin ötesine geçen "Rekürsif Manuel Hareket Mekanizması" ile elde edilmiştir.

Tezin en zorlu senaryosu olan ve İHA'nın hem doğal engeller hem de radar ağları arasında sıkıştığı "çıkmaz sokak" yani yerel minimum durumlarında, standart yöntemlerin yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Tam bu noktada devreye giren "Manuel Hareket Mekanizması", çalışmanın özgün yanlarından birini oluşturmaktadır. Sürünün durağanlaştığı ve yerel minimuma saplandığı anlarda otonom bir karar verici gibi devreye giren bu deterministik yapı, karmaşık problemi geçici alt hedeflere bölerek sürüyü tehdit bölgesinin etrafından dolaştırmış ve sıkışıklığı giderdikten sonra tekrar ana hedefe yönlendirmiştir. Bu işlem sırasında DPSO algoritması dinamik olarak farklı hedeflere yönlendirilmiş ve yinelemeli şekilde PSO algoritmasını çalıştırmıştır. Bu bulgu, saf sezgisel algoritmaların insan müdahalesine gerek duymadan deterministik karar mekanizmalarıyla hibritlendiğinde çözüm garantisi sunabildiğini göstermektedir.

Elde edilen bu başarılı sonuçların yanı sıra, çalışmanın mevcut sınırlarının da değerlendirilmesi gerekmektedir. Geliştirilen algoritmalar ve senaryolar, yüksek sadakatli bir fizik ve çevre modeline sahip olsa da MATLAB® ortamında, çevrimdışı (offline) simülasyonlar olarak gerçekleştirilmiştir. Algoritmanın paralel yapısı hesaplama süresini teorik olarak gerçek zamanlı çalışabilecek seviyeye düşürse de, gerçek bir uçuş kontrol kartı üzerinde, gömülü sistemlerin kısıtlı kaynakları altında test edilmemiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan harita ve tehdit unsurları simülasyon boyunca statik kabul edilmiş; gerçek operasyon sahasında karşılaşılması muhtemel olan dinamik engeller veya hareketli radar platformları bu modelin kapsamı dışında tutulmuştur. Benzer şekilde, simülasyon ortamında İHA'nın kendi konumunu ve engellerin konumunu kusursuz bir şekilde bildiği varsayılmış, sensör gürültüsü ve durum tahmin hataları modellenmemiştir. Bunun yanında rota planlaması sonucunda hava aracının fiziksel olarak bu rotayı uygulama senaryosu gerçekçi bir hava aracı modeli kullanılmadığından sonuç tutarlılığı sağlamamaktadır.

Bu tez ile ortaya konulan teorik ve simülasyon tabanlı altyapının, endüstriyel standartlarda gerçek dünya uygulamalarına taşınabilmesi için gelecek çalışmalarda bazı iyileştirmelerin yapılması önerilmektedir. Öncelikle geliştirilen algoritmanın C/C++ gibi sistem dillerine port edilerek çok çekirdekli gömülü sistemler üzerinde koşturulması ve donanım üzerindeki yani "Hardware in the Loop (HIL)" performansının analiz edilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca bu testler sırasında gerçek dünya topoğrafya verilerinin ve gerçek sensör verilerinin kullanılması hedeflenmektedir.

Ayrıca algoritmanın, hareketli engelleri algılayıp anlık olarak rotayı güncelleyebileceği hibrit yapılarla güçlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle dar koridor ve labirent benzeri ortamlarda çözüm garantisini artırmak adına, PSO'nun küresel arama yeteneğinin A* veya RRT* gibi deterministik yöntemlerle birleştirildiği hibrit mimariler geliştirilecektir. Ayrıca mevcut çalışma tek bir İHA'nın rotasını optimize ederken, ilerleyen aşamalarda birden fazla İHA'nın sürü zekasıyla hareket ettiği senaryoların çalışma kapsamına eklenmesi faydalı olacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak bu tez çalışması; doğadan esinlenmiş meta-sezgisel algoritmalardan olan PSO'nun, doğru matematiksel modeller ve özgün deterministik destek mekanizmalarıyla harmanlandığında, karmaşık ve kısıtlı havacılık problemlerinde dahi güvenilir, uygulanabilir ve etkin çözümler üretebileceğini somut bir biçimde ortaya konmuştur.

KAYNAKÇA

[1] H. Shakhatreh, A. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha, Z. Dou, E. Almaita I. Khalil, "Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges," *IEEE Access*, c. 7, ss. 48 572–48 634, 2019. doı: 10.1109/ACCESS.2019.2909530.

[2] D. Debnath, F. Vanegas Alvarez, J. Sandino, A. Hawary F. Gonzalez, "A Review of UAV Path-Planning Algorithms and Obstacle Avoidance Methods for Remote Sensing Applications," *Remote Sensing*, c. 16, no. 21, s. 4019, 2024. doı: 10.3390/rs16214019.

[3] S. Primatesta, G. Guglieri A. Rizzo, "A Risk-Aware Path Planning Strategy for UAVs in Urban Environments," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, c. 95, no. 2, ss. 629–643, 2019. doı: 10.1007/s10846-018-0924-3.

[4] A. Merei, H. Mcheick, A. Ghaddar D. Rebaine, "A Survey on Obstacle Detection and Avoidance Methods for UAVs," *Drones*, c. 9, no. 3, s. 203, 2025. doı: 10.3390/drones9030203.

[5] A. Ait Saadi, A. Soukane, Y. Meraihi, A. Benmessaoud Gabis, S. Mirjalili A. Ramdane-Cherif, "UAV Path Planning Using Optimization Approaches: A Survey," *Archives of Computational Methods in Engineering*, c. 29, no. 6, ss. 4233–4284, 2022. doı: 10.1007/s11831-022-09742-7.

[6] S. LaValle, *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, 2006.

[7] R. W. Beard T. W. McLain, *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press, 2012.

[8] L. Yang, J. Qi, J. Xiao X. Yong, "A Literature Review of UAV 3D Path Planning," *Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, WCICA, IEEE, 2015, ss. 2376–2381. doı: 10.1109/WCICA.2014.7053093.

[9] Y. Koren J. Borenstein, "Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation," *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 1991, ss. 1398–1404. doı: 10.1109/ROBOT.1991.131810.

[10] S. Karaman E. Frazzoli, "Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning," *International Journal of Robotics Research*, c. 30, no. 7, ss. 846–894, 2011. doı: 10.1177/0278364911406761.

[11] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.

[12] E.-G. Talbi, *Metaheuristics: From Design to Implementation*. Wiley Publishing, 2009.

[13] X.-S. Yang, "Nature-inspired metaheuristic algorithms: Success and new challenges," *Journal of Computer Engineering and Information Technology*, c. 1, no. 1, ss. 1–3, 2012. doı: 10.4172/2324-9307.1000e101.

[14] M. Dorigo T. Stützle, *Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances*. Springer, 2019, ss. 311–351. doı: 10.1007/978-3-319-91086-4_10.

[15] M. Hooshyar Y.-M. Huang, "Meta-heuristic Algorithms in UAV Path Planning Optimization: A Systematic Review (2018–2022)," *Drones*, c. 7, no. 12, s. 687, 2023. doı: 10.3390/drones7120687.

[16] A. H. Gandomi, X.-S. Yang, S. Talatahari A. H. Alavi, "Metaheuristic Algorithms in Modeling and Optimization," içinde *Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures*, Elsevier, 2013, ss. 1–24. doı: 10.1016/B978-0-12-398364-0.00001-2.

[17] J. Kennedy R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, c. 4, 1995, ss. 1942–1948. doı: 10.1109/ICNN.1995.488968.

[18] M. D. Phung Q. P. Ha, "Safety-enhanced UAV path planning with spherical vector-based particle swarm optimization," *Applied Soft Computing*, c. 107, s. 107 376, 2021. doı: https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107376.

[19] V. Roberge, M. Tarbouchi G. Labonte, "Comparison of Parallel Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Real-Time UAV Path Planning," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, c. 9, no. 1, ss. 132–141, 2013. doı: 10.1109/TII.2012.2198665.

[20] S. Shao, Y. Peng, C. He Y. Du, "Efficient path planning for UAV formation via comprehensively improved particle swarm optimization," *ISA Transactions*, c. 97, ss. 415–430, 2019. doı: 10.1016/j.isatra.2019.08.018.

[21] J. L. Foo, J. Knutzon, V. Kalivarapu, J. Oliver E. Winer, "Path planning of unmanned aerial vehicles using B-splines and particle swarm optimization," *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, c. 6, no. 4, ss. 271–290, 2009. doı: 10.2514/1.36917.

[22] S. Aggarwal N. Kumar, "Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges," *Computer Communications*, c. 149, ss. 270–299, 2020. doı: 10.1016/j.comcom.2019.10.014.

[23] R. C. Eberhart J. Kennedy, *Swarm intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2001.

[24] C. Coello, G. Pulido M. Lechuga, "Handling multiple objectives with particle swarm optimization," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, c. 8, no. 3, ss. 256–279, 2004. doı: 10.1109/TEVC.2004.826067.

[25] Z.-H. Zhan, J. Zhang, Y. Li H. S.-H. Chung, "Adaptive Particle Swarm Optimization," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, c. 39, no. 6, ss. 1362–1381, 2009. doı: 10.1109/TSMCB.2009.2015956.

[26] H. Chu, J. Yi F. Yang, "Chaos particle swarm optimization enhancement algorithm for UAV safe path planning," *Applied Sciences*, c. 12, no. 18, s. 8977, 2022. doı: 10.3390/app12188977.

[27] N. Lynn P. Suganthan, "Heterogeneous comprehensive learning particle swarm optimization with enhanced exploration and exploitation," *Swarm and Evolutionary Computation*, c. 24, ss. 11–24, 2015. doı: 10.1016/j.swevo.2015.05.002.

[28] M. Roshanzamir, M. Balafar S. Razavi, "Empowering Particle Swarm Optimization Algorithm Using Multi Agents' Capability: A Holonic Approach," *Knowledge-Based Systems*, c. 136, ss. 58–74, 2017. doı: 10.1016/j.knosys.2017.08.023.

[29] L. Huynh, L. Tran, P. Phan, Z. Yu S. Dao, "Intermediary RRT*-PSO: A Multi-Directional Hybrid Fast Convergence Sampling-Based Path Planning Algorithm," *Computers, Materials and Continua*, c. 76, no. 2, ss. 2281–2300, 2023. doı: 10.32604/cmc.2023.034872.

[30] Z. Shao, F. Yan, Z. Zhou X. Zhu, "Path Planning for Multi-UAV Formation Rendezvous Based on Distributed Cooperative Particle Swarm Optimization," *Applied Sciences*, c. 9, no. 13, 2019. doı: 10.3390/app9132621.

[31] B. Yildiz, M. F. Aslan, A. Durdu A. Kayabasi, "Consensus-based virtual leader tracking swarm algorithm with GDRRT*-PSO for path-planning of multiple-UAVs," *Swarm and Evolutionary Computation*, c. 88, s. 101 612, 2024. doı: 10.1016/j.swevo.2024.101612.

[32] G. M. Nayeem, M. Fan Y. Akhter, "A Time-Varying Adaptive Inertia Weight based Modified PSO Algorithm for UAV Path Planning," *2021 2nd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*, IEEE, 2021, ss. 573–576. doı: 10.1109/ICREST51555.2021.9331101.

[33] I. Nikolos, K. Valavanis, N. Tsourveloudis A. Kostaras, "Evolutionary algorithm based offline/online path planner for UAV navigation," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, c. 33, no. 6, ss. 898–912, 2003. doı: 10.1109/TSMCB.2002.804370.

[34] Q. Chen, Q. He D. Zhang, "UAV Path Planning Based on an Improved Chimp Optimization Algorithm," *Axioms*, c. 12, no. 7, s. 702, 2023. doı: 10.3390/axioms12070702.

[35] Q. Liu H. Wang, "UAV 3D Path Planning Based on Improved Grey Wolf Optimization Algorithm," *Frontiers in Computing and Intelligent Systems*, c. 3, no. 1, ss. 113–116, 2023. doı: 10.54097/fcis.v3i1.6344.

[36] A. Ratnaweera, S. K. Halgamuge H. C. Watson, "Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, c. 8, no. 3, ss. 240–255, 2004. doı: 10.1109/TEVC.2004.826071.

[37] J. Liang, A. Qin, P. Suganthan S. Baskar, "Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, c. 10, no. 3, ss. 281–295, 2006. doı: 10.1109/TEVC.2005.857610.

[38] C. Goerzen, Z. Kong B. Mettler, "A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, c. 57, no. 1, ss. 65–100, 2010.

[39] Q. Meng, K. Chen Q. Qu, "PPSwarm: Multi-UAV Path Planning Based on Hybrid PSO in Complex Scenarios," *Drones*, c. 8, no. 5, 2024. doı: 10.3390/drones8050192.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. A. Tetik ve Y. Eren, "Otonom Hava Araçları için Güvenli ve Verimli Rota Planlamasında Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu" *15. International Marmara Sciences Congress (IMASCON)*, ss. 95-102, Kocaeli, Turkiye, 2025.