



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA) SÜRÜSÜNÜN
AKILLI YOL PLANLAMASI

Berat YILDIZ

DOKTORA TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Berat YILDIZ tarafından hazırlanan “**İnsansız Hava Aracı (İHA) Sürüsünün Akıllı Yol Planlaması**” adlı tez çalışması 13/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Elektrik Elektronik Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Danışman

Doç. Dr. Akif DURDU
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yardımcı Danışman

Doç. Dr. Ahmet KAYABAŞI
(Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Sait Ali UYMAZ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Kadir SABANCI
(Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Muhammed Fahri ÜNLERŞEN
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Berat YILDIZ

Tarih:

ÖZET

DOKTORA TEZİ

İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA) SÜRÜSÜNÜN AKILLI YOL PLANLAMASI

Berat YILDIZ

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Akif DURDU

2024, 137 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Akif DURDU

Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU

Doç. Dr. Sait Ali UYMAZ

Doç. Dr. Kadir SABANCI

Doç. Dr. Muhammed Fahri ÜNLERŞEN

Endüstriyel teknolojik gelişmeler, İnsansız Hava Araçlarının (İHA) hareket ve manevra kabiliyetinin hızla ilerlemesini sağlamıştır. Birden fazla İHA'nın koordine edilmesi, tek bir İHA'ya kıyasla görevin daha hızlı ve verimli yürütülmesini sağlayabilir. Özellikle, İHA'ların eğlence, nakliye, ulaşım, dağıtım gibi sosyal alanlarda; gözetleme, takip ve saldırı gibi askeri alanlarda kullanımı, sürü sistemlerine yönelik araştırmaları arttırmıştır. Bu sistemler, sürü ve ortam büyüklüğüne duyarlı kontrol parametreleri içerir ve hedefe yönelik görevlerde davranış temelli, sanal yapı, lider takibi veya konsensüs gibi fiziksel tanımlara ihtiyaç duyulabilir. Literatürde, sürü üyelerinin koordineli hareketini sağlamak için kullanılan bu tanımlamalara dayanan algoritmalar, kısıtlı alanlarda başarılı sonuçlar sunabilmektedir. Ancak sürü davranışları, belirli bir sıraya bağlı olmayan otomatik olarak gerçekleşen sosyal davranışlar gibidir. Bu nedenle, sağlam sürü topolojilerinde, dinamik ortamlarda bazı üyeler eksik olsa bile kalan üyelerin göreve devam etmesi beklenir. Bu dinamik ortamdaki temel sorun, parametrelerin dış ortama uyacak şekilde esneklik göstermemesidir. Ayrıca, büyük sürülerde tüm üyelerin görevi gerçekleştirmesi gerekmeyebilir ve sürü, kendi üyelerinden oluşan farklı gruplarla ölçeklenebilir olmalıdır. Dolayısıyla, birçok farklı alanda farklı görevler üzerinde çalışacak verimli bir sürü İHA topolojisi oluşturmak için sağlamlık, esneklik ve ölçeklenebilirlik kavramlarını kapsayan bir sürü sistemi oluşturulmalıdır.

Bu tez çalışmasında, yukarıda bahsedilen konulardaki eksiklikleri göz önünde bulundurarak sürü İHA sistemlerine sağlamlık, esneklik ve ölçeklenebilirlik kazandıracak Konsensüs-tabanlı Sanal Lider Takibi Algoritmasına (KSLTA) dayanan bir sürü topolojisi geliştirilmiştir. Bu algoritma, sürünün hedef noktaya engellerden kaçınarak varmaya çalışırken, toplanma/yığın, formasyon oluşturma ve uçuş sırasında formasyon kontrolü gibi sürü alt görevlerini başarıyla çözebilmektedir. Ayrıca, yapılan uygulamalarla, sürü hareketi sırasında rasgele bir anda rasgele sayıda sürü üyesinin kaybına rağmen göreve devam edebilecek kadar sağlam, yeni uçuş formasyonları oluşturabilecek kadar ölçeklenebilir ve uçuş sırasında formasyon kontrolü sağlayabilecek kadar esnek bir sürü topolojisi ortaya konmuştur. Önerilen algoritma, anlık (online) yol planlaması yaptığı için geniş alanlarda ve büyük haritaları içeren bölgelerde nispeten verimsiz olabilir. Bu nedenle, sürü İHA uygulamalarındaki enerji ve maliyet problemlerine daha geniş çapta çözüm sağlamak amacıyla KSLTA algoritması, akıllı bir yol planlama algoritması olan GDRRT*-PSO ile geliştirilmiştir. Sonuç olarak, önerilen yöntemlerin, literatürde yapılan önceki çalışmaların önemli bir kısmına üstünlük sağlayabileceği iddia edilebilir. Ayrıca, simülasyon ortamında gerçekleştirilen uygulamalar, gerçek zamanlı sistemlerde çalışabilecek niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Engelden Kaçınma, Formasyon Kontrolü, Sürü İHA, Yol Planlaması

ABSTRACT

PhD THESIS

INTELLIGENT PATH PLANNING OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV) SWARM

Berat YILDIZ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical electronics Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Akif DURDU

2024, 137 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Akif DURDU

Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU

Assoc. Prof. Dr. Sait Ali UYMAZ

Assoc. Prof. Dr. Kadir SABANCI

Assoc. Prof. Dr. Muhammed Fahri ÜNLERŞEN

Industrial technological developments have enabled the movement and maneuverability of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to progress rapidly. Coordinating multiple UAVs can enable faster and more efficient mission execution compared to a single UAV. Especially in social areas such as entertainment, shipping, transportation and distribution; Its use in military fields such as surveillance, tracking and attack has accelerated research on swarm UAV systems. Swarm UAV systems contain control parameters sensitive to swarm and environment size, and physical definitions such as behavior-based, virtual structure, leader following or consensus may be needed in target-oriented missions. In the literature, algorithms based on these definitions used to ensure coordinated movement of swarm members can provide successful results in limited areas. However, swarm behavior is like social behavior that occurs automatically and not in a specific order. Therefore, in robust swarm topologies, the remaining members are expected to continue working together even if some are missing in dynamic environments. The main problem in this dynamic environment is that swarm parameters are flexible to suit the external environment. Additionally, not all members may need to perform the task in large swarms, and the swarm should be scalable with different groups of members. Therefore, to create an efficient swarm UAV topology that will work on other tasks in many different areas, a swarm system should be developed that encompasses the concepts of robustness, flexibility and scalability.

This thesis has developed a swarm topology based on the Consensus-based Virtual Leader Tracking Algorithm (CVLTA), considering the deficiencies in the abovementioned issues, which will bring robustness, flexibility and scalability to system. This algorithm can successfully solve swarm sub-tasks such as aggregation/gathering, flight formation and formation control during flight, while the swarm tries to reach the target point by avoiding obstacles. In addition, with the applications, a swarm topology that is robust enough to continue its mission despite the loss of a random number of members at a random moment during the movement, scalable enough to create new flight formations, and flexible enough to provide formation control during flight has been revealed. Since the proposed algorithm performs instant (online) route planning, it may be relatively inefficient in large areas and regions containing large maps. Therefore, to provide a broader solution to the energy and cost problems in swarm UAV applications, the CVLTA algorithm was developed with GDRRT*-PSO, an intelligent path-planning algorithm. As a result, it can be claimed that the proposed methods can be superior to a significant part of the previous studies in the literature. Additionally, applications implemented in a simulation environment can run in real-time systems.

Keywords: Obstacle Avoidance, Formation Control, Swarm UAV, Path Planning

ÖNSÖZ

Öncelikle bugünlere gelmemde emeği büyük olan, beni yetiştiren anne ve babama, her alanda varlıkları ile bana destek olan kardeşlerime,

Ufku ve yol göstermesi ile her daim benim için ilham kaynağı ve rol model olan sayın danışmanım Doç. Dr. Akif DURDU'ya ve beni üyesi olmakla gururlandığı RAC-LAB ailesine,

Tez süreci boyunca yapılan çalışmalarda bana desteğini esirgemeyen yardımcı danışmanım sayın Doç. Dr. Ahmet KAYABAŞI'na

Bu tez kapsamında yapılan uygulamalarda değerli yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Muhammet Fatih ASLAN'a

teşekkürlerimi sunarım.

Berat YILDIZ
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Robotik Sistemler ve Bileşenleri.....	1
1.1.1. Mobil robotlar	2
1.1.2. Otonom robotlar.....	4
1.1.3. İnsansız hava araçları sürüsü	6
1.2. Tezin Amacı.....	9
1.3. Tezin Önemi	10
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI	14
2.1. Çoklu Robotik Sistemler.....	16
2.2. Sürü Robotiği Davranış Metodolojileri (SRDM)	17
2.2.1. Uzamsal yapılanma ve organizasyonu.....	18
2.2.2. Toplu hareket	20
2.2.3. İş birlikçi karar verme.....	23
2.3. Hava Sürü Robotiği ve İnsansız Hava Araçları	25
2.4. Sürü İHA Çalışmaları	28
2.4.1. Hedef arama, izleme ve takibi	30
2.4.2. İş birlikçi haritalama, lokalizasyon ve yol-planlaması	44
2.4.3. Uçuş formasyon kontrolü.....	53
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	58
3.1. Sürü İHA Topolojisi	59
3.1.1. Sürü İHA'ların iletişiminde graf yapısı	60
3.1.2. Konsensüs algoritması	66
3.2. Konsensüs Tabanlı Sanal Lider Sürü Topolojisi	70
3.2.1. Eş yükseltide (İrtifada) toplanma algoritması.....	73
3.2.2. Formasyon kontrolü.....	75
3.2.3. Sanal lider takip algoritması	81
3.2.4. GDRRT*-PSO ile sürü İHA'lar için rota planlaması	84
4. SİMÜLASYON UYGULAMALARI ve PERFORMANSLARI	90
4.1. Sürü İHA Formasyon Kontrolü için Konsensüs-tabanlı Sanal Lider Takip Uygulaması	91
4.1.1. Lider takibi ile formasyon kontrolü uygulaması.....	92
4.1.2. Konsensüs-tabanlı sanal lider takibi ile formasyon kontrolü uygulaması	94

4.1.3. Konsensüs-tabanlı sanal lider takibi algoritması performans değerlendirmesi	96
4.2. Konsensüs-tabanlı GDRRT*-PSO Sanal Lider Takip Algoritması ile Sürü İHA Akıllı Yol Planlama Uygulaması	98
4.2.1. GDRRT*-PSO ile konsensüs-tabanlı sanal lider takip algoritması	99
4.2.2. Konsensüs tabanlı GDRRT*-PSO sanal lider takip algoritması performans değerlendirmesi	106
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	108
5.1 İlk Uygulama için Sonuçlar	108
5.2 İlk Uygulama için Tartışma ve Öneriler	108
5.3 İkinci Uygulama için Sonuçlar	109
5.4 İkinci Uygulama için Tartışma ve Öneriler	110
KAYNAKLAR	111



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

t	: Sürekli Zaman Faktörü
k	: Ayırık Zaman Faktörü
u_i	: Kontrol Girdisi
x_i	: Konum Vektörü
x_{rand}	: Rasgele Örnek
E	: Kenar Kümesi
N	: Düğüm Kümesi
G	: Graf Yapısı
G_{SL}	: Sanal Lider Tabanlı Graf Yapısı
c_1, c_2	: İvme Katsayıları
$x_{current}$	: Mevcut Düğüm Konum Vektörü
w	: Atalet Katsayısı
d_{ij}	: Komşuluk Verisi
C_i	: Konsensüs Verisi
D	: Durum Matrisi
μ	: Sol Birin Eigenvektörü
T_i	: Hedef Kümesi
O_i	: Engel Kümesi
F_{ij}^T	: Potansiyel Çekme Fonksiyonu
F_{ij}^O	: Potansiyel İtme Fonksiyonu
$\Delta x_{çekme}$	: Çekme Kuvveti Adım Faktörü
Δx_{itme}	: İtme Kuvveti Adım Faktörü
λ	: Sabit Adım Katsayısı
$\bar{R}_{ij}$	: Potansiyel İtme Faktörü
R_{ij}	: Potansiyel İtme Kuvveti
A_{ij}	: Potansiyel Çekme Kuvveti
C_r, μ	: Sabit İtme Katsayıları
λ_i	: Adaptif Adım Katsayısı
φ_i	: Formasyon Oluşturma Hatası
E_{fi}	: Formasyon Fark Hatası
∇	: Gradyan
V_i	: Parçacık Hızı
P_i	: Parçacık Konumu
p_{best}	: En iyi Yerel Konum
g_{best}	: En iyi Global Konum
z_{io}	: Z-ekseninde Ortalama Uzaklık
S_L	: Sanal Lider

Kısaltmalar

ACO	: Karınca Kolonisi Optimizasyonu
ANİ	: Adaptif Newton İterasyonu
ASAP	: Hava Platformunun Havadan Bastırılması
BFDYOA	: Böl ve Fethet Deterministik Yol Optimizasyon Algoritması
BiLSTM	: Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek
CNN	: Evrişimli Sinir Ağı
ÇRS	: Çoklu Robotik Sistemler
DACF	: Doğrudan Karınca Kolonisi Toplayıcılığı
DL	: Derin Öğrenme
DRL	: Derin Takviyeli Öğrenme
DVRP	: Dinamik Araç Rotalama Problemi
DYG	: Dağıtılmış Yönlü Grafik
GA	: Genetik algoritma
GDOP	: Hassasiyetin Geometrik Seyreltilmesi
GDRRT*	: Hedef Mesafeye Dayalı RRT*
GP	: Gauss Süreci
GPS	: Küresel Konumlandırma Sistemi
ICA	: Geliştirilmiş Konsensüs Algoritması
IGA	: Bağışıklık Genetik Algoritma
IMU	: Atalet Ölçüm Birimi
İHA	: İnsansız Hava Araçları
İKA	: İnsansız Kara Araçları
İSA	: İnsansız Sualtı Araçları
KSLTA	: Konsensüs-tabanlı Sanal Lider Takip Algoritması
LMI	: Doğrusal Matris Eşitsizliği
LSO-DE	: Aslan Sürü Optimizasyonu Tabanlı Diferansiyel Evrim
MAT	: Manyetik Anormallik Tespiti
MPSO	: Hareket Kodlu Parçacık Sürü Optimizasyonu
MTPSO	: Çok Hedefli Parçacık Sürü Optimizasyonu
MTS	: Minimum Süreli Arama
PBFT	: Pratik Bizans Hata Toleransı
PHD	: Olasılıksal Hipotez Yoğunluğu
PoW	: İşin Kanıtı
PQ	: Olasılıksal Dörtlü-ağaçlar
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
PVMTSP	: Çoklu Gezgin Satıcı Problemi ile Poligon Ziyareti
RRT	: Hızlı Keşfeden Rastgele Ağaç
RRT*	: Hızlı Keşfeden Rastgele Ağaç-Yıldız
SD	: Uzay Ayrışımı
SLAM	: Eşzamanlı Lokalizasyon ve Haritalama
SRDM	: Sürü Robotiği Davranış Metodolojileri
TSP	: Gezgin Satıcı Problemi
VIO	: Görsel-Atalet Odometri
VO	: Görsel Odometri
WOA	: Balina Optimizasyon Algoritması
YSA	: Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

1.1. Robotik Sistemler ve Bileşenleri

Robotlar; kullanıcıların belirlediği görevleri fiziksel olarak gerçekleştirebilen mekanik ve elektronik parçalardan oluşturulmuş, programlanabilir, otomatik veya uzaktan kumandalı elektromekanik cihazlardır. Tarih boyunca, birçok farklı sektörde, önceden belirlenmiş görevleri yerine getirmek amacıyla programlanmış robotlar yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Bu robotlar, önceden belirlenmiş yazılımları ve çalışma prensiplerini temel alarak faaliyet gösterirler ve işlevlerini gerçekleştirmek için herhangi bir dış sinyale ihtiyaç duymazlar (Yıldız ve diğerleri, 2022). Alınan komutlar doğrultusunda spesifik görevleri hatasız bir şekilde yerine getirebilen bu sıradan robotlar, genellikle karmaşık karar verme yeteneklerine sahip değildir ve daha çok basit işlemlerde kullanılırlar.

Çağdaş teknolojik ilerlemelerle birlikte robotlar, gerçekleştirecekleri görevin karmaşıklığına ve doğasına bağlı olarak özelleştirilmiş sensörler, motorlar ve kontrol birimleri içeren bir sistem halini almıştır. Bu nedenle, sensörler, motorlar, kontrol birimleri ve mekanik parçalar gibi bileşenlerden oluşturulmuş programlanabilir, otomatik veya yarı otomatik cihazlar bütünü robotik sistemler olarak adlandırılabilir.

Robotik sistemlerin bileşenleri, robotların yapısını ve işleyişini sağlayan unsurlardır. Bu bileşenler arasında mekanik yapı, elektronik devreler, sensörler, kontrol sistemleri ve yazılım bulunmaktadır. Mekanik yapı, robotun fiziksel yapısını oluşturur ve hareket etmesini sağlar. Elektronik devreler, robotun kontrolünü ve iletişimini sağlar. Sensörler ise genellikle robotların çevrelerindeki fiziksel bilgileri toplamak için kullanılan ölçüm araçlarıdır. Robotların etrafındaki ortama dair gerçek zamanlı veri sağlama yeteneği, sensörler aracılığıyla gerçekleştirilir. Sensörler tarafından algılanan çevresel değişikliklere hızlı ve hassas bir şekilde tepki vermek, robot etkinliğini artırır. Bu sayede, robotlar çeşitli görevleri yerine getirirken çevresel koşullara daha iyi uyum sağlar. Motorlar, robotların fiziksel hareketlerini gerçekleştiren temel bileşenlerdir. Robotlar, sensörlerden gelen verileri işleyerek istenilen hareketleri motorlar aracılığıyla gerçekleştirebilmek için bir kontrol birimine ihtiyaç duyar. Bu kontrol birimi, sensörlerden gelen verileri analiz eder ve robotun çevresine uyum sağlayarak doğru kararlar almasına yardımcı olur. Karar verme mekanizması, robotik sistemlerde kontrol birimi ve yazılım aracılığıyla gerçekleştirilir. Robotları oluşturan bu entegre sistem,

robotların çeşitli görevleri başarıyla yerine getirmelerini sağlamak için bir araya gelir ve robot teknolojisinin sürekli gelişimine katkıda bulunur.

Robotik sistemler, günümüzde çeşitli alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Endüstriyel robotik sistemler, fabrikalarda işçilik süreçlerinde kullanılarak hem üretimi hızlandırmakta hem de insan gücüne olan ihtiyacı azaltmaktadır (Dean-Leon ve diğerleri, 2016). Tıbbi robotik sistemler ise cerrahi operasyonlar ve teşhis süreçlerinde kullanılarak daha güvenli ve hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır (Najarian ve diğerleri, 2011). Askeri ve savunma amaçlı robotik sistemler, keşif, tahrip, ve güvenlik görevlerini yerine getirerek insan hayatını korumakta ve askeri operasyonlarda etkinlik sağlamaktadır (Ha ve diğerleri, 2019). Ev ve hizmet robotik sistemleri ise günlük hayatta insanlara yardımcı olarak ev temizliği, yemek pişirme, güvenlik gibi görevleri üstlenmektedir (Jia ve diğerleri, 2006). Ayrıca tarım robotik sistemleri, tarım sektöründe otomasyonu sağlayarak üretim verimliliğini artırmakta ve tarım işçilerine destek olmaktadır (Pedersen ve diğerleri, 2006). Bu farklı kullanım alanlarına sahip robotik sistemler, teknolojik gelişmelerle birlikte daha da yaygınlaşmaktadır.

1.1.1. Mobil robotlar

Sanayi devriminin etkisiyle, robotik sistemler başlangıçta fabrikalarda endüstriyel üretim için montaj, kaynak ve boyama gibi sabit görevlerde kullanılıyordu. Ancak günümüzde elektrik, elektronik, bilgisayar ve yazılım alanlarındaki ilerlemeler, robotik teknolojilerinde büyük gelişmelere yol açtı. Bu ilerlemelerle birlikte robotlar, daha hassas, karmaşık, hızlı ve akıllı hale gelmiştir. Bu nedenle, sadece endüstriyel alanlarda değil, aynı zamanda toplumsal alanlarda da kullanım alanları genişlemektedir.

Gelişen teknolojiler sayesinde, robotlar artık mobil bir yapı kazanarak endüstriyel robotlardan farklılaşmıştır. Mobil robotlar, belirli bir noktada sabitlenmemiş, serbestçe hareket edebilen ve karada, suda veya havada insan müdahalesi olmaksızın beklenen görevleri yerine getirebilen otomatik makinelerdir (Rubio ve diğerleri, 2019). Bu bağlamda, mobil robotlar, çeşitli çevresel koşullara uyum sağlamak için daha yüksek performansa sahip birçok sensöre ihtiyaç duyar. Bu sensörlerle donatılmış karmaşık yapılarıyla, mobil robotlar insanlar için zor ve tehlikeli görevleri yerine getirebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu robotlar, tekerlekli, paletli, ayaklı veya kanatlı (sabit veya döner) yapılarda olabilirler.

Tekerlekli mobil robotlar genellikle endüstriyel, ticari, ev, eğitim, askeri ve eğlence gibi çeşitli alanlarda düz ve düzenli yüzeylerde kullanılmak üzere tasarlanmıştır (Matlı ve Bayır, 2020). Örneğin, lojistik ve kargo şirketlerinde ürün toplama, taşıma ve sıralama işlemlerinde; ev, otel, restoran ve mağazalarda temizlik ve servis hizmetlerinde; hastanelerde, okullarda, bankalarda güvenlik, rehberlik, eğitim ve oyun gibi birçok işlevi yerine getirebilirler.

Paletli mobil robotlar, genellikle palet adı verilen kayışlar veya zincirler aracılığıyla hareket eden robotlardır. Bu tür robotlar, tekerlekli mobil robotlardan farklı olarak daha zorlu zeminlerde etkin bir şekilde çalışma yeteneğine sahiptir. Palet sistemi, robotların düzensiz yüzeylere daha iyi adapte olabilmelerini ve çeşitli görevleri daha güvenilir bir şekilde yerine getirebilmelerini sağlar (Khurshid ve Bing-Rong, 2004). Bu özellikleri sayesinde, paletli mobil robotlar çeşitli endüstri dallarında ve uygulama alanlarında tercih edilmektedir. Özellikle askeri operasyonlarda mayın tespiti ve imha, patlayıcı cihazların etkisiz hale getirilmesi, düşman hatlarının ötesinde keşif ve gözetleme görevlerinde etkili bir şekilde kullanılabilir (Khurshid ve Bing-Rong, 2004). Ayrıca, depremler, patlamalar veya çatışma sonucu oluşan göçükler altında kalan insanların aranması ve kurtarılması operasyonlarında da önemli bir rol oynarlar (Khurshid ve Bing-Rong, 2004). Madenciliğin yapıldığı bölgeler, tarım alanları ve şantiye gibi zorlu sahalarda da paletli mobil robotlar önemli görevler üstlenebilirler (Khurshid ve Bing-Rong, 2004).

Ayaklı mobil robotlar, bacaklarını kullanarak hareket eden robotlardır. Bu robotlar, doğal sistemlerden esinlenerek tasarlanmış olup hareket kabiliyeti ve çevreye uyum konusunda önemli avantajlar sunarlar (Bakırcıoğlu ve Kalyoncu, 2020). Ayaklı robotlar, tekerlekli veya paletli mobil robotlara göre daha karmaşık bir hareket sistemine sahiptir. Tasarımları, bacak sayısı, uzunluğu, konumu, şekli, eklemleri, aktüatörleri ve sensörleri gibi bir dizi parametreye bağlı olarak çeşitlenir (Bakırcıoğlu ve Kalyoncu, 2020). Bu robotlar genellikle insansı, hayvansı veya biyolojik formlardan ilham alınarak tasarlanır. Eğitim, araştırma, uzay, askeri ve eğlence gibi birçok farklı alanlarda çeşitli amaçlarla kullanılır (Rubio ve diğerleri, 2019). Ayrıca hareket kabiliyetinin tekerlekli ve paletli robotlara göre daha geniş olması sayesinde yürüme, koşma, zıplama, tırmanma, dans etme, futbol oynama, savaşma, keşif yapma gibi çeşitli işlevleri yerine getirebilirler.

Kanatlı mobil robotlar, hareketlerini kanat, pervane ya da balonları ile havada asılı kalarak ve manevra yaparak sağlayan robotlardır. Bu robotlar, havada hareket edebildikleri için, karada veya suda hareket etmekte zorlanan veya hareketi mümkün

olmayan yerlere ulaşabilme kabiliyetine sahiptir. Genellikle askeri, arama-kurtarma, keşif, gözetim, tarım, ulaşım, eğlence ve eğitim gibi birçok farklı alanda kullanılan kanatlı mobil robotlar, bomba atma, düşman tespiti, afet yardımı, hava fotoğrafçılığı, bitki sağlığı, kargo taşıma, yarışma, oyun gibi çeşitli işlevleri yerine getirebilirler (Chung ve diğerleri, 2018). Bu robotlar çeşitli tiplere ayrılabilir; kanat sayısına, tipine, konfigürasyonuna ve kontrolüne göre değişiklik gösterebilirler. Örneğin, tek kanatlı, çift kanatlı, çok kanatlı, döner kanatlı, sabit kanatlı, esnek kanatlı veya rijit kanatlı gibi farklı kanat sayılarına ve tiplerine sahip olabilirler. Ayrıca, kanat konfigürasyonu olarak yatay, dikey, eğik, çapraz, dairesel, eliptik, spiral gibi çeşitli kanat şekilleri mümkündür. Kontrol yöntemleri arasında ise manuel kontrol, uzaktan kontrol, otonom kontrol veya karma kontrol gibi çeşitli seçenekler bulunmaktadır.

1.1.2. Otonom robotlar

Robotik sistemlerin gelişim süreci boyunca, insanlar ile olan etkileşimi belirli dönemlerde artmış olsa da sistem kontrolü açısından insan müdahalesi gün geçtikçe azalmaktadır. Özellikle otonom robotlar alanında yapılan çalışmalarla birlikte insansız robotik sistemler oldukça popüler hale gelmiş ve yapılan robotik çalışmaların büyük bir çoğunluğu bu yönde yoğunlaşmıştır (Fahimi, 2009). Otonom robotlar, insanlar gibi bağımsız kararlar alabilen ve bu kararlara uygun eylemlerde bulunabilen robotlardır. Otonom robot teknolojisi, yapay zekâ ve sensör teknolojilerinin birlikte kullanılması sonucunda çevrelerini anlama yeteneğine sahip olup, insan müdahalesine gerek duymadan tehlikeli, uzun süreli veya zorlu görevleri yerine getirebilir. Otonom robotlar, üretim, sağlık, askeri, eğitim, tarım, ulaşım gibi çok çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır (Fahimi, 2009). Otonom robotların kullanımı, insan yaşamını kolaylaştırmakla kalmayıp aynı zamanda riskli ve zorlu görevlerin üstesinden gelmelerine olanak tanır. Bu robotların gelişimi, robotik endüstrisinin genel büyümesine önemli katkılarda bulunmaktadır. Otonom robotlar, endüstriyel süreçlerin optimize edilmesi, sağlık hizmetlerinin iyileştirilmesi, askeri operasyonlarda etkinlik artışı gibi birçok alanda önemli avantajlar sunarak teknoloji ve toplum arasında köprü görevi görmektedirler (Goel ve Gupta, 2020).

Günümüzde teknolojik ilerlemelerin hız kazandığı bir dönemde, özellikle insan, hayvan veya yük taşımacılığında kullanılan araçların otonom hale getirilmesi amacıyla yoğun çalışmalar sürdürülmektedir (Yildiz ve diğerleri, 2022). Bu bağlamda, İnsansız Hava Araçları (İHA), İnsansız Sualtı Araçları (İSA), İnsansız Kara Araçları (İKA) ve

deniz taşımacılığında kullanılan otonom yük gemileri gibi çeşitli araçlar üzerinde yapılan çalışmalar (Finn ve Scheduling, 2010), otonom sistemlerde önemli gelişmelere işaret etmektedir ve bu alandaki teknolojik ilerlemelerin hızla artacağını bir göstergesidir.

İnsansız Kara Araçları (İKA), karayolu taşımacılığında devrim niteliğinde bir değişimi ifade eder. Otomobil, kamyonet veya otobüs gibi kara taşımacılığı araçlarındaki sürücüsüz teknolojilerle donatılan bu araçlar, günümüz ulaşım sektörünü temelden değiştirecek potansiyele sahiptir. Sürücüsüz araçların kullanımı, trafik güvenliği konusunda önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca bu araçlar için geliştirilen sensör teknolojileri, çevresel faktörleri anında algılayabilir ve bu sayede kazaların önüne geçebilir. Bu noktada, yapay zekâ destekli sistemlerin entegrasyonu ile sürücüsüz araçlar, yoldaki diğer araçlarla ve altyapıyla etkileşim halinde olup daha güvenli bir yolculuk sağlayabilirler. Ayrıca, sürücüsüz araçlar enerji verimliliği sağlayarak yakıt tüketimini minimize eder ve ulaşımın daha çevre dostu bir hale gelmesine katkıda bulunur. Deniz taşımacılığında kullanılan otonom yük gemileri ise sürdürülebilir ve verimli bir lojistik çözümü sunar. Bu gemiler, konteyner taşımacılığı ve liman operasyonlarında daha etkili bir hizmet sunma potansiyeline sahiptir. Otonom deniz araçları, operasyonel mükemmeliyeti artırarak taşımacılık sektöründe rekabet avantajı sağlayabilir (Bae ve Hong, 2023).

İnsansız Sualtı Araçları (İSA), denizaltı keşif çalışmaları, deniz bilimleri ve denizaltı kaynaklarının keşfi gibi alanlarda kullanılarak çeşitli görevleri yerine getirebilmektedir (Allard ve diğerleri, 2014). Bu araçlar, derin sularda insan müdahalesi olmadan çeşitli bilimsel araştırmalar yapabilir ve deniz ekosistemini daha iyi anlamamıza yardımcı olabilir. Özellikle, İSA'lar denizaltı volkanlarının keşfi, su altı jeolojisi çalışmaları, deniz biyolojisi ve ekoloji araştırmaları gibi alanlarda önemli rol oynamaktadır (Gafurov ve Klochkov, 2015). Ayrıca, petrol ve gaz arama çalışmaları, su altı tarihi eserlerin keşfi ve su altı madencilik faaliyetleri gibi endüstriyel ve ekonomik amaçlar için de kullanılmaktadır. Bu araçlar, derin denizlerin zorlu koşullarında güvenilir bir şekilde çalışabilir ve bilimsel keşiflerin yanı sıra çevresel izleme ve denizaltı operasyonlarında da kullanılabilir. Dolayısıyla, İSA'lar deniz bilimlerinde ve endüstriyel uygulamalarda önemli bir araç olarak kabul edilmektedirler. Bu şekilde, insan müdahalesi olmadan derin sulardaki keşif ve araştırma çalışmalarının yapılmasına olanak tanımaktadırlar.

İnsansız Hava Araçları (İHA) ise hava taşımacılığı alanında önemli bir dönüşümü temsil etmektedir. Keşif, gözetleme ve lojistik gibi birçok alanda kullanılan İHA'lar,

etkileyici bir manevra kabiliyeti ve hava üstünlüğü sağlayarak operasyonel etkinliği artırabilirler. Bu sayede, acil durum müdahalelerinden tarım alanlarına kadar geniş bir yelpazede uygulama alanına sahiptirler. Özellikle, İHA'lar, afet durumlarında hasar tespiti ve kurtarma operasyonları için hızlı bir şekilde hareket edebilirler (Estrada ve Ndoma, 2019). Tarım sektöründe ise bitki hastalıklarının tespiti, sulama yönetimi ve tarım arazilerinin izlenmesi gibi görevleri yerine getirebilirler (J. Kim ve diğerleri, 2019). Ayrıca, güvenlik ve savunma alanlarında da İHA'lar, sınır güvenliği, keşif, gözetleme ve havaalanı güvenliği gibi önemli görevleri üstlenebilirler (Mohsan ve diğerleri, 2023). Dolayısıyla, İHA'lar hava taşımacılığı alanında sadece bir yenilik değil, aynı zamanda birçok sektörde etkin ve verimli bir araç olarak kabul edilmektedirler. Bu da teknolojinin hava taşımacılığından tarıma, güvenlikten acil durum müdahalelerine kadar geniş bir yelpazede fayda sağladığını göstermektedir.

1.1.3. İnsansız hava araçları sürüsü

Mobil yapıya sahip robotik sistemler karmaşık yapılara sahip görevleri eş zamanlı çalışabilen iş birliği ve koordinasyon içindeki birçok robotu kullanarak tek bir robota göre çok daha hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirebilmektedir (Yıldız ve diğerleri, 2024). Dolayısıyla çoklu robotik sistemler ve sürü robotlar ile koordineli ve kollektif hareketler icra edilerek birçok robotik görev daha etkin bir şekilde tamamlanabilir. Özellikle, sürü robotiği sayesinde sürü üyeleri arasındaki koordinasyon doğru ve etkin bir şekilde sağlandığında, kusurlu veya arızalı sürü üyelerinden kaynaklanan sorunlar tek merkeze bağlı olmayan sürü üyeleri tarafından ortadan kaldırılabilir. Bu, sürü halindeki mobil robotların değişen çevresel koşullara hızlı bir şekilde adapte olmasıyla dinamik ortamlarda çalışma yeteneklerini artırır. Bu durumda, daha küçük ve özelleştirilmiş mobil robotların sürü halinde bir arada çalışması, büyük ve karmaşık olan zorlu görevleri daha makul maliyetler ile gerçekleştirebilmelerine olanak tanır. Ayrıca, belirli sürü formlarını oluşturabilen robotlar geniş alanlara yayılarak farklı bölgelerde eş zamanlı olarak çalışabilirler. Bu da geniş alanlarda yapılması gereken görevleri hızlı bir şekilde tamamlama avantajı sağlar. Bu şekilde, mobil robotlar sürü halinde çalışarak daha etkin, verimli ve adaptif bir şekilde çeşitli görevleri yerine getirebilirler.

Mobil robotların yanı sıra İHA'lar da sivil, ticari ve askeri gibi birçok alanda oldukça popüler hale gelmiştir. Özellikle, İHA'ların elektrikli fanları sayesinde hava kirliliğine neden olmaması ve dikey iniş/kalkış ile üç boyutlu hava sahasını çok verimli

kullanabilmesi önemli avantajlardır. Bu nedenle, mobil ve diğer robot türlerine karşı daha fazla hareket kabiliyeti, sürü robotları için İHA'ları oldukça verimli bir hale getirir. Bu tür hava robotlarının kontrolünde insansız ve otonom bir sistem tasarlandığında bilimde, teknolojiye ve toplumda kullanışlı uygulamalar gerçekleştirilebilir.

Sürü halindeki İHA'lar, farklı boyutlara ve yeteneklere sahip olup birlikte ortak bir hedefi gerçekleştiren, otonom veya yarı otonom kontrolle sürekli iletişimde olan bir grup insansız hava aracını tanımlayan genel bir terimdir (Tahir ve diğerleri, 2019). Günümüzde, robotik endüstrisinde yaşanan gelişmeler sayesinde olgunlaşan ve küçülen İHA'lar, hava taşımacılığından tarım sektörüne, güvenlik operasyonlarından araştırma ve kurtarmaya kadar birçok alanda etkili bir şekilde kullanılan teknolojinin getirdiği önemli bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. Bu araçlar, bir dizi avantaj sunarak çeşitli sektörlerde iş süreçlerini optimize etmekte ve yeni olanaklar yaratmaktadır. Uzaktan gözetim ve keşif yetenekleriyle geniş arazileri veya zorlu bölgeleri detaylı bir şekilde inceleme olanağı sunarak tarım, güvenlik, savunma, lojistik ve taşımacılık gibi çeşitli sektörlerde önemli avantajlar sağlamaktadır (Tahir ve diğerleri, 2019). Bu tür İHA'lar, sosyal böceklerin sürü halinde yaşama modelinden ilham alarak geliştirilmiştir. Doğada gözlemlenen bu organizasyonel yapının, İHA'lar arasında koordineli ve etkili iletişim sağlama, ortak bir amaca hizmet etme ve karmaşık görevleri birlikte yerine getirme yetenekleri, modern teknolojinin getirdiği bilgisayarlı görü teknikleriyle birleştirilmiştir (Chung ve diğerleri, 2018).

Song ve diğerlerinin (2020) belirttiği gibi, Sürü İHA'lar, gelişmiş işlevlere sahip olmalarıyla öne çıkarlar; bu yetenekler, tarım alanlarından orman yangınları izlemeye, sınırların korunmasına ve çeşitli güvenlik operasyonlarına kadar birçok alanda avantaj sağlarlar (Song ve diğerleri, 2020). Örneğin, tarım sektöründe, sürü İHA'lar bitki sağlığının kontrolünde ve güvenlik operasyonlarında etkin bir şekilde kullanılabilir. Tarlaları tarayarak bitki hastalıklarını tespit etmek, tarım verimliliğini artırmak için önemli bir adımdır. Ayrıca, askeri alanlarda da sürü İHA'ların önemi giderek artmaktadır. Modern savaş koşullarında, militanlara karşı etkili saldırılar gerçekleştirebilir, savaş uçaklarının ulaşamadığı bölgelerde avantaj sağlayabilir, sürü halinde otonom harekât gerçekleştirebilir ve kendini savunma yeteneklerine sahip olabilirler (Xiaoning, 2020). Bu özellikleri, savunma stratejilerinde önemli bir dönüşümü simgeler. Ayrıca, sürü İHA'lar, genellikle büyük bir alanda koordineli bir şekilde hareket ederek, hızlı tepki verme ve operasyonel esneklik sağlarlar. Bu da çeşitli sektörlerde, özellikle de askeri ve

güvenlik alanlarında, kritik öneme sahip olan dinamik ve değişken koşullara uyum sağlama yeteneklerini artırır.

Sürü İHA'lar lojistik ve taşımacılık sektöründe de kullanılmaktadır. Küçük paketlerin hava yoluyla hızlı bir şekilde taşınması, özellikle acil tıbbi malzemelerin veya kritik ürünlerin iletilmesinde büyük avantajlar sunar. Sürü İHA'lar, kargo takibi, envanter yönetimi ve depolama gibi lojistik işlemleri de kolaylaştırarak bu sektörde etkili bir çözüm sunarlar (Harik ve diğerleri, 2017; Haishi Liu ve diğerleri, 2022).

Sürü İHA'ların kullanımıyla lojistik ve taşımacılık sektöründe zaman ve maliyet tasarrufu sağlanabilir. Örneğin, geleneksel kara yolu taşımacılığının sık sık karşılaştığı trafik sıkışıklığı ve altyapı kısıtlamaları, hava yoluyla yapılan taşımacılıkta önemli ölçüde azaltılabilir. Bu da lojistik operasyonlarının daha verimli bir şekilde yönetilmesine ve müşterilere daha hızlı teslimat hizmeti sunulmasına olanak tanır. Bu avantajlar, Sürü İHA'ların lojistik ve taşımacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmasını teşvik etmektedir.

İHA'lar başta askeri alan olmak üzere savunma ve saldırı amaçlı yapılan sınıflandırmalarda üzerinde bulundurdıkları teçhizata göre (Enemark, 2013): Silahlı İnsansız Hava Araçları (SİHA)'lar ve Silahsız İnsansız Hava Araçları (İHA)'lar olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır.

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü genelgesinde belirtilen kumanda edilme sistemlerine göre (Milde, 2008): Otonom (Otomatik) İHA'lar ve Uzaktan Kumanda Edilen İHA'lar olmak üzere iki temel sınıfa ayrılmaktadır.

Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'nün İnsansız Hava Aracı Sistemleri Talimatnamesinde belirttiği azami kalkış ağırlıklarına göre (Yardımcı, 2019):

İHA0: Azami kalkış ağırlığı 500 gr (dâhil) – 25 kg aralığında olan İHA'lar,

İHA1: Azami kalkış ağırlığı 4 kg (dâhil) – 25 kg aralığında olan İHA'lar,

İHA2: Azami kalkış ağırlığı 25 kg (dâhil) – 150 kg aralığında olan İHA'lar,

İHA3: Azami kalkış ağırlığı 150 kg (dâhil) ve daha fazla olan İHA'lar olmak üzere dört ayrı sınıfa ayrılmaktadır.

İHA'ların uçuş dinamiğini belirleyen kanat ve pervane yapılarına göre (Vergouw ve diğerleri, 2016): Sabit Kanatlı İHA'lar, Döner (Rotorlu) Kanatlı İHA'lar ve Hibrit Sistemli İHA'lar olmak üzere üç sınıfta toplanmıştır.

Sonuç olarak, sürü İHA'lar, teknolojik gelişmelerin getirdiği yeniliklerle birlikte birçok sektörde önemli bir rol oynamakta, iş süreçlerini optimize etmekte ve insan hayatını kolaylaştırmaktadır. Bu araçların kullanımındaki artış, gelecekte daha fazla

uygulama alanı ve gelişmiş teknolojik çözümlerle birlikte daha etkili operasyonları beraberinde getirecektir. İleriye dönük olarak, sürü İHA'ların daha da yaygınlaşmasıyla birlikte tarım, lojistik, güvenlik, acil yardım ve daha birçok alanda daha verimli, güvenli ve etkili çözümler sağlanabilecektir. Bu önermeler göz önünde bulundurularak, bu tez çalışmasında sürü halindeki İHA'lar için üç boyutlu ortamlarda toplanma, formasyon kontrolü ve yol planlaması gibi ileriye dönük sistemlerin sağlanması için yeni ve hibrit yöntemler araştırılmıştır. Bu çalışmalar, sürü İHA'ların potansiyelini artırmak ve daha etkili bir şekilde kullanılmalarını sağlamak adına önemli bir adımdır.

1.2. Tezin Amacı

İnsansız Hava Araçları, diğer robot türlerine kıyasla daha üstün bir hareket kabiliyetine sahiptir. Bu üstünlük, hızla gelişen robotik teknolojisinin hem donanım hem de yazılım alanındaki katkılarıyla daha da artmaktadır. Donanım ve yazılım alanındaki sürekli yenilikler, İHA'ların hızlı bir şekilde adapte olmalarını, çeşitli görevlere uyum sağlamalarını ve kullanıcı ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilmelerini sağlar. Bu durum, İHA'ların sürü robotları içindeki rolünün giderek önem kazanmasına neden olmaktadır. İHA'lar sürü robotları için daha esnek ve verimli bir teknoloji sunarlar, çünkü birlikte çalıştıkları diğer robotlarla daha iyi bir koordinasyon sağlayabilir ve karmaşık görevleri daha etkili bir şekilde yerine getirebilirler (Lizzio ve diğerleri, 2021). Ayrıca, İHA'ların sürü robotları içindeki rolü, teknolojideki gelişmelere paralel olarak sürekli genişlemektedir. Bu çeşitlilik, İHA'ların sürü robotların kullanım alanlarını genişletirken bu alanlardaki adaptasyon yeteneğini güçlendirmek için de yeni yöntemlere olan ihtiyacı artırır.

Bu tez çalışması, sürü robotiği alanındaki mevcut araştırmaları detaylı bir şekilde inceleyerek, karmaşık ve büyük çaplı görevlerin etkili bir şekilde koordinasyon ve iş birliği içinde yürütülmesi amacıyla sürü halindeki İHA'lar için akıllı bir yol kontrol sistemi geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu sistemler, İHA'ların birbirleriyle senkronize bir şekilde hareket etmelerini ve hedeflere ulaşmalarını sağlayarak operasyonel verimliliği artırabilir. Önerilen akıllı yol kontrol sisteminin, savunma sanayii, sivil hava trafiği yönetimi veya ticari uygulamalar gibi çeşitli alanlarda kullanılabilecek bir yapıda olması öngörülmektedir. Çok yönlülükle yapılan bu çalışmalar, geliştirilen sistemin geniş bir kullanım potansiyeline sahip olmasını ve farklı sektörlerdeki ihtiyaçlara uygun çözümler sunabilmesini sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu tez kapsamında, sürü halindeki İHA'lar arasındaki etkileşimleri, koordinasyonu ve iş birliğini sağlayarak, bu teknolojinin güvenilirliğini ve etkinliğini artırmak öncelikli hedefler arasındadır. Ayrıca, geliştirilen akıllı kontrol sistemi, özellikle İHA'lar arasında veri paylaşımı ve etkileşimin önemli olduğu durumlarda optimal performansı sağlamak üzere tasarlanmıştır. Tez çalışmasının temel odak noktaları, sürü üyesi İHA'ların belirli bir bölgede iş birliği içinde toplanabilme yeteneğinin artırılması, koordineli ve kollektif bir şekilde engellerle çarpışmadan hareket edebilmesi, bulundukları bölgeyi kontrol altında tutabilecek bir formasyon uçuşunu gerçekleştirebilmesi ve önceden belirlenmiş bilinen veya bilinmeyen hedeflere etkili bir şekilde ulaşabilmesidir.

Buna ek olarak, geliştirilen akıllı kontrol sisteminin genel İHA uygulama alanlarına yönelik olacak şekilde tasarlanması planlanmaktadır. Bu bağlamda, sistem, askeri stratejilerden sivil güvenlik operasyonlarına, ticari sahalardan acil durum müdahalelerine kadar geniş bir yelpazede kullanılabilecek şekilde konfigüre edilmiştir. Dolayısıyla, sürü halindeki İHA'ların bu denli çeşitli uygulamalarda etkili bir şekilde kullanılabilmesi için gereken akıllı kontrol sisteminin tasarımına ve geliştirilmesine odaklanarak, bu alanda değerli bir katkı sağlamak hedeflenmektedir. Bu yaklaşım, İHA teknolojisinin genişlemiş kullanım alanlarında etkili bir şekilde entegrasyonunu desteklerken, farklı sektörlerdeki ihtiyaçlara yönelik çözümler sunarak teknolojinin potansiyelini artırmayı amaçlar. Bu, sürü İHA'ların çeşitli sektörlerde daha etkili ve verimli bir şekilde kullanılabilmesine olanak tanıyarak, genel olarak havacılık ve insansız sistemler alanındaki ilerlemelere katkı sağlayacaktır.

1.3. Tezin Önemi

Sürü robotiği, birden fazla robotun bir hedefi gerçekleştirmek üzere birlikte çalışmak için tasarlanan robotların oluşturduğu bir sistemdir. Doğadaki sürü davranışlarından ilham alarak modellenen bu teknoloji, robotların birbirleriyle etkileşim kurup koordineli hareketler yapmalarını sağlar. Bu alandaki araştırmalar sonucunda yapılan çalışmalar, sürü içindeki etkileşimleri ve koordinasyonu optimize etmeye odaklanır (Sujit ve diğerleri, 2008). Sürü robotiği, çeşitli uygulama alanlarında kullanılarak önemli bir teknolojik gelişme alanı oluşturur ve gelecekteki robotik sistemler için daha da büyük bir rol oynayacaktır.

Sürü robotiği çalışmalarında, çok sayıda robot arasındaki iş birliği, koordinasyon ve iletişim kavramları ön plana çıkmaktadır (Mohan ve Ponnambalam, 2009; Yogeswaran ve Ponnambalam, 2010). Eş zamanlı çalışan çok sayıdaki sürü üyeleri, karmaşık yapıya sahip bir robotun yapacağı görevi çok daha hızlı bir şekilde gerçekleştirebilir (Bayındır ve Şahin, 2007; Bayındır, 2016). Ayrıca sürü üyelerinin, sürü üyeleri arasında yayılmış merkezi olmayan bir kontrol mekanizmasının olması hem robotik arızaların sisteme olan etkisini ortadan kaldıracaktır hem de görev hatasını diğer sürü üyelerinin yardımıyla azaltabilir (Bayındır, 2016).

Günümüzde sivil, ticari ve askeri alanlarda kullanılan İHA'lar oldukça popüler hale gelmiştir. Özellikle mobil ve diğer robot türlerine karşı hareket kabiliyetinin daha geniş olması İHA'ları sürü robotiği için oldukça verimli hale getirmektedir. Öte yandan, dinamik ortam şartları göz önünde bulundurulduğunda İHA'ların kontrolü diğer robot türlerine göre daha zorlayıcı olabilmektedir. Sürü İHA'ların birlikte hareket etmesi gerektiği için her bir İHA'nın düzgün bir şekilde senkronize olması ve karmaşık algoritmalarla yönlendirilmesi gerekmektedir. Bu da İHA kontrol sistemlerinin geliştirilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Büyük bir İHA sürüsünde, tüm İHA'ların birbirleriyle doğru ve güvenilir bir şekilde iletişim kurmaları gerekmektedir. İletişim kesintileri veya gecikmeleri, sürü İHA operasyonlarını etkileyebilir.

Ayrıca, İHA'ların güvenlik tehditlerine karşı korunması da bir başka önemli zorluktur. İnternete bağlı olmaları nedeniyle, İHA'lar siber saldırıların hedefi olabilir ve kontrol edilemez hale gelebilirler. Bu nedenle, güvenlik önlemlerinin sürü İHA sistemlerine entegre edilmesi gerekmektedir. Tüm bu zorluklar, sürü İHA teknolojisi üzerinde çalışan mühendisler için çözülmesi gereken önemli sorunları oluşturmaktadır. Dolayısıyla, koordineli ve iletişim halinde olan kolektif bir İHA sürüsü için oluşturulacak akıllı bir yol kontrolü mekanizması başlıca askeri, sivil ve ticari alanlar olmak üzere birçok uygulamada önemli avantajlar sağlayacaktır.

Sürü robotiğinde gerçekleştirilecek olan kolektife ve konsensüse dayalı davranışlar kendiliğinden ortaya çıkan belirli bir düzen veya hiyerarşi içinde olmayan sosyal davranışlar ile benzerlik göstermektedir (Campion ve diğerleri, 2019). Dolayısıyla, bazı üyelerin arızalanmasına rağmen sistemin çalışmaya devam edebilecek kadar sağlam olması (Jung ve Ariyur, 2011), dinamik ortam değişimine karşı sürü üyelerinin iç parametrelerini ortama göre uyarlayabilecek kadar esnek olması (Sampedro ve diğerleri, 2016) ve sürünün kendi sisteminin farklı sayıda üyesi ile çalışabilecek kadar ölçeklenebilir olması (Sujit ve diğerleri, 2008) sürü halindeki robotik sistemlerden

beklenen özelliklerdir. Her ne kadar literatürde sürü halindeki İHA'lar için çeşitli kümelenme (Soysal ve Şahin, 2005), formasyon oluşturma (Kuriki ve Namerikawa, 2014; T. Nguyen ve diğerleri, 2018), takip (Ma'Sum ve diğerleri, 2013), izleme (Garcia-Aunon ve Barrientos Cruz, 2018; Garcia-Aunon ve diğerleri, 2019; Roldán-Gómez ve diğerleri, 2022) ve yiyecek arama (Lu ve diğerleri, 2018) gibi konularda çeşitli çalışmalar yapılsa da sistem tasarımı ve gerçek zamanlı uygulama kısıtlarından dolayı bu konu problem olarak karşımıza çıkmaya devam etmektedir.

Otonom araç teknolojilerinde meydana gelen donanımsal gelişmelerle birlikte İHA'larda kullanılan kartların hem işlem kapasitesi hem de işlem hızı her geçen gün artmaktadır. Dolayısıyla, bu gelişmelerle birlikte sürü halinde kullanılacak bir İHA topluluğu çok daha elverişli görevlerde kullanılabilecektir. Bu da, sürü yönetiminde akıllı bir kontrol sisteminin kullanılmasına olan ihtiyacı önemli ölçüde ön plana çıkarmaktadır.

Bu tez çalışması, sürü halindeki İHA'ların karmaşık görevleri başarıyla yerine getirmesini sağlamak amacıyla geliştirilen sistemlerin tasarımını ve uygulanabilirliğini incelerken, son teknolojik gelişmeleri ve alandaki en güncel yenilikleri göz önünde bulundurmaktadır. Bu çerçevede, hedef arama, tespit etme ve takibi, iş birlikçi haritalama ve lokalizasyon ve yol planlaması gibi sürü İHA robotiği konusundaki sistemlerin tasarımı ele almaktadır. Ayrıca, çalışma, sürü İHA'ların farklı senaryolarda nasıl kullanılabileceğini ve gelecekteki potansiyel uygulamalarını da araştırmaktadır.

Bu tez kapsamında yapılan araştırmalar ve incelemeler sonucunda, daha verimli İHA sürüleri için hala problem olan konulara yönelik yeni yöntemler ve algoritmalar önerilmektedir. Önerilen yöntemlerde, ortam içerisinde veya dışarısında dağınık bir şekilde bulunan sürü İHA'lar için uçuş sırasında üye kaybına rağmen beklenen görevi başarıyla gerçekleştirebilen sağlam bir sürü topolojisi geliştirilmiştir. Ek olarak, önerilen akıllı yol planlama algoritması ile herhangi bir nedenle bozulan uçuş formasyonuna anında tepki verebilen ve yeni uçuş formasyonları oluşturabilen esnek bir sürü topolojisi tasarlanmıştır. Bu sayede, sürü İHA'lar hedefe ulaşma süreçlerinde daha dirençli ve etkili bir performans sergileyebilecekleri gibi, olası problemlere karşı hızlı bir şekilde adapte olabilecekleri bir sistem geliştirilmiştir.

Söz konusu algoritmanın tasarımı, sürü halindeki İHA'ların etkili bir şekilde koordinasyon sağlaması, engelleri başarılı bir şekilde aşması ve belirlenmiş hedeflere güvenli bir biçimde varabilmesi üzerine odaklanmıştır. Algoritma, çeşitli senaryolarda, farklı ortam haritalarında ve değişen ortam şartlarında başarılı bir şekilde çalışabilme yeteneğiyle donatılmıştır. Bu, sürü İHA'larının gerçek dünya uygulamalarında

karşılaşılabilecekleri çeşitli senaryolara adapte olabilme yeteneklerini güçlendirmesini sağlayacaktır.

Geliştirilen akıllı kontrol sistemi ise farklı sektörlerin ve alanların ihtiyaçlarına uygun olarak özelleştirilebilecek bir esneklik sunacaktır. Bu özellik, askeri stratejik operasyonlarda güvenlik, sivil güvenlik operasyonlarında halkın korunması, ticari alanlarda lojistik yönetimi veya acil durum müdahalelerinde hız ve etkinlik gibi farklı gereksinimleri karşılamak amacıyla sistemin geniş bir kullanım yelpazesine adapte edilebileceği anlamına gelir.

Özetle, bu tez çalışması, geliştirilen akıllı yol kontrol algoritması aracılığıyla, sürü İHA'ların çeşitli uygulamalarda daha sağlam, güvenilir, esnek ve ölçeklenebilir bir şekilde kullanılabilmesine katkı sağlayarak, bu teknolojinin geniş bir kullanım alanına yayılmasına olanak tanıyacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Robotik sistemler, günümüz teknolojisinin en dinamik ve hızla gelişen alanlarından biridir. Bu sistemler, sensörler, aktüatörler, kontrol üniteleri ve yazılımlar gibi bileşenlerden oluşur ve genellikle endüstriyel otomasyon, tıp, tarım ve hizmet sektörlerinde kullanılır. Bu bileşenler, robotların çevrelerini algılamalarını, belirli görevleri yerine getirmelerini ve karmaşık işlemleri bağımsız olarak yönetmelerini sağlar. Özellikle sensörler ve aktüatörler, robotların fiziksel dünyayla etkileşime girmesine olanak tanırken, kontrol üniteleri ve yazılımlar bu etkileşimlerin doğru ve verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlar.

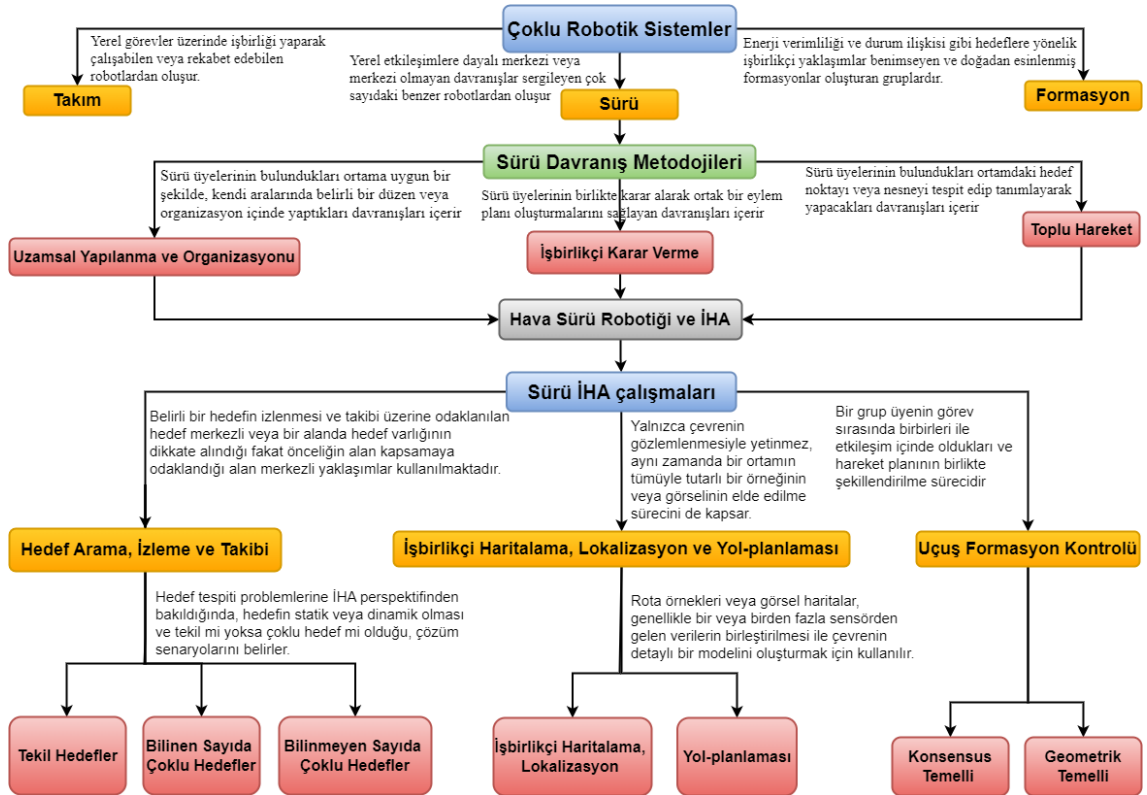
İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), robotik sistemler arasında özel bir yere sahiptir. İHA'lar, genellikle dört ana bileşenden oluşur: hava taşıtı (drone), uçuş kontrol sistemi, yer kontrol istasyonu ve iletişim sistemi. Hava taşıtı, fiziksel hareketi sağlayan yapı olup, uçuş kontrol sistemi, İHA'nın stabilitesini ve hareketini düzenler. Yer kontrol istasyonu, operatörün İHA'yı yönlendirmesine olanak tanırken, iletişim sistemi, İHA ile yer kontrol istasyonu arasındaki veri alışverişini sağlar. Bu bileşenlerin bir araya gelmesi, İHA'ların belirli görevleri, özellikle de tehlikeli veya erişilmesi zor bölgelerde, güvenli ve etkili bir şekilde yerine getirmesini mümkün kılar.

İHA'lar, çeşitli endüstrilerde robotik sistemlerin uygulanabilirliğini genişletmiştir. Özellikle tarım, arama kurtarma, haritalama ve güvenlik alanlarında İHA'lar, hızla veri toplama ve analiz etme yetenekleri sayesinde önemli avantajlar sunar. Tarımda, bitki sağlığını izlemek ve ürün verimliliğini artırmak için kullanılırken, arama kurtarmada, afet bölgelerinde hızlı tarama ve yardım ulaştırma için kullanılır. Haritalamada, büyük alanların yüksek çözünürlüklü görüntülerini yakalayarak detaylı analizler yapılmasını sağlar. Güvenlikte ise sınır gözetimi ve riskli bölgelerde devriye görevlerini üstlenir. Böylece, İHA'lar, robotik sistemlerin esnekliğini ve kullanım alanlarını önemli ölçüde artırarak, modern teknolojinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir.

Sürü İHA'lar, bireysel İHA'ların kolektif bir şekilde hareket ettiği, birbirleriyle koordinasyon içinde çalışarak karmaşık görevleri daha verimli ve etkili bir şekilde yerine getirebildiği gelişmiş robotik sistemlerdir. İHA sürüleri, robotik sistemler içerisinde mobil yapılara sahip otonom kontrol yöntemleri içeren robotlar grubu olarak sınıflandırılabilir. Bu sistemlerde, her bir İHA, merkezi bir kontrol birimi yerine dağıtık bir yapıya sahiptir ve bu sayede sürü içerisindeki diğer İHA'larla sürekli iletişim halinde

olup, dinamik çevre koşullarına hızlı bir şekilde uyum sağlayabilir. Sürü İHA'lar, tarım alanlarında geniş arazilerin eş zamanlı olarak izlenmesi, afet bölgelerinde hızlı arama kurtarma operasyonları ve askeri uygulamalarda büyük bölgelerin güvenliğinin sağlanması gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bu sistemler, iş birliği ve görev paylaşımı yoluyla operasyonel verimliliği artırmakta, tek bir İHA'nın gerçekleştiremeyeceği görevlerin üstesinden gelinmesini sağlamaktadır. Sürü İHA'lar, robotik sistemlerin yeteneklerini ve potansiyel uygulama alanlarını genişleterek, geleceğin teknolojik çözümlerinde kilit bir rol oynamaktadır.

Bu tez kapsamında incelenen literatür araştırmalarında sürü İHA sistemlerinin Çoklu Robotik Sistemlerin (ÇRS) bir alt dalı olduğu görülmüştür. ÇRS için önerilen Sürü Davranış Metodolojileri (SDM) hava sürü robotiği ile İHA'lar için uyarlanmış ve yeni yöntemler ortaya konmuştur. Bu bölümde ÇRS için uygulanmış SDM (uzamsal yapılanma ve organizasyonu, toplu hareket ve işbirlikçi karar verme gibi) ve buna bağlı gelişen sürü İHA çalışmalarındaki hedef arama, izleme ve takibi, uçuş formasyon kontrolü ve iş birlikçi haritalama, lokalizasyon ve yol-planlaması konularında yapılan çalışmalar incelenmiştir. Literatür kapsamında incelenen sürü İHA çalışmalarının bağlamı Şekil 2.1'deki gibi görselleştirilebilir.



Şekil 2.1. Sürü İHA çalışmalarının literatür araştırmaları kapsamındaki yeri

2.1. Çoklu Robotik Sistemler

Teknolojik gelişmelerle birlikte, endüstriyel robotlardan farklılaşarak hareket alanları oldukça genişleyen mobil robotların belirli amaçlar için bir arada kullanılması Çoklu Robotik Sistemleri (ÇRS) temelini oluşturmaktadır. Bu sistemlerin temel amacı, birden fazla robotun belirli bir görevi farklı bölgelerdeki tek bir mobil robottan eş zamanlı olarak daha hızlı ve verimli bir şekilde iş birliği içinde gerçekleştirebilmesini sağlamaktır (Nedjah ve Junior, 2019). Ayrıca, sistemde bulunan birden fazla robot, görev süresince oluşabilecek hatalara karşı daha dayanıklı bir yapı oluşturabilir.

ÇRS, robotların sayısına ve etkileşimlerine bağlı olarak takım, formasyon ve sürü olarak sınıflandırılabilir (Chung ve diğerleri, 2018). Sistem modellemeleri, bu sınıflandırma çerçevesinde karar verme mekanizmasının seçimine, iletişim topolojisine ilişkin varsayımlara, kontrol girdilerinin ve bilgi alışverişinin doğasına bağlı olarak yapılabilir (Chung ve diğerleri, 2018). Takım halindeki robotik sistemlerde, her bir takım üyesi yerel bir görev üzerinde çalışır ve bu görevi en üst düzeye çıkarmaya çalışır. Bu üyelerin davranış stratejileri, her bir görevi yerine getirdiklerinde bu görevleri kapsayan asıl görevin en üst seviyede gerçekleştirilmesini iş birlikçi bir şekilde sağlayabilir (Zavlanos ve diğerleri, 2008). Ancak bazı durumlarda, görev sırasında takım üyeleri arasında çatışmalar yaşanabilir ve rekabet ortaya çıkabilir. Bu rekabet sonucunda her bir görevin en üst düzeye çıkarılması da sağlanabilir (Chung ve diğerleri, 2018).

Formasyon sınıfında, takım halindeki çoklu robotik sistemlerin aksine, üyeler arasındaki durum ilişkisi ve enerji verimliliği gibi hedefler temel alındığından rekabetçi yaklaşımdan ziyade iş birlikçi yaklaşımlar kullanılır (Seiler ve diğerleri, 2003). Bu yaklaşım, genellikle doğadaki iş birliği örneklerinden ilham alır. Özellikle, aerodinamik kuş sürülerinin formasyonları gibi belirli hayvan kolonilerinin davranışları, bu robotik sistemlerin tasarımında önemli bir rol oynar (Seiler ve diğerleri, 2003). Kuş sürüsü formasyonları, bireysel üyelerin enerji tasarrufu sağlamak için kolayca takip edebilecekleri ve aerodinamik avantajlar elde edebilecekleri düzenler sunar. Bu nedenle, V-tipi formasyonlar gibi doğadan esinlenmiş oluşumlar, formasyon sınıfındaki çoklu robotik sistemler için özellikle çekici hale gelmiştir (Seiler ve diğerleri, 2003). Bu tür formasyonlar, robotların iş birliği yaparken enerji verimliliğini artırırken aynı zamanda durum ilişkilerini optimize etmelerine olanak tanır.

Diğer bir sınıf olan sürü ise genel olarak üyeler arasındaki yerel etkileşimlerden ortaya çıkan, hareket boyunca durumlara bağlı olarak merkezi veya merkezi olmayan

davranışları sergileyen benzer üyelerin oluşturduğu bir grubu ifade etmektedir. Sürü üyeleri arasındaki yerel etkileşimler, görev özelinde rekabetçi veya iş birlikçi nitelik taşıyabilir. Bu sınıftaki sistemlerde, her üye genellikle benzer bilgilere ve yeteneklere sahiptir, ancak hareket ederken durumlarına göre farklı davranışlar sergileyebilirler. Tipik olarak, sürü dinamikleri, çevreleriyle etkileşim içinde olan üyelerin kararlarını ve hareketlerini içerir. Her ne kadar tipik bir sürünün büyük bir robot grubundan oluştuğu öne sürülse de, birçok araştırma daha küçük grupları da bu sınıfa dahil etmek için sürü terimini kullanmaktadır (Khelifi ve Butun, 2022). Bu durum, sürü algoritmalarının ve davranışlarının genellikle büyük ölçekli uygulamalara odaklanmasına rağmen, daha küçük ölçekteki grupların da benzer dinamikleri sergileyebileceğini ve bu tür sistemlerin de sürü sınıfına uygun olabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, sürü sistemleri, çeşitli ölçeklerde ve uygulamalarda kullanılabilirliklerini genişletmektedir.

Son zamanlarda yapılan çalışmaların etkisiyle, takım ve formasyon sınıflarını da kapsayacak şekilde takım halinde ve belirli bir formasyon şekli ile hareket eden etkili sürü sistemleri ortaya konmaya çalışılmaktadır (Nedjah ve Junior, 2019). Bu yaklaşım ile, sürü sistemlerinin temel dinamikleri ve koordinasyonu takım ve formasyon kavramlarıyla birleştirilerek daha karmaşık ve etkili sistemlerin tasarımı hedeflenmektedir. Özellikle, bu tür sistemlerde her bir robot hem takımın hem de belirlenmiş bir formasyonun bir parçası olarak hareket eder, bu da daha iyi koordinasyon, hedefe yönelik hareket ve görev başarısını sağlayabilir. Ayrıca, doğada bulunan canlılardan esinlenerek uzamsal yapılanma ve organizasyon, toplu hareket ve iş birlikçi karar verme gibi Sürü Robotiği Davranış Metodolojileri (SRDM) üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir (Brambilla ve diğerleri, 2013). Bu metodolojiler, sürü sistemlerinin temel prensiplerini anlamak ve robotik sistemlerde uygulamak için doğadan ilham alır. Özellikle, karıncaların toplu hareketi, bal arılarının kovan içi organizasyonu gibi doğadaki örnekler, robotik sistemlerde etkili ve verimli davranışların tasarımında önemli bir rol oynar. Bu nedenle, SRDM, sürü sistemlerinin daha karmaşık ve adaptif hale gelmesini sağlayarak çeşitli uygulamalarda kullanılabilirliğini artırabilir.

2.2. Sürü Robotiği Davranış Metodolojileri (SRDM)

Sürü davranışları genellikle karmaşık gerçek dünya sorunlarına daha yakın olan görevleri içerir. Bu tür karmaşık davranışları kontrol etmek için doğadaki, hayvanlardaki

ve böcek topluluklarındaki hareketler referans alınabilir. Genel hatlarıyla, sürü davranış metodolojileri üç grupta incelenebilir (Brambilla ve diğerleri, 2013).

İlk grup, robotların bulundukları ortam şartlarına göre kendi aralarında veya ortama uygun bir şekilde belirli bir düzende veya organizasyon içinde oluşturdukları uzamsal yapılanma veya organizasyonu içerir (Brambilla ve diğerleri, 2013). Bu grup, sürü üyelerinin fiziksel konumlarını, hızlarını ve hareket yönlerini koordine ederek belirli bir formasyonda hareket etmelerini sağlar. Örneğin, kuş sürüsü gibi bir formasyon oluşturarak aerodinamik avantajlar elde edebilirler.

İkinci grup, sürü üyelerinin bulundukları ortamdaki hedef noktayı veya nesneyi tespit edip tanımlayarak yapacakları toplu hareketi kapsar (Brambilla ve diğerleri, 2013). Bu grup, sürü üyelerinin ortak hedeflere ulaşmak için birlikte hareket etmelerini sağlar. Örneğin, bir grup arı, bir çiçeğin konumunu belirleyerek bir araya gelip nektar toplamak için o yöne doğru hareket edebilir.

Üçüncü grup ise iş birlikçi karar verme veya konsensüstür (Brambilla ve diğerleri, 2013). Bu grup, sürü üyelerinin birlikte karar alarak ortak bir eylem planı oluşturmalarını içerir. Örneğin, karıncalar, yiyecek kaynaklarını bulmak ve taşımak için kolektif olarak karar alabilirler.

Bahsi geçen bu sürü davranışlarının her biri İHA sürü sistemleri için temel niteliğindedir. Bu temel sürü davranışları, sürü robotiği alanında çeşitli araştırma ve geliştirme faaliyetlerine ilham vermektedir. İleri düzey algoritmalar ve teknolojiler, sürü üyelerinin çevresel değişikliklere adapte olmasını, hızlı kararlar almasını ve karmaşık görevleri yerine getirmesini sağlar. Bu sürü davranışları, sonraki alt başlıklarda ayrıntılı bir şekilde incelenir ve her biri İHA sürü sistemlerinin tasarımı ve uygulanması için önemli bir rol oynar.

2.2.1. Uzamsal yapılanma ve organizasyonu

Sürünün uzamsal yapılanma ve organizasyonu belirlemek için üyeler arasındaki iletişim mesafesinin değişiminden faydalanılabilir. Üyeler arasındaki mesafeyi azaltarak bir toplanma/yığılma görevi gerçekleştirilebilir. Uzamsal yapılanma ve organizasyonlarda uygulanan toplanma görevi başlangıçta çevreye dağılmış olan sürü üyelerinin aynı bölgede birbirlerine yakınlaşmak için bir araya gelmeleridir. Sürü sistemlerindeki toplanma davranışı böcek sürülerinde sıkça karşılaşılan basit bir kolektif davranıştır (Bonabeau ve diğerleri, 1997). Bu davranışlar genellikle bal arıları (Bodi ve

diğerleri, 2012), hamam böcekleri (Garnier ve diğerleri, 2009), ateş böceği (H. C. Kim ve diğerleri, 2013) ve karınca kolonileri (Cekmez ve diğerleri, 2018) gibi böceklerden esinlenerek oluşturulan algoritmalar ile robotik sistemlere uyarlanır. Bal arıları sıcaklığın yüksek olduğu yerlerde hareketsiz kalarak toplanma eğilimi gösterir. Hamam böcekleri sıcaklık yerine karanlığın yoğun olduğu bölgelerde toplanma eğilimi gösterirken ateş böcekleri ise parlak bölgelerde toplanma eğilimindedir. Karınca kolonileri ise arkalarında bıraktıkları feromon adlı salgının yoğunluğunu takip ederek toplanma görevi gerçekleştirir. Yukarıda bahsi geçen durumlarda, dışardan gelen bilgi ile sürü üyeleri arasındaki iletişim desteklendiğinde koordineli davranışların oluşması sağlanabilir. Toplama görevi için uygulanan algoritmalar, kapsama (Alsammak ve diğerleri, 2022) ve formasyon oluşturma (Ouyang ve diğerleri, 2023) gibi çok sayıda robota ihtiyaç duyulan diğer görevler için de faydalı olabilir.

Uzamsal yapılanma ve organizasyonlarda uygulanan toplanma görevinin tersine, üyeler arasındaki mesafeyi artırarak görev bölgesi üzerinde belirli noktaları kontrol altına alarak bir kapsama görevi gerçekleştirilebilir. Diğer bir ifadeyle, kapsama görevi sürünün dağıtılması ve dağılırken keşfedilen bölgede aralarındaki bağlantıyı kaybetmemesinin gerekli olduğu bir görevdir. Bu görevde, robotlar, çevre bilgisine ihtiyaç duymadan belirli bir alanı eşit şekilde kaplamak için yayılmalıdır. Bilinmeyen bölgeleri haritalamak ve sürüyü bir sensör ağı olarak kullanmak gibi pek çok pratik uygulamada yararlı olabilir (Nedjah ve Junior, 2019).

Kapsama görevi üzerine yapılan sürü çalışmalarında üyeler arasındaki kablosuz sinyalin yoğunluğu baz alınarak robotlar arasındaki mesafenin tahmin edildiği bazı fiziksel çalışmalar mevcuttur (Ludwig ve Gini, 2006; Ugur ve diğerleri, 2007). Bunun haricinde, sürü robotları için geliştirilen potansiyel alanlar (Maruyama ve Tatsukawa, 2017) ve sanal kuvvetler (Sallam ve Baroudi, 2015) gibi farklı kavramları ve bu kavramların kombinasyonlarını (Howard ve diğerleri, 2002; Sallam ve diğerleri, 2016) öneren çalışmalar da bulunmaktadır. Ayrıca, kapsama görevi için yapılan pek çok çalışmada (Broecker ve diğerleri, 2015; Caliskanelli ve diğerleri, 2015; Deshpande ve diğerleri, 2017), toplanma görevinde olduğu gibi, sürü üyeleri arasındaki kapsama mesafesini kontrol etmek için böceklerin kullandığı sürü iletişimi tercih edilmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda temel hedef, robotların sürü içindeki bağlantıyı koparmadan kapsanacak alanı en üst düzeye çıkarmasıdır. Bu yaklaşımlar, sürü robotiğinde kapsama görevlerinin etkili bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlar ve çeşitli endüstriyel ve askeri uygulamalarda kullanılabilir.

Uzamsal yapılanma ve organizasyonu sağlamak için, toplanma ve kapsama görevlerinin yanı sıra robotların kendi hareketlerini yeniden düzenlemelerini gerektiren formasyon oluşturma görevi de gerekebilir. Formasyon oluşumundaki temel prensip, robotların konumlarını yerel etkileşimler yoluyla ayarlayarak düzenli ve tekrarlayan bir formasyon yapısı oluşturmaktır. Bu bağlamda, literatürde doğadan esinlenmiş farklı yöntemler, doğada kendi kendine organize olmuş bal arısı, bakteri ve karınca kolonileri gibi örneklerden alınmıştır (Nedjah ve Junior, 2019). Bu yöntemler, sürü robotlarının belirli bir formasyon içinde hareket etmelerini ve belirli bir düzende konum almalarını sağlayarak etkili bir şekilde koordinasyonlarını artırır.

Bunun yanı sıra, fizik kurallarını temel alarak sürü robotığının kontrolünü merkezi veya merkezi olmayan yöntemlerle sağlayan çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin, kafes veya geometrik şekil tipindeki sürü robotları arasında komşularının göreceli konumunu bilen robotların çekme ve itme kuvvetlerine dayalı uygulamalar yaygın olarak kullanılmaktadır (Carli ve diğerleri, 2020; Lionis ve Kyriakopoulos, 2009; Yamashita ve Suzuki, 2010). Bu yaklaşımlar, sürü robotlarının belirli bir formasyon içinde hareket etmelerini ve belirli bir düzende konum almalarını sağlamak için fiziksel etkileşimleri kullanmaktadırlar. Bu şekilde, formasyon oluşturma görevi, sürü robotlarının birlikte çalışarak karmaşık görevleri yerine getirmelerini sağlayan önemli bir bileşen haline gelir.

2.2.2. Toplu hareket

Sürü robotığında, genellikle mobil yapıya sahip cihazlar olarak işlev gören üye robotlar, çeşitli ortamlarda hareket edebilen tekerlekli, paletli veya ayaklı kara, hava veya su altı robotlarıdır. Zorlu görevler için sürü halinde hareket edecek robotların görevleri arasında bireysel veya toplu bir şekilde engellerden kaçınma ve diğer robotları veya nesneleri tespit etme gibi görevler yer almaktadır. Bu tür görevler, kendi kendini organize etme yani sürü içerisinde yeniden düzenleme gibi sürünün fiziksel olarak yer değiştirmesinin gerekmediği uzamsal yapılanma ve organizasyon görevlerinin aksine genellikle bir yerden başka bir yere koordineli ve kolektif bir şekilde hareket etmeyi hedeflemektedir (Nedjah ve Junior, 2019).

Bu bağlamda, toplu hareket görevleri iş birliği keşif, nesne tespiti ve takibi, taşıma ve ulaştırma, yiyecek arama ve sürü navigasyonu gibi sürü hareketine dayalı çeşitli görevleri içermektedir. Bu görevler, sürü robotlarının birlikte çalışarak çeşitli ortamlarda karmaşık görevleri yerine getirmelerini sağlamaktadır. Örneğin, bir grup İHA, bir

bölgedeki belirli nesneleri tespit etmek ve izlemek için iş birliği yapabilir veya bir grup deniz altı robotu, su altındaki belirli bir bölgede keşif yapmak için bir araya gelebilir. Böylece, sürü robotlarının toplu hareket yetenekleri, çeşitli uygulamalarda kullanılarak sürü problemlerine etkili ve esnek çözümler sunabilir.

Toplu hareketlerin yoğun olduğu sürü robotiği uygulamalarında, en temel zorluklardan biri ortam keşfidir. Sürü olarak gerçekleştirilen iş birlikçi keşif görevleri, tek bir robotun performansını aşar; çünkü birden fazla üyenin katılımıyla daha hızlı ve sensör verisindeki hatalara karşı daha dirençlidirler. İş birlikçi keşif görevlerinin ana hedefi, robotlar tarafından toplanan bilgilerin birleştirilmesiyle sürü veya üyeler için alternatif rotaları içeren ve bu bilgiyi paylaşan bir harita oluşturmaktır. Ancak, sürü keşfiyle ilgili avantajların yanı sıra, üyelerden gelen bilgilerin çelişkili olabileceği gerçeği, tek bir robotla yapılan keşiflere kıyasla daha karmaşık ve zorlayıcı bir süreç oluşturur. Yapılan iş birlikçi keşif çalışmalarının en popüler olanları çoğunlukla robotun kendi çevresindeki alanın haritasını oluşturduğu eş zamanlı lokalizasyon ve haritalama (Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)) yöntemidir (Saeedi ve diğerleri, 2016). Sürü üyesi robotlar daha sonra bu haritayı kullanarak kendisini konumlandırabilir ve diğer uygulamalarda bu bilgiyi kullanabilir. SLAM yöntemi, sürü robotlarının çevrelerini keşfetmek ve konumlarını belirlemek için kullanılan etkili bir yöntemdir.

Bunun dışında, sürü robotlarının koordineli hareketini sağlamak için Reserves, Divide and Conquer, Buddy System (Nieto-Granda ve diğerleri, 2014) ve Frontier-Based Exploration Strategies (Y. Wang ve diğerleri, 2011) gibi farklı stratejiler de öne sürülmüştür. Bu stratejiler, sürü robotlarının etkili bir şekilde hareket etmelerini sağlayarak keşif görevlerinde daha iyi performans elde etmelerine yardımcı olur. Bu çeşitli stratejiler, farklı koşullara ve görevlere uygun olarak sürü robotlarının etkili bir şekilde yönetilmesine ve kontrol edilmesine olanak sağlar.

Sürü robotiğinde, toplu hareketin belirgin olduğu zorlu problemlerden biri yiyecek arama görevleridir. Bu kavram, özellikle karınca kolonileri gibi sosyal böceklerin sürü hareketinin önemli bir bileşenidir. Böcekler, yiyecek arama görevi sırasında çevreyi etkili bir şekilde keşfederler ve buldukları yiyecekleri yuvalarına en kısa yolu kullanarak taşırlar. Sürü halindeki robotlar, yiyecek arama görevinde hedeflenen nesneyi diğer nesnelerden ayırt ederek ve aralarında çarpışmadan belirlenmiş bir yere taşımak üzere iş birliği yaparlar. Bu şekilde, sürü robotları verimli bir şekilde çalışarak karmaşık görevleri başarıyla yerine getirebilirler.

Yiyecek arama, tipik bir böcek kolonisi davranışı olduğundan, robotik alanında yapılan çalışmaların çoğu da bu davranışlardan esinlenmiştir. Hoff ve ekibi, karınca davranışlarından ilham alarak Sanal Feromon ve Kardinalite adını verdikleri iki merkezi olmayan yiyecek arama algoritması önermektedirler (Hoff ve diğerleri, 2013). Benzer şekilde, Meng ve diğerleri tarafından Doğrudan Karınca Kolonisi Toplayıcılığı (Direct Ant Colony Foraging (DACF)) modeli önerilmiştir (Meng ve diğerleri, 2012). Bu çalışmalar, karıncaların yiyecek arama ve toplama sürecindeki doğal davranışlarını temel alarak, sürü robotlarının etkili bir şekilde yiyecek aramasını sağlamayı amaçlamaktadır.

Lee ve ekibi (2013), enerji verimliliğini artırmak amacıyla arama alanını ve iş bölümünü bölümlendirerek, bal arılarından ilham alan bir model sunmaktadır (Lee ve diğerleri, 2013). Geuther ve ekibinin (2012) önerisi, yiyecek arama hedefini çözmek için çift ajanlı bir ÇRS kullanır ve bu sistem, izcilerin arama ve yol planlaması için Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization (PSO)) ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization (ACO)) yaklaşımlarını bir araya getirir (Geuther ve diğerleri, 2012). Bu çalışmalar, sürü robotlarının yiyecek arama görevlerini doğadan esinlenerek ve çeşitli optimizasyon yöntemleriyle daha etkili bir şekilde gerçekleştirmesini sağlayabilir (Zedadra ve diğerleri, 2017). Ancak, robotların kolektif davranışları en verimli şekilde gerçekleştirebilmesi, mühendislik açısından hala zorlu bir uygulamadır. Bu konuda ileri düzeyde teknolojik gelişmeler ve karmaşık algoritmalar gerekmektedir. Bu nedenle, sürü robotlarının yiyecek arama gibi önemli görevleri başarıyla yerine getirebilmesi için gelecekte daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmalarına ihtiyaç vardır.

Robotların sürü halinde hareketi sırasında hedeflere yönelik hareketleri genellikle birbirinden bağımsız olabilir ancak bazı durumlarda iletişim içinde olmaları gerekebilir. Özellikle sürü robotlarının saldırı, savunma veya nakliyat gibi toplu ve koordineli bir harekete ihtiyaç duyduğu görevlerde, formasyon kontrolü kavramları önem kazanır (Ouyang ve diğerleri, 2023). Uzamsal yapılanma ve organizasyonu sürü davranışlarında formasyon oluşturma temel görev niteliği taşıırken toplu hareket metodolojisinde oluşturulan formasyonun kontrolü gerekmektedir. Bu bağlamda formasyon kontrolü toplu hareket davranışlarının en önemli alt görevlerinden biridir.

Formasyon kontrolü, bir grup bireyin görev sırasında birbirleri ile etkileşim içinde oldukları hareket planının şekillendirilmesi olarak tanımlanabilir (Ouyang ve diğerleri, 2023). Bu kapsamda, sürü üyelerinin konumları belirli bir formasyon şeklini takip eder ve üye konumları ortam şartlarına bağlı olarak dinamik olarak yeniden düzenlenebilir.

Robotların formasyon kontrolünde kullanılan yöntemler genellikle üç sınıfta incelenir: birim merkezli (Han ve diğerleri, 2017), lider referanslı (Carli ve diğerleri, 2020) ve komşu referanslı (Yuyi Liu ve diğerleri, 2018).

Birim merkezli formasyon kontrolünde, tüm sürü üyelerinin bağlı olduğu bir kontrol merkezi bulunur ve üyeler tarafından bu merkeze bilgi gönderilmektedir, bu merkezden alınan komutlarla sürü üyeleri belirlenen formasyon görevini yerine getirmektedir. Lider referanslı formasyon görevlerinde ise sürü üyelerinden biri lider olarak seçilir ve kontrol merkezi artık lider üyedir, bilgi paylaşımı lider üye ile yapılır ve hareket sırasında formasyon kontrolü sağlanmaktadır. Komşu referanslı formasyon kontrolünde ise herhangi bir kontrol merkezi bulunmaz ve tüm üyelerden alınan bilgiler ışığında ortak veriler işlenir ve formasyon görevi gerçekleştirilmeye çalışılır. Küresel formasyon problemi, alt seviyelerdeki formasyon problemlerine bölünür ve her bir sürü üyesi tarafından alt problemler çözülmeye çalışılmaktadır. Dolayısıyla, bu yaklaşım nispeten daha karmaşık ve yoğun veri akışı gerektirmektedir.

Bu farklı formasyon kontrol yöntemleri, sürü robotlarının çeşitli görevlerde ve koşullarda etkili iş birliği yapmalarını sağlar. Her yöntemin avantajları ve dezavantajları vardır. Kullanılacak yöntem, görevin gereksinimlerine ve sürü robotlarının yapılandırmasına uygun olmalıdır.

2.2.3. İş birlikçi karar verme

İş birlikçi karar verme davranışı, sürü görevlerinin gerçekleştirildiği sırada bir dizi seçeneğin en verimli şekilde kullanılması için ortaya çıkan bir davranış şeklidir. Bu davranış biçimi, sürünün göreve özgü küresel veya yerel kararlarının kendi içinde tutarlı olmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda üyeler arası bilgi eksikliğinden kaynaklanan hataların önlenmesinde de önemli bir mekanizmadır. Bazen, sürünün tamamını ilgilendiren bir karar alınırken bazen de sürü içinden ayrılan bir grubun kararı ön plana çıkabilir. Bu durumlar, sürünün iş birlikçi karar verme sürecinde çeşitli dinamiklerin etkileşimine bağlı olarak ortaya çıkar.

Sürü robotiği uygulamalarında iş birlikçi karar verme mekanizması uzlaşma (konsensüs), görev ataması veya lokalizasyon gibi alt mekanizmalar kullanılarak sağlanmaya çalışılır (Nedjah ve Junior, 2019). Konsensüs, robotlar açısından hareketleri esnasında yalnızca komşuları arasındaki yerel bilgi alışverişinden yararlanarak farklı

alternatifler arasından ortak bir tercihe yaklaşmayı hedefleyen bir kontrol yöntemidir (Lizzio ve diğerleri, 2021).

Sürü robotiğinin kooperatif kontrolü ele alan bir çalışmada, konsensüs tabanlı karar verme mekanizması için Etkileşimli Bilgi Grafiği (Information Interactive Graph) ve Etkileşimli Bilgi Matrisi (Information Interactive Matrix) modelleri önerilmiştir (Lei ve Zeng, 2011). Kendi kendine hareket eden sürü üyeleri için Kayma Modu Kontrolü (Sliding Mode Control) ve Graf teorisine dayalı Sonlu Zamanlı Konsensüs Algoritması (Finite-Time Consensus Algorithm) algoritmaları da sunulmaktadır (Roldán-Gómez ve diğerleri, 2022).

Veri algılama, işleme ve iletişim konusunda sınırlı kabiliyete sahip basit yapay sürülerin kontrolünde giriş kısıtlamaları ortaya çıkar ve özellikle konsensüs algoritmaları bu kısıtlamaların etkisini azaltmak için sıklıkla kullanılır (Yang Liu ve Lee, 2020). Bu bağlamda geliştirilen giriş kısıtlamalarına sahip fikir birliği uygulamalarında, girdi kısıtlamalı algoritmaların, girdi kısıtlamasız algoritmalara göre daha iyi bir fikir birliği ve konsensüs performansı sergilediği öne sürülmüştür (Chen ve diğerleri, 2015; Lei ve diğerleri, 2015). Bu durum, basit yapay sürülerin karmaşık çevresel koşullar altında etkili bir şekilde iş birliği yapmalarını sağlamak için önemli bir bulgu olarak değerlendirilebilir.

İş birlikçi karar verme davranışlarından biri, sürü üyeleri arasında bireysel veya grup olarak görev ataması veya iş bölümü yapılmasıdır. Görev ataması, robotların yerel görevlerden hangisini yerine getireceğinin seçilerek küresel göreve katkı sağlayacak bir karar sürecidir. İş bölümünün ön planda olduğu çalışmalarda, özellikle hangi göreve kaç üyenin atanacağını belirlenmesi de ayrı bir zorluk oluşturur. Bazı çalışmalarda (Krieger ve Billeter, 2000), göreve ve sürü üye sayısına bağlı önceden belirlenen eşik değerler referans alınır. Görev seçimi için önceden tanımlanmış bir eşiğin aşılmaması gerektiğinde eşik yöntemlerine başvurulabilir (de Mendonça ve diğerleri, 2016). Ancak, hesaplanmış olasılıklara dayalı olarak bir grup robota atanmış görevler, olasılıksal yöntemlerle değiştirilebilir (Jones ve Matarić, 2003). Bu tür yöntemler, sürü üyelerinin dinamik ihtiyaçlarına ve çevresel değişkenlere uyum sağlamak için esnek ve etkili bir çözüm sunabilir.

Görev atamasının sürü üyeleri arasında dinamik bir şekilde yapılması için eşik değeri dışında maliyet fonksiyonları tanımlanarak optimizasyon algoritmaları yardımıyla potansiyel bir iş bölümü yapılabilir (Nedjah ve Junior, 2019). Bu yöntem, sürüdeki her bir üyenin yeteneklerini ve koşulları dikkate alarak en uygun görevleri üstlenmesini sağlar. Örneğin, Nedjah ve ekibi, dinamik bir görev ataması için PSO algoritmasını

önermiştir (Nedjah ve diğerleri, 2015). PSO'nun parçacıkları, sürüdeki her bir robotu temsil eder ve görev arama alanının boyutları, mevcut görev sayısı ile eşleşir (Nedjah ve diğerleri, 2015). PSO tarafından optimize edilen parçacık konumları, sürü içinde potansiyel bir iş bölümünü temsil eder. Yazarlar, robotlar arasında iş bölümü oluşturulurken, aynı göreve gidecek sürü üyelerini robot kümelemesi (Cruz ve diğerleri, 2015) ile bir araya getirebilir veya öncü bir sürü üyesi, önceden belirlenmiş görev bölgesinde keşif yaparak diğer üyeleri işe alabilir ve onlara görevlerini belirleme konusunda rehberlik edebilir (Silva ve Nedjah, 2015). Bu yaklaşımlar, sürünün görevlerini etkili bir şekilde paylaşmasını ve her bir üyenin kendi alanında uzmanlaşmasını sağlayarak toplam performansı artırabilir.

2.3. Hava Sürü Robotiği ve İnsansız Hava Araçları

Sürü robotiği araştırmaları, ilk olarak karada hareket eden mobil robotlar için tasarlanmıştır. Teknolojik ilerlemelerin etkisiyle, sürü robotiği alanında yazılımsal ve donanımsal ekipmanların performansı sürekli olarak artmaktadır. Bu ilerlemelerle birlikte, robotların gerçek dünya problemlerini algılamak için kullandıkları donanımsal ekipmanlar arasında en öne çıkanlar sensörlerdir. Sensör çeşitliliği ve hassasiyetinin artmasıyla birlikte, sürü robotiği çalışmalarında veri algılama, işleme ve iletişim kurma problemlerine yönelik çözüm önerileri çeşitlenmiştir. Ayrıca, donanımsal ekipmanların giderek ticarileştirilmesi ve birim maliyetlerin düşmesi ile bu alandaki çalışmalar hızlanmıştır (Chung ve diğerleri, 2018). Bu gelişmeler sayesinde, önceden karşılaşılan bazı engeller aşılmıştır. Örneğin, hava ve su üzerinde uygulanabilecek sürü robotiği çalışmaları için önceden engeli olarak görülen maliyet sorunu nispeten azalmıştır. Bu durum, araştırmacıların daha önce sınırlı kalan bütçeleriyle daha fazla donanıma ulaşmalarını sağlamış ve bu da daha kapsamlı ve etkili çalışmalara olanak tanımıştır. Ayrıca, önceki dönemlerde karşılaşılan teknik zorluklar da donanım ve yazılım gelişmeleriyle birlikte azalmıştır. Örneğin, önceki sistemlerin işlem gücü yetersiz kaldığı için karmaşık hesaplamalar yapmak zor olabilirken, yeni donanım ve yazılım teknolojileri sayesinde bu tür zorluklar giderilmiştir. Bu nedenle, artık daha karmaşık problemler üzerinde çalışmak ve daha karmaşık sistemler geliştirmek mümkündür. Bu gelişmelerin bir sonucu olarak, geniş alanlarda yüksek manevra kabiliyetine sahip olan hava sürü robotiği uygulamaları her geçen gün daha da gelişmektedir.

Hava sürü robotiği alanında, donanımsal gelişmelerin yanı sıra yazılımsal gelişmelerin de önemini vurgulamak gereklidir. Verimli bir şekilde işlem yapabilen ve iş birliği iletişim içinde en doğru kararları verebilen algoritmalar, sürü içindeki bireysel üyelerin iletişim kurabilmesini, görevleri birbirleri arasında dağıtabilmesini, rotalarını planlayabilmesini ve uçuşlarını koordine edebilmesini sağlayan önemli unsurlardan biridir (Chung ve diğerleri, 2018). Dolayısıyla hava sürü robotlarının başarısının belirlenmesinde etkin bir rol üstlenir. Genellikle hiyerarşik bir düzen içinde yapılandırılan bu algoritmalar, sürüyü her seviyede otonom hale getirir. Böylece, insan operatörünün doğrudan müdahalesine gerek kalmadan, daha üst düzeyde etkileşimlerin gerçekleşmesine olanak tanımaktadır. Otonom teknolojiler, akıllı ve yenilikçi uygulamaların geliştirilebilmesi için kontrol ve tahmin teorilerinden oluşturulmuş yöntemleri kullanır (Wong ve diğerleri, 2017). Kontrol teorisi, sistemlerin istenilen davranışları sergilemesini sağlamak için matematiksel modeller ve kontrol stratejileri geliştirirken, tahmin teorisi gelecekteki olayların tahmin edilmesi için istatistiksel yöntemler kullanır (Campion ve diğerleri, 2019). Bu sayede, sürü robotları karmaşık görevleri etkili bir şekilde yerine getirebilir ve değişen koşullara uyum sağlayabilir.

Hava sürüleri, karada bulunan araç sürülerinden iki önemli açıdan farklılık gösterir: birincisi, üç boyutlu bir alanda hareket ederler ve bu da daha geniş bir hareket kabiliyeti sağlar; ikincisi, bireysel araçların dinamikleri ek bir karmaşıklık katmaktadır, çünkü hava koşulları ve farklı yüksekliklerdeki hava akımları gibi faktörlerle etkileşime girerler (Chung ve diğerleri, 2018). Özellikle insan müdahalesinin zor veya mümkün olmadığı bölgelerde, İHA'lerden oluşan bir sürü etkili bir şekilde işlev gösterebilmektedirler. Örneğin, girilmenin ve çıkılmanın tehlikeli ve zor olduğu afet bölgelerindeki arama kurtarma operasyonlarında veya engebeli ve geniş tarım alanlarında kullanılarak verimlilik artırılabilir. Bu gelişmeler, gelecekte İHA'lerden oluşan hava sürü teknolojisinin daha da yaygınlaşmasını ve çeşitli sektörlerde daha fazla uygulama alanı bulmasını sağlayacaktır. Ancak, bu teknolojinin potansiyel faydalarının yanı sıra, etik, güvenlik ve mahremiyet gibi konularda da dikkatli bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Örneğin, İHA sürüleriyle ilgili veri toplama ve kullanma süreçlerinin etik ve yasal çerçevelerinin netleştirilmesi önemlidir. Ayrıca, hava sürüleri güvenlik açısından hassas bölgelerde kullanıldığında, olası tehlikeleri ve riskleri değerlendirmek ve önlem almak önemlidir. Bu nedenle, hava sürü teknolojisinin ilerlemesiyle birlikte, bu alandaki etik ve güvenlik konularının da sürekli olarak gözden geçirilmesi ve ele alınması gerekmektedir.

İHA'lar, içinde fiziksel olarak insan bulunmayan ve uzaktan kumandalı veya önceden programlanmış bir rota takip ederek görevleri yerine getiren hava araçlarıdır. 1980'li yıllara kadar üretilenleri uzaktan kumandalı gözetleme uçağı olarak karşımıza çıkmaktadır (Taylor ve Munson, 1977). Günümüzde kullanılan modern İHA'lar, 1980'lerde geliştirilen insansız hava araçlarından türemiştir ve tarih boyunca farklı amaçlarla kullanılmıştır.

İlk modern insansız hava aracı çalışmaları 1909 yılında Amerikalı mucit Elmer Sperry'nin uçakların dengelemesi için geliştirdiği cayroskopik aletlerle başlamıştır (Hughes, 1971). Sonraki yıllarda, Birleşik Devletler Donanması, uçakların daha kararlı hale gelmesi ve pilota ihtiyaç olmaksızın uçabilmesi fikri üzerinde çalışmalar yapmış ve bir uçan torpido tasarlamıştır (Prisacariu, 2017). I. Dünya Savaşı sırasında Avusturyalı askeri mühendisler, yine torpidolara benzeyen uçaklara bomba taşımada kullanılan yardımcı ekipman olarak Uçan Bomba (Flying Bomb) adlı araçları geliştirdi (Prisacariu, 2017). Ancak, bu erken modellerin kullanımı ve etkinliği sınırlıydı.

İlk motorlu İHA çalışmaları 1916 yılında İngiliz mucit Archibald Montgomery Low tarafından gerçekleştirilmiştir (Prisacariu, 2017). Ardından, 1917 yılında ilk uçuşunu gerçekleştiren insansız hava uçağı kategorisine girebilecek sınırlı sayıdaki Hewitt-Sperry adlı otomatik uçak I. Dünya Savaşı sırasında Amerikan ordusu tarafından kullanılmıştır (Leutenegger ve diğerleri, 2016). II. Dünya Savaşı'na gelindiğinde, Almanlar V-1 adlı füze tipindeki insansız hava aracını geliştirdi (Leutenegger ve diğerleri, 2016). Bu füzeler, İngiltere'ye karşı kullanıldı ve jet motorlarıyla çalıştıkları için savaş sahalarında önemli bir etki bıraktı. Ancak, teknolojik sınırlamalar nedeniyle bu modellerin başarısı da sınırlıydı.

Soğuk Savaş döneminde ise, insansız hava araçları askeri alanlarda daha fazla ilgi görmeye devam etti. ABD'nin bu dönemde "Ryan Firebee" gibi İHA'larını kullanması, İHA çalışmalarının artmasına öncülük etti (Jacobs ve Whitney, 1962). Askeri stratejilerde düşman hava savunma unsurlarını oyalamak için kullanılırken hali hazırdaki taarruz unsurlarının da ateş hattını geçebilmesini sağlamak için kullanılmıştır. Ancak, bu sistemler genellikle hedef çekimi veya keşif amaçlıydı ve uzaktan kumanda ile kontrol ediliyordu.

1990'ların sonları ve 2000'lerin başlarında, teknolojide meydana gelen gelişmelerle beraber İHA teknolojisi hızla gelişti. Küçük ve hafif bir yapı kazanan İHA'lar uzaktan kumandalı veya önceden programlanmış uçuşları gerçekleştirebilen drone halini aldı. Sivil veya sosyal alanlarda kullanılmaya başladı. 2010 yılından itibaren,

İHA'lar sivil ve ticari alanlarda hızlı bir yayılım gösterdi. Hava fotoğrafçılığı, haritalama, tarım, güvenlik ve hatta paket teslimatları gibi birçok sektörde İHA'lar kullanıldı. Günümüzde ise, İHA teknolojisi daha da ilerleyerek otonom uçuş yetenekleri ve yapay zekâ entegrasyonu gibi özelliklerle gelişmektedir.

İHA'lar, teknolojik gelişmelerin yanı sıra askeri ve sivil uygulamalardaki çeşitlenmelerle önemli bir evrim geçirmiştir. Askeri operasyonlardan sivil kullanıma, kamu hizmetinden eğlence sektörüne kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu araçlar, üzerlerine entegre edilecek akıllı sistemlerle koordineli ve kolektif uçuşlar gerçekleştirebilen bir sürü halini aldıklarında, gelecekte daha yaygın bir kullanım alanına sahip olabilir ve farklı sektörlerde önemli roller üstlenebilirler.

2.4. Sürü İHA Çalışmaları

Endüstriyel alanlardaki teknolojik ilerlemeler, birçok alanda olduğu gibi İHA'ların rolünü de büyük ölçüde etkilemektedir. Günümüzde, yazılım ve donanım alanındaki gelişmeler sayesinde İHA'lar daha geniş bir hareket ve manevra kabiliyetine sahip hale gelmiştir. Bu durum, mobil robotların yanı sıra İHA'ların da eğlence, nakliye, ulaşım, teslimat gibi sosyal alanlarda ve gözetleme, takip, saldırı gibi askeri alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Birçok alanda İHA'ların kullanımının artması, koordineli hareketin önemini vurgulamaktadır. Birden fazla İHA'nın koordine bir şekilde çalışması, tek bir İHA'ya kıyasla görevlerin daha hızlı ve etkili bir şekilde tamamlanmasını sağlar. Ayrıca, İHA'ların dikey iniş/kalkış ile üç boyutlu hava sahasını çok verimli kullanabilmesi ve elektrikli fanları sayesinde hava kirliliği gibi sorunlara yol açmaması sürü robotiği alanında mobil ve diğer robot türlerine karşı İHA'ların kullanımını oldukça verimli hale getirir. Bu tür hava robotlarının kontrolünde insansız ve otonom bir sistem tasarlandığında toplumsal, bilimsel ve teknolojik alanlarda etkili ve verimli uygulamalar gerçekleştirilebilir.

Sürü robotiği, aynı anda çalışan çoklu robot sistemleri aracılığıyla karmaşık görevlerin daha hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar (Mohan ve Ponnambalam, 2009). Sürü üyeleri arasındaki tek bir merkezden yönetilmeyen dağıtılmış bir kontrol mekanizmasının olması, kusurlu veya arızalı sürü üyelerinden kaynaklanan mekanik arızaların sistem üzerindeki etkisini ortadan kaldırabilir ve problemlerin tek bir merkeze bağlı olmayan üyeler tarafından çözülmesine imkan tanır (Bayındır, 2016). Öte yandan İHA'ların kontrolü, dinamik çevre koşulları dikkate alındığında farklı tipteki

robotlara göre daha zorlayıcı olabiliyor. Bu nedenle koordineli ve iletişim halinde olan kolektif bir İHA sürüsü için akıllı bir rota kontrol mekanizması, başta sivil, ticari ve askeri olmak üzere birçok uygulamada önemli avantajlar sağlayacaktır.

Sürü robotiği davranışları, kolektif ve fikir birliğine dayalı otomatik olup, belirli bir sıra ile değil, kendiliğinden oluşan sosyal davranışlara benzerlik gösterir (Campion ve diğerleri, 2019). Bu nedenle, sistemin bazı üyelerinin arızalanmasına rağmen işlevini sürdürebilmesi (Soysal ve Şahin, 2005), sürü üyelerinin iç parametrelerini dinamik ortam değişikliklerine uyum sağlayabilmesi (Kuriki ve Namerikawa, 2014) ve sürünün farklı sayılarda alt üyelere sahip olabilmesi gibi özellikler, sürülerdeki robotik sistemlerden beklenen önemli özelliklerdir (T. Nguyen ve diğerleri, 2018). Özellikle hedefe yönelik görevlerde sürüyü kontrol etmek için davranış temelli, sanal yapı, lider takibi veya fikir birliği gibi fiziksel tanımlara ihtiyaç duyulabilir (Chung ve diğerleri, 2018). Sürü halindeki İHA'lar için, literatürde kümelenme (Ma'Sum ve diğerleri, 2013), oluşum (Garcia-Aunon ve diğerleri, 2019; Petit, 2016), izleme (Lu ve diğerleri, 2018), gözetleme (Nedjah ve Junior, 2019) ve yiyecek arama (Huahua Liu ve diğerleri, 2020) gibi çeşitli araştırmalar yapılmış olmasına rağmen, hala çözülmesi gereken bazı sorunlar mevcuttur. Bu sorunların başında sağlamlık ve esneklik gelmektedir. Sağlamlık ve esneklik, gerçek zamanlı uygulama kısıtlamaları ve sistem tasarımı için hayati önem taşır (Mukherjee ve Namuduri, 2019). Bu durum, sürüdeki hareket için akıllı bir kontrol sisteminin kullanılmasının önemini vurgular. Sistem, değişen koşullara hızla uyum sağlayabilen ve üyeler arasında etkili bir iletişim kurabilen bir kontrol mekanizması gerektirir. Bu şekilde, sürü, beklenmedik durumlarla başa çıkabilir ve hedeflerine daha etkin bir şekilde ulaşabilir.

Homojen bir robot sürüsünde, hedefe yönelik görevlerde belirli bir görevi hangi sürü üyesinin tamamladığı önemli değildir. Bu nedenle, çok üyeli merkezi veya merkezi olmayan bir sürü oluşumunda eş zamanlı görev atama ve yöringe planlaması, fiziksel tanımlar ile gerçekleştirilebilir (J. Zhang ve Xing, 2020). Ancak, önemli bir sınırlama, hedefe yönelik görevlerde kullanılan tüm araçların aynı sensör ayak izine sahip olması ve üye kaybının dikkate alınmamasıdır. Bu sınırlama, sürü robotlarının etkinliğini ve uyumluluğunu olumsuz yönde etkileyebilir. Bu bağlamda, sürü sistemlerinin daha da geliştirilmesi ve adaptasyonunun sağlanması için farklı sensör teknolojilerinin ve daha esnek sürü düzenlemelerinin dikkate alınması gerekmektedir.

Son yıllarda, dağıtık kontrol yöntemleri tarafından gerçek zamanlı uygulamalara uyum sağlayan ÇRS, sürü tabanlı İHA çalışmalarında da belirgin bir ivme kazanmıştır

(Alonso-Mora ve diğerleri, 2016). Sürüdeki her robotun etkili bir iş birliği için bir bilgi paylaşması zorunludur. Bu bilgilerin tüm sürü üyeleriyle ağ topolojisi aracılığıyla paylaşılması gerekmektedir. Dağıtık kontrol yöntemlerine dayanan fikir birliğine dayalı algoritmalar, bu paylaşılan bilgilerin nihai sürü kararını şekillendirmek için geliştirilmiştir (Jung ve Ariyur, 2011).

Komşuluk temelli iletişimi esas alan fikir birliğine dayalı uygulamalarda, her bir sürü üyesi arasında bir iletişim ağı oluşturulur ve bu ağ, hareket boyunca sürekli iletişimi sağlar (Sampedro ve diğerleri, 2016). Her sürü üyesinden engellere ilişkin veriler toplanır, ardından bir karar mekanizması oluşturulur ve doğrusal olmayan optimizasyon yöntemleri kullanılarak en uygun rotanın belirlenmesi sağlanır (Jung ve Ariyur, 2011; Sampedro ve diğerleri, 2016). Geometrik ve optimizasyona dayalı uygulamalar, fikir birliğine dayalı algoritmalara başarılı bir şekilde adapte edilse de (Jung ve Ariyur, 2011; Sampedro ve diğerleri, 2016; Sujit ve diğerleri, 2008) sürüdeki üye sayısındaki değişiklikler ve iletişim boşluklarından kaynaklanan formasyon bozulmaları genellikle göz ardı edilmektedir. Bu durum, gerçek zamanlı uygulamalarda karşılaşılabilen önemli bir sorundur ve ihmal edilmemelidir.

2.4.1. Hedef arama, izleme ve takibi

Robot sürüleri, görevlerini güvenli ve başarılı bir şekilde yerine getirebilmek için bulundukları alanı ve bu alandaki nesneleri tanıma yetisine sahip olmalıdır. İHA'lerden oluşan hava robot sürüleri, farklı konumlardan eş zamanlı olarak bilgi toplayabilme becerisine sahip oldukları için bulundukları alandaki nesnelere dair bilgileri toplayabilirler. Özellikle hedef arama görevleri gibi uygulamalarda çok etkili sonuçlar elde edebilirler. Hedef tespiti problemlerine İHA perspektifinden bakıldığında, hedefin statik veya dinamik olması ve tekil mi yoksa çoklu hedef mi olduğu, çözüm senaryolarının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Hedef tespiti problemlerinin çözümü için farklı senaryolar bulunmaktadır. Örneğin, tekil statik hedefler, tekil dinamik hedefler, bilinen sayıda çoklu statik hedefler, bilinen sayıda çoklu dinamik hedefler, bilinmeyen sayıda çoklu statik hedefler ve bilinmeyen sayıda çoklu dinamik hedefler gibi senaryolarla karşılaşılabılır (Chung ve diğerleri, 2018). Hedeflerin hem dinamik hem de bilinmeyen sayıda çoklu olması, en zorlu durumlar arasında yer almaktadır. Hedeflerin sayısının bilindiği durumlarda, sürü sensörlerinin veri değerlendirme süreci hızlı ve etkili sonuçlar sağlayabilirken,

bilinmeyen hedeflerin varlığı durumunda her bir hedefin belirlenmesi ve verilerin değerlendirilmesi daha zor olmaktadır.

Hedef takibi, adından da anlaşılacağı gibi, belirli bir hedef veya amaç etrafında odaklanan bir yaklaşımı ifade eder. Bu yaklaşım, genellikle hedef merkezli bir perspektif benimser ve belirli bir hedefin izlenmesi ve takibi üzerine odaklanır. Öte yandan, alan merkezli bir yaklaşımda ise robot ekibinin ilgi duyulan bir alanda hedef varlığının dikkate alındığı fakat önceliğin alan kapsamaya odaklandığı gözetim denilen bir süreç devreye girer (Nigam ve diğerleri, 2012). Gözetim altında tutulan ilgili tüm alanların istenilen veya maksimum sıklıkta ziyaret edilmesinin veya sürekli olarak izlenmesinin ve takip edilmesinin gerektiği durumlara kalıcı izleme adı verilir (Nigam ve diğerleri, 2012). Bu kapsamda, gözetim, gözetleme ve izleme, birçok hava sürüsüne özgü yaklaşımı da içeren geniş bir literatürün konusu olmuştur.

2.4.1.1. Tekil hedefler

Hedef arama, izleme ve takibi gibi görevlerde, öncelikli olarak tekil statik hedeflerin tespiti önemli bir rol oynar. Bu tespit, genellikle diğer hedef tiplerine göre daha az karmaşıklık barındırır. Araştırmacılar, bu tür bir problemin çözümünde genellikle sezgisel ve olasılıksal algoritmaları (Haishi Liu ve diğerleri, 2022) tercih etmişlerdir. Bu algoritmalar, belirli hedeflerin bulunması ve izlenmesi için etkili bir yol sağlar, çünkü bu tür görevler genellikle net hedeflerle ilgilidir ve bu algoritmalar basitlik ve etkinlik sunar (Zohdi, 2018). Bu yaklaşımlar, hedef belirleme sürecini optimize etmek ve istenilen sonuçları elde etmek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

İHA sürülerinin statik ve tekil hedef tespiti problemlerine çözüm bulmak amacıyla Genetik Algoritma (GA) kullanılan bir çalışmada, sürü üyelerinin dinamik ve kinematik özelliklerinden oluşturulan kontrol parametrelerinin nasıl güncellendiği incelenmiştir (Zohdi, 2018). Dinamik özellikler, bir İHA'nın kütle, kuvvet ve ivme gibi harekete etki eden özelliklerini ifade ederken, kinematik özellikler İHA'nın konumu, hızı, ivmesi ve hareket yönü gibi hareketin geometrik ve zamansal özelliklerini temsil eder. Bu çalışmada, İleri Euler zaman ayrıklaştırma yöntemi kullanılarak çıkarılan maliyet fonksiyonu minimize edilerek sürü kontrol parametrelerinin güncellenmesi sağlanmıştır (Zohdi, 2018). İleri Euler yöntemi, bir diferansiyel denklemin sayısal çözümünü bulmak için kullanılan bir yöntemdir (Donald, 2002). Bu yöntem, belirli bir zaman adımında sistem durumunun bir tahminini hesaplar ve bu tahmini, bir sonraki zaman adımında

sistem durumunu tahmin etmek için tekrar kullanır. Bu çalışmanın amacı, en fazla sayıda sürü üyesinin hedefe ulaşabilmesini sağlamaktır. Burada, maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi, sürü üyelerinin hedefe ulaşma yeteneğini artırırken, aynı zamanda sürü kontrol parametrelerinin güncellenmesini sağlar. Bu, sürünün genel performansını ve hedef tespit yeteneğini artırır. Sonuç olarak, bu çalışmada (Zohdi, 2018), İHA sürülerinin hedef tespiti problemlerine çözüm bulmak için Genetik Algoritma ve İleri Euler zaman ayırıklaştırma yöntemini birleştirerek başarıyla kullanılmıştır. Fakat, İleri Euler çözümünde, güncelleme adımının küçültülerek çözümün gerçek değerine daha çok yakınsaması gerektiğinde, bu durum hesaplama süresinin uzamasına neden olur. Bu da sürü uygulamaları için önemli bir dezavantajdır. Diğer yandan, algoritmayı hızlandırmak için güncelleme adımı daha büyük seçilebilir, ancak bu durumda da güncellemelerin sayısı azaldıkça sistem hatasında bir artış olabilir.

Depolardaki stokların envanter kayıtlarının düzenlenmesi ve konumlarının belirlenmesi de statik ve tekil hedef tespiti problemine örnek olabilir. Üstelik sürü İHA'lar, altyapı ve trafikten etkilenmediği için envanter kontrolü, paket teslimatı ve ulaşım için hızlı ve düşük maliyetli bir araç olarak kullanılabilir. Depo envanterini düzenlemek için İHA'ların kullanıldığı bir çalışmada, (Haishi Liu ve diğerleri, 2022), RFID okuyucularla donatılmış İHA'larla fiziksel kısıtlamaları dikkate alarak envanter doğruluğunu sağlamak amaçlanmaktadır. Çalışma, envanter kütüphaneleri için görev planlama modeli sunmakta ve İHA'ların stok alım görevlerindeki rotanın planlaması için hibrit Aslan Sürü Optimizasyonu Tabanlı Diferansiyel Evrim (Lion Swarm Optimization Based Differential Evolution (LSO-DE)) algoritması önermektedir. Ayrıca, önerilen hibrit algoritmanın çalışma süresini, stok alma doğruluğunu, yakınsama doğruluğunu, tekdüzeliğini ve global optimizasyon yeteneğini diğer algoritmalarla (Whale Optimization Algorithm (WOA), PSO) karşılaştırarak ve simülasyon deneylerinde doğrulayarak maksimize etmeye odaklanmaktadır (Haishi Liu ve diğerleri, 2022). Depo gibi kapalı alanlarda kullanılan bu tür özel çözümler, belirli görevler için etkili sonuçlar doğurabilir, ancak genel geçer sürü sistemleri için yeterince verimli olmayabilirler. Bu çözümler, sürü sistemlerinin temel unsurları olan toplanma, uçuş formasyonu veya karar mekanizması gibi önemli faktörlere yeterince odaklanmayabilir. Bu nedenle, sürü robotik sistemlerinin karmaşıklığını ve çeşitliliğini karşılayacak daha kapsamlı ve adaptif çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Tekil hedef tespiti problemlerinin çözümünde daha zorlayıcı olan durum ise hedefin dinamik yapıda olmasıdır. Dinamik yapıya sahip bir hedefin tespit edilmesi tek

başına yeterli olmadığından hedefin takip edilmesi ve takip edilirken gözden kaçırılmaması ayrıca çözülmesi gereken bir problemdir. Hedef tespiti problemlerinden tekil ve dinamik bir hedefin tespiti özellikle askeri alanlarda öne çıkan bir problemdir. Askeri alanlarda küçük insansız hava sistemlerinin güvenlik problemlerini çözmek amacı ile yapılan bir çalışmada (Buerger ve diğerleri, 2016), tehditlerine karşı takip, değerlendirme ve etkisiz hale getirme yeteneklerini artırmak için Hava Platformunun Havadan Bastırılması (Aerial Suppression of Airborne Platform (ASAP)) savunma sistemi mimarisine döngüsel takip stratejisi, ulaşılabilir küme hesaplamaları ve kontrol fonksiyonları kütüphanesi gibi yöntemler ve algoritmalar entegre edilmiştir. Çalışmada üç boyutlu uzayda dinamik bir hedefi etkili bir şekilde takip etmek için döngüsel takip stratejisi önermektedir (Buerger ve diğerleri, 2016). Bu yaklaşım, belirli bir mesafede tehdit oluşturan İHA'ları çevreleyen birden fazla savunma amaçlı İHA'nın sürekli çoklu sensör denetimi yapmasını sağlar. Tehdit oluşturan İHA'nın yakalanmasını kolaylaştırmak için ise ulaşılabilir küme hesaplamalarını kullanmaktadır. Ulaşılabilir kümeler (Buerger ve diğerleri, 2016), tehdit oluşturan İHA'nın gelecekteki bir zamanda bulunabileceği mekânsal bölgeyi tanımlar ve takip yörüngelerini belirlemede ve başarılı yakalama olasılığını değerlendirmede yardımcı olur. Tehdit oluşturan İHA'nın takibi ve karakterizasyonu için dinamik model yapılarını belirlemede, ulaşılabilir kümelerin hesaplanmasında, sensör konumlandırması ve yakalama hazırlığında takip yörüngelerinin belirlenmesinde bir kontrol fonksiyonları kütüphanesi kullanmaktadır (Buerger ve diğerleri, 2016). Araştırmacılar, rastlantısal hareket eden, düşman olmayan bir hedef İHA'nın takibi için ileri rastlantısal ulaşılabilir kümeler temelli bir rastlantısal yaklaşımı kullanmaktadır. Bu yöntem, belirli bir zaman çerçevesi içinde hedef İHA'nın yakalanma olasılığını maksimize etmeyi ve hesaplama kolaylığı ve gerçek zamanlı uygulanabilirliği sağlamayı amaçlamaktadır (Buerger ve diğerleri, 2016). Dinamik hedef takibi için önerilen bu tip yöntemler, sürü sistemlerinin koordineli ve kolektif hareketinden ziyade daha çok bireysel veri toplama ve ağa iletme gibi davranır. Ancak, bu yaklaşım yerine formasyon kontrolü sağlayarak maksimum alanı kontrol altına almak, sürü enerji verimliliği açısından daha iyi sonuçlar ortaya koyabilir. Formasyon kontrolü, sürü üyelerinin belirli bir düzen içinde hareket etmesini sağlayarak hem enerji tasarrufu sağlar hem de toplam sistemin etkinliğini artırır (Rojó-Rodríguez ve diğerleri, 2019).

Sensör, iletişim ve İHA teknolojilerindeki son ilerlemeler, yeni hedef tespiti ve takibi platformlarının geliştirilmesine imkân tanımaktadır. Bu platformlar, sadece arama kapasitesi açısından güçlü olmakla kalmayıp aynı zamanda hesaplama verimliliği, adapte

edilebilirlik ve optimum duruma getirme gibi özelliklere sahip olmalıdır. Bu nedenle, dinamik bir hedefin aranması için yeni yöntemler formüle edilirken olasılıksal fonksiyonlar tercih edilmektedir. Ayrıca, kesin çözümü bulmak için diferansiyel hesap gibi klasik yöntemleri kullanarak bu problemi çözmek pratik olmayacağından sıklıkla yaklaşık yöntemler kullanılmaktadır. Bazı yaklaşımlarda ise arama sürecini hızlandırmak için birden fazla İHA kullanılır (Lanillos ve diğerleri, 2013; Perez-Carabaza ve diğerleri, 2018). Perez-Carabaza ve diğerleri çalışmalarında genel İHA rotaları üzerinde amaç fonksiyonuna göre bırakılan feromon izlerinin öğrenme yeteneklerini ve probleme özgü sezgisel bir yaklaşımın faydalarını doğal olarak birleştiren bir teknik olan ACO'ya dayalı yeni bir yaklaşım sunulmaktadır (Perez-Carabaza ve diğerleri, 2018). Burada, amaç Minimum Süreli Arama (Minimum Time Search (MTS)) problemi için ACO tekniklerini kullanarak yüksek seviyeli rotalar elde etmek ve MTS için yeni bir sezgisel önerme sunmaktır. Bu önermenin, İHA'ların konumlarına ve hedef konumu hakkındaki olasılık bilgilerine dayalı olarak İHA'ların olası eylemlerini değerlendiren yeni bir yaklaşım içerdiği öne sürülmektedir (Perez-Carabaza ve diğerleri, 2018).

Karmaşık yapısından dolayı, özellikle hızlı hareket eden hedeflerin olduğu senaryolarda optimal arama zorlu bir sorun olmaya devam etmektedir. Özellikle sınır bölgelerinde sürekli devriye görevi için potansiyel askeri uygulamalar göz önünde bulundurularak kapsama alanlarını keşfetmek ve şüpheli nesneleri bulmak, yerleştirmek ve izlemek için İHA'ların veya drone robotların kullanıldığı bir çalışmada (Ma'Sum ve diğerleri, 2013), bir dizi algoritma, kontrolör ve platformlardan oluşan sistemlerin bir kombinasyonu önerildi. Sürü İHA'ların yapay zekasının temeli olarak PSO algoritması tercih edilmiştir. Algoritma, çevreyi daha fazla gözlemlemesi için bir kısıtlama faktörüne sahip iki düzenli sürü üyesi ve daha yüksek bir kısıtlama faktörüne sahip özel bir sürü üyesi ile değiştirilmiştir (Ma'Sum ve diğerleri, 2013). Önerilen nesne algılama ve takip algoritması (Ma'Sum ve diğerleri, 2013), İHA'nın kamerasından ham görüntü yakalama, görüntüyü RGB'den HSV temsiline dönüştürme, eşik değeri ile her pikseli filtreleme ve algılanan nesnenin boyutunu hesaplama adımlarını içermektedir. Nesnenin boyutu eşikten büyükse İHA nesneyi takip etmektedir. Nesne takibi ve noktadan noktaya hareket için PID kontrolü kullanılmıştır. Nesne takibinin ana fikri, nesnenin konumunu ayarlayarak nesneyi robotun görüş alanının merkezinde tutmaktır. Araştırmacılar, İHA'ların konumlarını hesaplamak için de eşzamanlı lokalizasyon ve haritalama, Kalman Filtresi ve IMU'ya dayalı PID kontrolü ve hız verilerinden oluşan bir kilometre sayacı

(odometry) sistemi kullanmıştır. Yazarlar, önerilen algoritmanın tamamen rastgele tabanlı bir hareketli algoritmaya kıyasla daha iyi performans gösterdiğini savunmaktadır.

İHA uçuş yollarının tespit etme olasılığını değerlendirmek için amaç fonksiyonlarını türetmek üzere sıklıkla Bayesian yaklaşımı öne sürülmektedir (Bourgault ve diğerleri, 2006; Lanillos ve diğerleri, 2013). İHA sürüsü kullanarak hareket eden bir hedefi bulmak için yapılan bir çalışmada (Phung ve Ha, 2020), Hareket Kodlu Parçacık Sürü Optimizasyonu (Motion-Encoded Particle Swarm Optimization (MPSO)), adlı yeni bir algoritma sunulmaktadır. Burada, hedefin tespit olasılığını artırmak için Bayesian teorisine dayalı bir maliyet fonksiyonunun optimize edilmesi amaçlanmaktadır. MPSO algoritması ise, arama yörüngesini bir PSO algoritması içindeki bir dizi İHA hareket yolu olarak kodlayıp, önemli sürü özelliklerini korur ve farklı hedef dinamiklerine uyum sağlayarak arama performansını artırır (Phung ve Ha, 2020). Optimizasyon için, PSO'nun bir varyantının kullanılmasının başlıca sebepleri başlangıç koşullarına ve amaç fonksiyonlarının değişimine daha az duyarlı olması, az sayıda parametre (bir başlangıç ağırlık faktörü ve iki ivme katsayısı) aracılığıyla birçok arama senaryosuna uyum sağlayabilmesi, genel olarak global çözümü, diğer raslantısal yöntemlere göre kararlı bir yakınsama oranı ve daha kısa hesaplama süresiyle bulabilmesidir (Eberhart ve Shi, 1998; Gaing, 2003).

Yukarıda bahsedilen benzer ve farklı alanlardaki çalışmalar, göreve özgü tekil statik veya dinamik hedeflerin tespiti ve takibi konusunda başarılı sonuçlar ortaya koysa bile sürü sistemlerindeki hedef tespiti problemi daha geniş bir perspektiften ele alındığında, çoklu hedeflerin varlığında göstereceği performans, daha verimli ve kullanışlı olabilir. Bu bağlamda, sürü sistemleri, birden fazla hedefin tespiti ve takibi konusunda birçok avantaja sahiptir. Örneğin, bir grup İHA'nin birlikte çalışması, farklı açılardan ve farklı zamanlarda hedefleri gözlemleyerek daha kapsamlı bir görüş sağlayabilir. Ayrıca, sürü sistemleri, birbirleriyle iletişim kurarak hedeflerin dağıtılmasını ve izlenmesini daha etkili bir şekilde yönetebilirler. Bu nedenle, çoklu hedef tespiti için sürü sistemlerinin kullanılması, tekil hedef tespiti yöntemlerine göre daha avantajlı olabilir ve geniş bir uygulama alanına sahip olabilir.

2.4.1.2. Bilinen sayıda çoklu hedefler

Çoklu hedef takibinin en basit şekli hedeflerin sabit ve sayısının bilindiği durumlardır. İHA'ların üzerlerinde bulunan sensörler ve kameralar farklı noktalardan

gelen verilerin işlenerek aynı anda birden fazla dinamik hedefin tespit edilebilmesine olanak sağlayabilir. Bu sayede İHA'lar, geniş bir alandaki hareketliliği izleyebilir, potansiyel tehditleri belirleyebilir ve hedefleri izleyebilir. Sürü halindeki robotlardan oluşan bir grup bir arama alanının ayırık bölgelerini eş zamanlı olarak gözlemleyebilir (Bayram ve diğerleri, 2017). Bu durum sürünün küresel bilgi edinmesine olanak sağlayabilir. Ayrıca çoklu hedef takibi ile ekip üyeleri aynı bölgeyi farklı açılardan izleyebilir (Moon ve diğerleri, 2021). Bu da sürünün belirli bir bölgeye ait verilerindeki belirsizliğin daha hızlı azaltılmasına ve sensör hatalarına karşı sürünün daha dayanıklı olmasına olanak sağlar.

İHA'lar ile yapılacak olan bilinen veya bilinmeyen sayıda çoklu hedef takibine ihtiyaç duyulan durumların başında doğal afet veya kaza sonucu meydana gelecek deprem, yangın, sel veya patlama gibi olaylar yer almaktadır. Bilinen sayıda çoklu hedef takibi problemi üzerinde yapılan bir çalışmada (Moon ve diğerleri, 2021), engellerin ve doğrusal olmayan zorlu yörüngelerin olduğu 3 boyutlu ortamlarda birden fazla hedefi takip etmek amacıyla birden fazla İHA'yı kontrol etmek için yeni bir Derin Takviyeli Öğrenme (Deep Reinforcement Learning (DRL)) yaklaşımı önerilmiştir (Moon ve diğerleri, 2021). Burada, İHA'ların görüş alanında olan ve olmayan hedeflerin frekans spektrumundan gürültülü mesafe ölçümlerinin aldığı ve bu ölçümlerin durumu tahmin etmek için İHA'lar tarafından kullanıldığı varsayılmaktadır. Önerilen Derin Öğrenme (Deep Learning (DL)) tabanlı kontrolcüde, yüksek izleme performansının elde edilmesi için optimal ortak kontrol eylemleri Cramér-Rao alt sınırına göre seçilir ve bu optimal eylemlerin katkısı, her bir İHA'nın sisteme bireysel katkısını ve tüm sistemin Cramér-Rao alt sınırını dikkate alan ödül fonksiyonuyla ölçülür. Dolayısıyla, Cramér-Rao alt sınırının kullanılması ile RDL teorisini durum tahmini teorisiyle birleştiren yeni bir kontrol çerçevesi oluşturulduğu söylenebilir (Moon ve diğerleri, 2021). Araştırmacılar buradan yola çıkarak çalışmanın düşük çalışma süresi maliyeti ve yüksek doğrulukta bir hedef izleme çözümü sağladığını öne sürmektedir.

Bilinen sayıda çoklu hedef takibine örnek olacak bir problem de vahşi ortamlardaki hayvanların izlenme problemidir. Bu amaçla yapılan bir çalışmada (Bayram ve diğerleri, 2017), vahşi yaşam izlemede radyo etiketli hayvanları belirlemek için sürü İHA sistemini tasarlanmıştır. Çalışma, geleneksel yöntemlerle vahşi yaşamın izlenmesi sırasında karşılaşılan zorlukları ele almaya ve radyo etiketli hayvanlardan yön ölçümleri almak için çoklu İHA'ların Yagi antenlerle donatılmasını kullanan bir sistem önermeye odaklanmaktadır (Bayram ve diğerleri, 2017). Önerilen yaklaşım kapsamında, bir hedefin

konumunu iki yön (bearing) ölçümünden tahmin etmek için bir konum belirsizlik modeli kullanılmaktadır. Hedef konumu yaygın olarak kullanılan üçgenleme yaklaşımı ile yapılırken, tahminin belirsizliği Hassasiyetin Geometrik Seyrelmesi (Geometric Dilution of Precision (GDOP)) kullanılarak ölçülmüştür. Sürü üyeleri arasında koordineli bir şekilde veri toplanabilmesi için de İHA'lar ekipler halinde sıralanmıştır ve içlerinden seçilen bir lider, acil durumda bir sonraki ölçülen konumuna gitmek, ölçümleri almak ve önceki konumuna dönmek için sinyal verir.

Çoklu hedef tespiti problemine karşı İHA'ların etkin bir şekilde kullanılması, askeri ve güvenlik amaçlı olarak kullanılan İHA'ların aynı anda birden fazla hedefi tespit edebilme yeteneğini ifade eder. Bu yetenek, genellikle askeri operasyonlarda, istihbarat toplama faaliyetlerinde ve güvenlik uygulamalarında önemli bir rol oynar. Çoklu hedef tespitinde İHA'ların kullanılması ile askeri birlikler ve güvenlik güçleri, hedefleri belirlemede ve izlemede daha başarılı olabilirler. Bu teknolojinin, gelişmiş algılama ve izleme sistemleri, askeri operasyonların ve güvenlik uygulamalarının daha etkili ve başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesine katkı sağlar. Bu bağlamda, farklı teknolojik ve çevresel ortamlarda dağıtılmış hedeflerin tespiti ve takibi için birden fazla İHA'nın koordine edilmesi sorununa odaklanan bir çalışmada (Cimino ve diğerleri, 2019), amaç göreve özgü çevresel düzenlere uyum sağlayabilecek, kendi kendini oluşturan ve kendi kendine koordine olabilen bir İHA ekibi oluşturmaktır. Araştırmacılar, çevrede küresel arama (keşif) ile yerel arama (sömürü) arasında bir denge kurmaya çalışmaktadır. Nihai amaçları, bir görev sırasında izlenen hedef sayısını en üst düzeye çıkarmak veya hedef keşif süresini en aza indirmektir. Araştırmacılar hedeflerine ulaşmak için bir dizi farklı algoritma ve yöntemlerin bir kombinasyonunu kullanırlar. Sürü oluşumu ve koordinasyonu için sürülerin toplanma ve biyolojik stigmerji mekanizmalarından esinlenmiştir (Cimino ve diğerleri, 2019). Önerilen toplanma mekanizmasında (Cimino ve diğerleri, 2019), İHA'lar yakındaki sürü üyelerinin ortalama istikametine göre hizalanır, üyeler arasındaki minimum mesafeyi korunur ve her üye sürü arkadaşlarının merkezine doğru yönlendirilir. Stigmerji ise feromonlara dayalı dolaylı iletişim mekanizmasıdır, burada bir sürü üyesi ajanın eylemi bir iz bırakır, bu da sırasıyla başka bir eylemi kışkırtır, başka bir iz bırakır ve böyle devam ederek İHA'ların koordinasyonu sağlanır (Cimino ve diğerleri, 2019). Ayrıca, sürünün davranışını çevreye uyarlamak için DE algoritması önerilmiştir (Cimino ve diğerleri, 2019). Bu algoritmanın kullanılmasındaki temel amaç, verilen hedefleri keşfetmek için gereken süreyi (statik

hedefler) en aza indirerek veya genel arama süresinde keşfedilen hedeflerin ortalama sayısını (dinamik hedefler) maksimuma çıkararak optimize edebilmektir.

Yine, sürü İHA takip performansını sistematik olarak iyileştirmek için yapılan bir çalışmada (L. Zhou ve diğerleri, 2022), akıllı İHA sürüsü tabanlı iş birlikçi izleme algoritması önerilmiştir. Bu algoritmanın çok hedefli senaryolar için düşük yürütme gecikmesi sağladığı öne sürülmektedir. Araştırmacılar, Lyapunov tabanlı çok amaçlı bir optimizasyon modeli üreterek maliyet ve İHA'lar arasındaki güvenli uçuş mesafelerine ait kısıtlamaları göreve en uygun şekilde çözmeye çalışmıştır (L. Zhou ve diğerleri, 2022). Sürü iş birliğine dayalı bu algoritmanın hem uçuş süresini maksimuma çıkarmak için bir enerji tüketimi dengesi şeması oluşturması hem de minimum hedef kaybı olasılığı için izleme süresini azaltmak amacıyla en uygun izleme yollarını bulmaya çalışması çoklu hedef takibi için önemlidir.

Hedef takibi belirli bir hedefin izlenmesi ve takibi üzerine odaklanır. Fakat, özellikle dinamik bir ortamda, hedefin pozisyonu ve durumu sürekli değişebileceğinden, takip sürecinin sürekli olarak güncel ve hassas olması hayati önem taşır. Bu nedenle, hedef takibi süreci hem hedef merkezli hem de alan merkezli yaklaşımların birleştirilerek, etkili ve verimli bir izleme ve takip stratejisi oluşturulmasını sağlayabilir. Bu amaçla, sürü İHA'lar için kalıcı gözetlemeye yönelik yapılan bir çalışmada (Nigam ve Kroo, 2008), geleneksel tek bir İHA'nın hedef takibi için önerilen çözümler birden fazla İHA için sezgisel yaklaşımlar kullanılarak genişletilmiştir. Bu yaklaşımlar, Uzay Ayrışımı (Space Decomposition (SD)), GA ve Auction algoritmalarını içermektedir. SD, hedef uzayının her biri ayrı bir İHA tarafından bağımsız olarak aranan ve bireysel İHA'lara tahsis edilen alt uzaylara bölünmesini sağlar. Araştırmacılar, bu bölümlenmenin optimal bir şekilde olması için SD yönteminde GA'yı kullanmıştır. Bölümleme işleminden sonra, İHA'lar, açık artırma algoritmalarına dayalı optimal atama prosedürü kullanılarak bölgelere tahsis edilir (Nigam ve Kroo, 2008). Bu sayede, optimal bir şekilde tüm ilgi alanının takibinin yapıldığı öne sürülmektedir. Araştırmacılar, bir sonraki hedef arama çalışmasında (Nigam ve diğerleri, 2012), önerilen yöntemin dinamik kısıtlamalar altında görev performansını iyileştirmek için kontrol politikasında revizyona gitmiştir. Bu amaç için minimum uzunluklu yörünge izleme kontrolörü kullanılmıştır. Bu tür temel yaklaşımlar sabit ve basit yörüngelerde sürü sistemleri için olumlu sonuçlar verebilir. Fakat, karmaşık yörüngeye sahip uçuş formasyonlarında en uygun yörüngeyi seçilmesi verimli sürü sistemleri için oldukça önemli bir etkidir. Bu problemi göz önünde bulundurarak yapılan bir çalışmada (Keller ve diğerleri, 2013), İHA'ların uçuş sırasında gerçek zamanlı

hesaplama yapabilmesi için B-spline eğrilerini kullanarak olası rota setini tanımlamayı amaçlamaktadır. B-spline eğrileri, uygulanabilir uçak yörüngelerinin kompakt bir şekilde tanımlanmasını sağlayarak yerleşik gerçek zamanlı hesaplamaya uygun bir çözüm sunabilir. Buradaki temel hedefler arasında, görev süresinin azaltılması, ajanların sorunsuz bir şekilde yönlendirilmesi için sensör geri bildirimine dayalı bilgilerin kullanılması ve görev ve araç hareket kısıtlamalarına sıkı bir şekilde uyulması bulunmaktadır. Yazarlar, yapılan uygulamalarda sabit kanatlı İHA'ların sensör görüş alanı ile dönüş yarıçapının benzer bir uzunluk ölçeğine sahip olduğunu ve bu sebeple takip rotasının karmaşıklığının arttığını göz önüne alarak çalışmalarına eklemeler yapmıştır (Keller ve diğerleri, 2017). Önceki çalışmalarında kullandıkları B-spline tabanlı yöntemler ile Graf arama tekniklerini birleştirerek minimum dönüş yarıçapının belirlenmesi ile takibi yapılacak en uygun rotanın tespiti yapılmıştır. Fakat, bazı hedef takibi ve izleme uygulamalarında başlangıç ve hedef noktaları arasında bir dizi uğrak noktası veya ara hedefler olabilir. Özellikle, İHA'ların uzun mesafeli takiplerde şarj ihtiyacının karşılanması tipik bir gereksinimdir. Bu durumda sürü hedef takibi veya kalıcı gözetleme görevlerine farklı bakış açıları getirilmelidir. Böyle bir senaryoyu temel alan bir çalışmada (Michael ve diğerleri, 2011), hedef izleme probleminin çözümüne en uygun yöntemin Dinamik Araç Rotalama Problemi (Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP)) olduğu öne sürülmüştür. Bu yöntemin, nihai izleme rotasının optimal uğrak (düğüm) noktaları oluşturulurken belirlenen kısıtlamalara karşı verimli izleme rotaları oluşturması ve gerçek zamanlı olarak ölçeklendirilebilir olması ön plana çıkmaktadır.

Sürü üyelerinin çoklu hedefleri takip ederken sürekli izleme yerine belirlenen hedefe veya hedeflere yönelik spesifik gözetim görevini sürdürebilmesi ve istenen tepkiyi verebilmesi bir diğer önemli sürü davranışıdır. Bu tür bir probleme karşı yapılan bir çalışmada davranış temelli bir algoritma önerilmektedir (Garcia-Aunon ve diğerleri, 2019). Algoritma, her bir sürü üyesinin durumu hakkında belirli bilgileri yayınlamasını ve diğer üyelerden benzer mesajlar almasını içeren dağıtık bir çalışma prensibine sahiptir. Algoritmanın, sürü sisteminin verimliliğinin, sağlamlılığının, esnekliğinin ve rastgeleliğinin üzerinde değerlendirmeler sağlayacak nitelikte olduğu savunulmaktadır (Garcia-Aunon ve diğerleri, 2019). Çalışmada kullanılan algoritma altı davranıştan oluşmaktadır ve her bir davranış, çevresel hücreleri değerlendirdikten sonra, bir nihai karar modülü her bir değere ağırlık uygular ve daha yüksek değere sahip hücreyi seçmek için bunları toplar. Algoritma ayrıca düşük seviye kontrol ve çarpışma önleme modülünü de içermektedir. Sistemin optimizasyon sürecinde ise sürü davranış şeklinin 13

parametresinin farklı senaryolarda optimal değere ulaşması için GA kullanılmaktadır. Algoritmanın sağlamlığının, ileti kaybı, konum hataları ve görev sırasında üyelerin yarısının başarısız olması gibi durumlara karşı olumlu sonuçlar ortaya koyduğu savunulmuştur. Fakat, daha geniş açık alanlarda ve karmaşık bölgelerde yapılacak olan hedef izleme veya gözetim uygulamalarında uzay-zamansal alanların izlenmesi ön plana çıkmaktadır. Bu tür alanlarda genellikle heterojen bir sürü sistemi kullanılmaktadır (Tokekar ve diğerleri, 2016). Yukarıda bahsedilen uzay-zamansal gözetim probleminin bir benzeri de tarım alanlarına yönelik çalışmalarda karşımıza çıkmaktadır. Tarım alanlarına yönelik gözetim problemine karşı yapılan bir çalışmada (Tokekar ve diğerleri, 2016), İKA ve İHA'ların güçlü yönlerini birleştirerek hassas tarım uygulamalarında pratik faydasını gösteren bir robotik sürü sistemi oluşturmayı hedeflemektedir. Burada, bir arazinin doğru azot dağılımını izlemek için türetilmiş Gezgin Satıcı Problemi (Traveling Salesman Problem (TSP)) yöntemine yeni bir Q yaklaşım algoritması eklenmiştir. Bu sayede, heterojen bir sürü sistemi oluşturarak tarım alanlarındaki azot miktarının daha hızlı ölçülmesi ile arazi verimliliğinin artırılabilceğini öne sürülmektedir.

Yukarıda bahsedilen benzer ve farklı alanlardaki çalışmalar, bilinen sayıda statik veya dinamik çoklu hedeflerin tespiti ve takibi konusunda başarılı sonuçlar ortaya koymuş olsa da gerçek zamanlı sürü sistemlerindeki hedef tespiti problemi özellikle doğal afetler gibi hedef sayısının belli olmadığı acil durumlarda yetersiz olabilir. Özellikle, afet gibi kaotik ortamlarda, hedef sayısının önceden bilinmemesi, sürü İHA'ların etkin bir şekilde hedefleri tespit etme ve izleme yeteneklerini zorlar. Bu tür durumlarda, İHA ekipleri, herhangi bir anda ortaya çıkabilecek belirsiz sayıda hedefi izlemek ve takip etmek zorunda kalabilirler. Bu nedenle, sürü İHA'lar arasındaki iletişim ve koordinasyon önemlidir çünkü ekip, görevi başarıyla tamamlamak için her zaman ortamın tamamını keşfetmek ve hedefleri etkili bir şekilde takip etmek zorundadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, sürü İHA'ların esnek ve adaptif algoritmalarla donatılması ve hedef tespiti için daha geniş bir algılama ve izleme kapasitesine sahip olmaları gerekebilir. Bu şekilde, acil durum senaryolarında çoklu hedef tespiti problemini çözmek için daha etkili bir strateji geliştirilebilir.

2.4.1.3. Bilinmeyen sayıda çoklu hedefler

Sürü İHA'lar ile yapılan çoklu hedef tespitinde hedef sayısı bilinmediğinde arama problemi çok daha zorlaşır ve ekibin görevi tamamlamak için her zaman tüm ortamı

keşfetmesi gerekir. Bu açıdan bakıldığında bilinmeyen sayıda çoklu hedef tespitinde yapılan çalışmaların başında arama yapılacak alanın parçalara bölündüğü ve sürekli kontrol altında tutulduğu yöntemler karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemi temel alan bir çalışmada (Hu ve diğerleri, 2013), sınırlı algılama ve iletişim yeteneklerine sahip İHA'ların birden fazla sabit yer hedefini ortak arama süreci ele alınmıştır. Bu çalışma kapsamında taranan tüm gözetim bölgesi, her bir hücrenin içinde hedefin var olma olasılığı ile ilişkilendirildiği bir Bernoulli dağılım olasılık haritasına bölünmüştür. Burada, her İHA, bireysel bir olasılık haritası tutar ve bu haritayı ölçümlerle Bayes kuralına göre günceller (Hu ve diğerleri, 2013). Ayrıca, çok etmenli harita füzyonu için dağıtılmış bir füzyon şeması da önerilmiştir. Çalışma (Carpin ve diğerleri, 2011)'da bilinmeyen sayıda statik hedef arama problemi için arama alanının bölünmesinin yanında bölünen parçaların hedef yoğunluğuna göre seçilebilmesi için Olasılıksal Dörtlü-ağaçlar (Probabilistic Quadrees (PQ)) önerilmiştir. PQ, değişken çözünürlüklü bir temsil sağlar ve arama yapan İHA'nın sadece nerede algılama yapacağını değil aynı zamanda algılama çözünürlüğünü de seçmesini gerektiren bir arama problemine doğal olarak neden olmaktadır (Carpin ve diğerleri, 2011). Çalışmanın bir diğer katkısı ise yanlış pozitiflere ve kaçırılan tespitlere sahip sensörleri içerir ve umut verici konumların ortaya çıktığı yerlerde daha fazla arama çabası tahsis etmek için Bayesian bir yaklaşım aracılığıyla, İHA'ların, arama alanını dinamik olarak güncelleyebilmesidir. Bunun yanı sıra, arama algoritması sadece bir sonraki aramanın nerede yapılacağını değil, aynı zamanda algılama doğruluğunu da belirler.

Yukarıdaki örneklerle benzer şekilde hedef sayısının bilinmediği ancak sabit olduğu durumu ele alan farklı bir İHA üzerine monte edilmiş tek bir kameradan diğer İHA'ları tespit ve takip eden bir çalışmada (J. Li ve diğerleri, 2016), hızlı hareket eden bir kameranın arka plan hareketi bir perspektif dönüşüm modeli aracılığıyla tahmin edilir. Ardından, arka plandaki hareketleri telafi eden görüntüden seyrek noktalar kümesi bulunur ve bu noktalardaki yerel hareket Lucas-Kanade optik akış eşleştirmesi ile tahmin edilir (J. Li ve diğerleri, 2016). Arka plan ve yerel hareketler arasındaki fark karşılaştırılarak hareketli aday nesneler belirlenir ve her bir hareketli nesnenin hedef olup olmadığını sınıflandırılır (J. Li ve diğerleri, 2016). Ayrıca, Kalman filtresinden gelen zamansal bilgiler kullanılarak hedef tespiti geliştirilir ve aralıklı yanlış algılamalar ve yanlış uyarılar azaltılır (J. Li ve diğerleri, 2016).

Çoklu hedef tespiti problemlerinden sayılabilecek bir diğer konu ise jeolojik gözetlemeden askeri keşiflere kadar çeşitli uygulamalarda karşılaşılabilecek Manyetik

Anormallik Tespiti (MAT) sorundur (P. Dames ve diğerleri, 2012). MAT sensörleri, manyetik alandaki yerel bozuklukları tespit ederek gömülü, gizli veya batık nesnelerin varlığının ve konumlarının tahmin edilmesini sağlar (P. Dames ve diğerleri, 2014). Bu sensörler yanlış pozitif ve yanlış negatif tespitlerle karşılaşabilir ve hedefler hakkında önceden bilgi sahibi olunmadan yalnızca hedefe yakınlığı belirleyebilir. Bu problemlerin çözümü için yapılan bir çalışmada (P. M. Dames ve diğerleri, 2016), bilinmeyen sayıda hedefi otonom olarak keşfetmeye, saymaya ve yerelleştirmeye yönelik birleşik bir kontrol ve tahmin algoritması sunulmaktadır. Bu algoritmaların işleyişini sağlayacak veriler mini İHA'lara entegre edilmiş yakındaki manyetik kaynakların varlığını algılayan ve yalnızca tek bir veri biti sağlayan manyetometrelerle elde edilmektedir. Bu sensörler basit yapıda olmalarına rağmen İHA'ların hedef sayısını başarılı bir şekilde belirleyebilmesine ve her hedefi hedeflerin uzunluk ölçeğinde hassasiyetle konumlandırabilmesine olanak tanır (Schwager ve diğerleri, 2017).

İHA sürüsü ile yapılacak olan bilinmeyen sayıda çoklu hedef takibine ihtiyaç duyulan hayati görevler doğal afet veya kaza sonucu meydana gelecek deprem, yangın, sel veya patlama gibi olaylardır. Özellikle afet yardım senaryolarında faydalı olabilecek bir çalışmada (Gupta ve diğerleri, 2021), Çok Hedefli Parçacık Sürü Optimizasyonu (Multi-Target Particle Swarm Optimization (MTPSO)) olarak bilinen değiştirilmiş bir PSO algoritmasını kullanarak çok hedefli arama problemlerinde tespit edilen hedeflere hızlı yanıt verilebilmesi için merkezi olmayan bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntemin ölçeklenebilir, hataya dayanıklı ve hesaplama açısından kolay olacak şekilde tasarlandığı öne sürülmektedir. MTPSO, yerel en iyiyi ve küresel en iyiyi dinamik olarak güncellemek için geleneksel PSO yaklaşımını değiştirir (Sharma ve Sisodia, 2014) ve İHA'ları, İHA'lar arası mesafeye göre alt sürülere ayırır. Küresel en iyi terim, alt sürüdeki tüm İHA'lar tarafından tespit edilen en iyi gözlemi temsil eder. Araştırmacılar ayrıca algoritmanın keşif ve kullanım özelliklerini kontrol etmek için çeşitli eylemsizlik fonksiyonlarını kullanıyor. Bu fonksiyonlar arasında sabit fonksiyon, rastgele eylemsizlik ağırlığı, karesel azalma, sigmoid artış ve kaotik eylemsizlik ağırlığı yer alır. Algoritma aynı zamanda tespit edilen hedeflerin konumunun İHA'lar arasında sürekli paylaşıldığı ve yük teslim görevinin hedefe en yakın İHA'ya atandığı bir yük optimizasyon stratejisini de içeriyor. İHA'lar arası çarpışmayı önlemek için araştırmacılar, her bir ajanın son hızına eklenen ek bir hız terimi oluşturmak için konsensüs eşitliği kavramını kullanıyor. Son olarak, İHA'ların istenilen uç noktaya ulaşmasını sağlamak için, İHA'ları hedefleri tespit ederken bile hedef ara noktasına doğru yönlendiren bir uç nokta hız terimi tanıtmıştır.

Bilinmeyen sayıda çoklu hedef takibi probleminin çözümü için birçok çalışma yapılmasına rağmen en zorlu hedef arama ve izleme sorunu, hedef sayısının bilinmediği ve ilgi alanına giren ve çıkan hedefler nedeniyle zaman içinde dinamik olarak değişen hedeflerin olduğu durumlardır. Sosyal hayatta bu tür durumlar ile karşılaşılacak alanlar genellikle karayollarındaki araçların izlenmesi için çözülmeye çalışılan trafik izleme problemidir.

Trafik izleme probleminde hareket halindeki bilinmeyen sayıda hedefin küçük bir İHA sürüsü kullanılarak tespit edilmesi, yerleştirilmesi ve takip edilmesi için yapılan bir çalışmada (P. Dames ve diğerleri, 2017), hedefler için Gaussian Süreci (Gaussian Process (GP)) regresyonu ve hedefin ortaya çıkışı ve kayboluşunun istatistiklerine bağlı modeller kullanarak veri tabanlı bir hareket modeli oluşturulmaktadır. Burada sürü üyeleri tarafından, hedef sayısını ve hedeflerin durumlarını eş zamanlı olarak tahmin etmek için Olasılıksal Hipotez Yoğunluğu (Probability Hypothesis Density (PHD)) filtresi kullanılmaktadır. Aynı araştırmacılar çok rotorlu İHA'lerden oluşan daha büyük bir sürü söz konusu olduğunda, dağıtılmış bir tahmin ve Voronoi tabanlı bir kontrolör algoritması kullanarak yer robotlarını izlemeye çalışmıştır (P. Dames, 2020). Burada, İHA'lar hedeflerin sayısını ve konumlarını tahmin etmek için sensörlerin sınırlamalarını hesaba katan PHD filtresinin yeni, dağıtılmış bir formülasyonunu kullanmaktadır. İHA'ların ortamdaki hareketlerini yönlendirmek için de PHD filtresinin çıktısı Lloyd'un dağıtılmış kontrol algoritmasının ağırlıklandırma fonksiyonu olarak kullanılır. Bu sayede, robotların hedefleri içeren olası alanlara doğru çekildiğinin ve dinamik yer robotlarının daha verimli bir şekilde izlendiğinin bir göstergesi olduğu öne sürülmektedir.

Hava sürü robotiği çalışmalarında, hedef arama, izleme ve takibi gibi konular temel sürü problemleri olarak kabul edilirken, İHA sürü sistemleri özelinde ticari, askeri ve sosyal alanlarda sürü robotiğinin kullanımı daha geniş bir perspektife sahiptir. Bu perspektif, daha detaylı ve kapsamlı alt problemleri ortaya çıkarır. Örneğin, yol planlaması, haritalama, lokalizasyon, navigasyon, görev atama, uçuş formasyonu oluşturma, koruma ve kontrolü, yük taşıma, statik ve dinamik engellerden ve çarpışmalardan kaçınma gibi birçok görev özelinde daha ayrıntılı problemlerle karşılaşılır. Özellikle, farklı uygulama alanlarındaki farklı gereksinimler ve zorluklar, sürü robotik sistemlerinin çeşitli yeteneklerini ve esnekliğini ortaya çıkarır. Ayrıca, yukarıda bahsi geçen yöntemlerin büyük çoğunluğu nispeten kısıtlı ve dar alanlarda uygulanmıştır. Dolayısıyla, bu yöntemler büyük ve geniş sahalarda enerji ve maliyet açısından önemli kısıtlamalara tabidir. Hedef izleme ve takibi gibi konular özellikle uzun

süreler boyunca devam ettiğinde, arıza veya iletişim kopuklukları gibi problemler sürü sisteminin çökmesine neden olabilir. Bu nedenle, İHA sürü sistemlerinin geliştirilmesi ve kullanılması hem endüstriyel hem de askeri ve sosyal alanlarda çeşitli zorlukları ele almak ve çözmek için önemli bir potansiyele sahiptir. Bu alt problemlerin çözümü, İHA teknolojisinin daha geniş bir kullanım alanına yayılmasını sağlayabilir ve sürü robotiği alanındaki ilerlemeyi hızlandırabilir.

2.4.2. İş birlikçi haritalama, lokalizasyon ve yol-planlaması

İş birlikçi haritalama ve yol-planlaması hedef arama, izleme ve gözetleme görevlerinden farklı olarak yalnızca çevrenin gözlemlenmesiyle yetinmez, aynı zamanda bir ortamın tümüyle tutarlı bir örneğinin veya görselinin elde edilme sürecini de kapsar. Bu rota örnekleri veya görsel haritalar çevrenin detaylı bir modelini oluşturmak için kullanılır ve genellikle bir veya birden fazla sensörden gelen verilerin birleştirilmesiyle oluşturulur (Saeedi ve diğerleri, 2016). Farklı sensörlerden farklı tipte veriler alınsa bile sürü robotik sistemleri tarafından oluşturulan haritalar genellikle belirli bir düzene bağlı birleştirilmiş nokta, çizgi veya düzlem kümelerinden oluşur. Haritaları oluşturan nokta ve çizgi kümeleri çoğunlukla kamera görüntülerinden çıkarılıp bir dizi genişletme yöntemine tabi tutulur (Chung ve diğerleri, 2018). Daha yoğun haritalamaların olduğu sistemlerde ise yoğun nokta tespiti yapıp düzlem kümeleri oluşturulmaya çalışılır (Chung ve diğerleri, 2018). Fakat, gerçek zamanlı uygulamaların çoğunda ortam hakkındaki veriler eksik hatta hiç toplanamamış olabilir. Bu durum haritalama ve yol-planlama görevlerini zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla, haritalama problemleri sıklıkla lokalizasyon (yer tespiti) problemleri ile ilişkilendirilir. Çünkü, bir robotun kendi konumunu belirleme yeteneği, haritalama sürecinde ortam ile alakalı verilerin toplanması ve işlenmesi hususunda kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, SLAM (Saeedi ve diğerleri, 2016) olarak adlandırılan bir problemle sıklıkla karşılaşılmaktadır.

2.4.2.1. İş birlikçi haritalama ve lokalizasyon

İHA'lar için görüntü tabanlı iş birlikçi Visual-SLAM ile ilgili yapılan temel haritalama çalışmalarında (Forster ve diğerleri, 2013) birden fazla hava robotundan veri toplamak için merkezi bir yer istasyonunu tercih edilmekteydi. Bu çalışmada, hava robotlarından gelen veriler, robotların konumlarını belirlemek için seyrek özellik

eşleştirmesi gerçekleştirmek ve farklı robotların sensör görüş alanlarının örtüşmesini tespit etmek için kullanılmıştır. Birden fazla robotu ele almak için büyük ölçekli bir SLAM algoritması genelleştirilmiştir; burada farklı robotlar tarafından oluşturulan bir dizi yerel alt haritanın görelili ilişkilerini koruyan bir global graf bulunmaktadır. Haritadaki 3 boyutlu noktaları tahmin etmek için bilinen ters derinlik parametre belirlemesi kullanılırken, çizgi segmentlerini tahmin etmek için de genişletilebilir uç noktaların eklendiği, bağlanmış Plücker koordinatlarına dayalı yeni bir parametre belirleme yöntemi kullanılmıştır (Forster ve diğerleri, 2013; Saeedi ve diğerleri, 2016). İş birlikçi SLAM, bu şekilde birden fazla robotun bir araya gelerek ortak bir harita oluşturmaya olanak tanırken, aynı zamanda her robotun kendi konumunu ve çevresini doğru bir şekilde belirlemesini sağlayabilir (Saeedi ve diğerleri, 2016). Benzer şekilde yine merkezi bir istasyonun tercih edildiği bir çalışmada (Schmuck, 2017)], istasyon tüm sürü üyelerinin haritalarını yönetir, döngü kapatma, harita birleştirme, iyileştirme ve bilginin üyelere geri dağıtılmasını sağlamaktadır. Bu, bir üyenin SLAM tahminlerine diğerlerinin gözlemlerini anlık olarak dahil etmesine olanak tanır. Çalışmada (Schmuck, 2017), gelen kamera kareleri Görsel Odometri (Visual Odometry (VO)) (Saeedi ve diğerleri, 2016) sistemi tarafından işlenir. Bu sistem, her kare için kamera hareketini hesaplamayı amaçlar ve daha sonra üyelerin yerel haritasında harita noktaları olarak kullanılacak olan sahne işaretlerini izleyerek bunu gerçekleştirir. Yerel harita, bir durum grafiğinde bir dizi anahtar kareyi tutar ve daha sonra bunlar optimize edilir. Yeni harita noktaları, geçmiş gözlemlerle üçgenleme yaparak haritaya girilir. Geleneksel olarak, anahtar kare tabanlı SLAM'da, en önemli kareler tutulur ve hesaplama zamanını iyileştirmek için haritadaki veri miktarı azaltılır ve gerçek zamanlı davranışa yakınsama sağlanır. Bir karenin anahtar kare olarak haritaya eklenip eklenmeyeceği temel SLAM yaklaşımında en son eklenen anahtar kareye göre kat edilen mesafeye veya özellik noktalarının örtüşmesine dayandırılır.

Sürü İHA'ların sadece Görsel-SLAM çerçevesinde haritalama yapması görüntünün elde edildiği kameranın niteliklerine bağlıdır. Özellikle, güneşin ışıklarının yoğunlukta olduğu, gece karanlığının olduğu veya olumsuz hava şartlarının olduğu dış ortamlarda sürü hava robotlarının haritalama becerisinin artırılması için kamera yanında Atalet Ölçüm Ünitesi (Inertial Measurement Unit (IMU)) gibi atalet ölçümleri sağlayan sensörlere de ihtiyaç vardır. Bu amaçla yapılan bir çalışmada (Qin ve diğerleri, 2018), gerçek zamanlı olarak, yeniden konumlandırma ve konum grafiği optimizasyonu sağlayan bir Tek Gözlü Görsel-Atalet SLAM (Monocular Visual-Inertial SLAM) sistemi

önerilmektedir. Burada, gelen veriler Görsel-Atalet Odometri (Visual-Inertial Odometri (VIO)) sistemi tarafından işlenir. Bu sistemin, önceki oluşturulan haritanın yeniden kullanılmasına ve mevcut konumun önceki haritada yeniden konumlandırılmasına olanak sağladığı öne sürülmektedir (Qin ve diğerleri, 2018). Ayrıca, sürüklenmeleri düzeltmek ve global tutarlılık sağlamak için dört serbestlik dereceli (DOF) durum grafiği optimizasyonu gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla, birden fazla robot tarafından elde edilen haritaların küresel olarak tutarlı temsillerle birleştirilmesi için uygun bir yöntem olduğu söylenebilir. Ayrıca, bu yöntemlerin küresel lokalizasyon yeteneği, aynı seyrek görsel haritada çok sayıda hava robotunun sürüklenmeden konum tahmininde bulunmasına olanak tanır.

Gerçek dünyadaki sürü sistemleri ve özellikle sürü İHA'lar haritalama ve yol planlama konusunda merkezi bir yer istasyonu kullandığında birbirleri ile haberleşecekleri iletişim bandının sınırlı olmasından dolayı önemli bir kısıtlama ile karşı karşıyadır. Merkezi olmayan Görsel-SLAM, kesin konumlandırmanın mümkün olmadığı ortamlarda sürü sistemleri için güçlü bir haritalama sağlayabilir. Merkezi olmayan bir haritalama yöntemi üzerine yapılan bir çalışmada (Cieslewski ve diğerleri, 2018), yeni bir merkezi olmayan Görsel-SLAM sistemi önerilmiştir. Burada, önceki merkezi olmayan Görsel-SLAM sistemlerindeki veri ilişkilendirmesi ve optimizasyonu için tüm robotlar arasında tam harita verisinin değiştirilerek büyük veri transferleri yerine veri miktarını en aza indirmek veya sınırlandırmak için iki aşamalı bir yöntem türetilmiştir (Cieslewski ve diğerleri, 2018). İlk aşamada, kompakt bir tam görüntü tanımlayıcısı yalnızca bir robota belirli bir şekilde gönderilmiş, ardından, ilk aşama başarılı olursa, görelî konum tahmini için gereken veri yalnızca bir robota aktarılmıştır. Böylece, veri ilişkilendirmesin robot sayısı ile doğrusal olarak ölçeklendiği ve oldukça kompakt konum örnekleme olduğu gösterilmektedir. Veri optimizasyonu sağlamak için de güncel merkezi olmayan poz-graf optimizasyon (Cieslewski ve diğerleri, 2018) yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemin tercih edilmesinin sebebi, yörünge çakışması ile doğrusal olarak artan minimum miktarda veri alışverişi sağlayarak sık bant genişliğinin kullanılmasındır.

Bant genişliği kullanımını azaltmaya yönelik bir başka yaklaşımda (Choudhary ve diğerleri, 2017), robotların ham sensör ölçümlerini değiş tokuş etmek yerine nesne tabanlı modeller kullanılmıştır. Önceki bahsedilen haritalama tekniklerinde (Cieslewski ve diğerleri, 2018; Qin ve diğerleri, 2018; Schmuck, 2017) sistem haritanın hızla oluşturulabileceği robotların yörüngesini tahmin eden poz grafiği optimizasyonu üzerine

kuruludur. Çalışma (Cieslewski ve diğerleri, 2018)'de ise poz-graf optimizasyonu için dağıtık algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmalar, tüm sensör verilerini uzak bir sensör birleştirme sunucusuna göndermek yerine, robotların poz-graf konfigürasyonu üzerinde anlaşmaya varmak için çok kısmi ve gürültülü bilgi alışverişi yapmaktadır. Ayrıca, önerilen dağıtık algoritmalar (Örneğin: Dağıtık Gauss-Seidel yöntemi) nesne tabanlı harita modelleri ile çalışacak şekilde genişletilmiştir. Böylece, nesne tabanlı modeller sayesinde ham sensör ölçümlerinin (örneğin, nokta bulutları veya RGB-D verileri) değiştirilmesinin önlendiği ve iletişim yükünün daha da azaltıldığı öne sürülmektedir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar işlem yükü ve veri depolama açısından kısıtlı imkanların olduğu durumlarda daha caziptir. Fakat, haritalama doğruluğundaki hata payının mümkün olan en düşük seviyede tutulmasının daha önemli olduğu koşullarda yoğun haritalama sistemleri önerilmektedir (Chung ve diğerleri, 2018). Yoğun haritalama sistemleri, nokta veya düzlem kümesinden oluşan yoğun bir veri akışına ihtiyaç duyar. Genellikle RGB-D kameralar, her görüntü için hem derinlik hem de renk bilgisi sağladığı için ortak yoğun görüntü haritalamasında kullanılır.

RGB-D kameralarla ve IMU ile donatılmış yerden robotlar ve uçan araçlar gibi birden fazla hava platformu kullanarak otonom konumlandırma ve haritalama için bir yazılım çerçevesi geliştirmeyi amaçlayan bir çalışmada (Loianno ve diğerleri, 2015), yazarlar, derinlik verisinin RGB görüntüsü ile ilişkilendirilerek görsel bilgi ile ilişkilendirilen ölçek faktörünün tahmin edildiği bir Tek Gözlü Görsel Odometri (Monocular Visual-Odometry) algoritması kullanarak konumlandırma görevini çözmeye çalışmıştır. Ayrıca, platformların yerini belirleme ve her platform tarafından oluşturulan farklı haritaları birleştirme metodolojisini sunarlar. Bu, bir Monocular-SLAM problemi ve robot pozlarını ve derinlikleri özelliklerle ilişkilendirme problemine ayrıştırılarak gerçekleştirilir ve yoğun bir 3D harita oluşturulur. Yine, benzer şekilde yoğun bir haritalama gerçekleştirmek için yapılan bir çalışmada (Chung ve diğerleri, 2018), yer ve hava robotları ile 3D haritalar oluşturmak için algılama ve hareketlilik açık modelleri açısından verimli bir kontrol politikası öne sürülmektedir. Cauchy-Schwarz ikinci dereceden karşılıklı bilgi politikası, hareketli sensörler tarafından yapılabilecek gelecekteki ölçümlerle arasındaki bilgiyi teorik bir amaç fonksiyonunu maksimize etmek için tasarlanmıştır.

Kamera ve IMU sensörleri dışında son dönemlerde oldukça popüler hale gelen LIDAR sensörleri de sürü robotiği sistemleri haritalamasında kullanılmaktadır. LIDAR (Light Detection and Ranging), nesnelerin uzaklığını ve konumunu belirlemek için lazer

ışınları kullanarak çalışan bir uzaktan algılama teknolojisidir ve çevredeki nesnelerin şekli ve yüzey özellikleri hakkında kesin ve 3 boyutlu bilgiler sağlayabilir (N. Li ve diğerleri, 2022). Bilinmeyen bir ortamda sürü İHA'lara yönelik dağıtılmış, çevrimiçi ve gerçek zamanlı iş birlikçi konumlandırma ve haritalama uygulaması için LIDAR tarama verilerinin kullanıldığı bir çalışmada (Dong ve diğerleri, 2015), robotların poz belirsizliğini içeren bir Beklenti Maksimizasyonu (Expectation Maximization (EM)) tabanlı bir yöntem kullanarak dahili çoklu robot döngü kapanmalarını etkili bir şekilde tanımlayarak uzun vadeli navigasyonda yörünge doğruluğunu artırmayı amaçlamaktadır. Yazarlar, uygulamalarını bir dizi hava aracı ekibi kullanarak deneysel olarak doğrulamış ve doğruluğunu, hesaplama verimliliğini, çok sayıda robota ölçeklenebilirliğini ve değişen ortamlara karşı dayanıklılığını analiz etmişlerdir.

Haritalama, bir ortamın fiziksel özelliklerini, engelleri, yolları ve diğer önemli detaylarını belirleyen ve genellikle sensör verilerinin kullanılarak ortamın statik yapısını tanımlayan bir süreçtir. Bu süreçte elde edilen bilgiler, özellikle sürü sistemleri için ortamın tanınması ve görevlerin yerine getirilmesi açısından önemli kolaylıklar sağlar. Haritalama, sürü robotlarının çevrelerini anlamalarına ve etkili bir şekilde navigasyon yapmalarına yardımcı olurken, aynı zamanda engellerin tespiti ve önlenmesine de olanak tanır.

Yol planlama ise, dinamik faktörler göz önünde bulundurularak gerçek zamanlı olarak yapılabilen ve genellikle bir hareketli cihazın veya aracın rotasını belirleme amacıyla haritalama sonuçları kullanılarak, bir başlangıç noktası ve hedef noktası arasındaki en uygun veya en güvenli yolun hesaplanması veya belirlenmesidir. Yol planlama, haritalamanın sağladığı ortam bilgilerini kullanarak, belirli bir hedefe ulaşmak için en etkili rotayı belirler ve bu süreç sırasında çeşitli kısıtları ve dinamik değişkenleri göz önünde bulundurur. Bu şekilde, sürü robotlarının belirli görevleri yerine getirirken güvenli ve etkili bir şekilde hareket etmelerini sağlar.

Haritalama ve yol planlama, özellikle bilinmeyen ortamlarda birlikte kullanıldığında, çok verimli sürü sistemlerinin oluşmasına katkı sağlayabilirler. Haritalama, sürüye bir çevre görünümü sağlayarak robotların ortamı daha iyi anlamalarına ve yol planlama için gerekli bilgileri sağlar. Yol planlama ise, belirlenen hedeflere güvenli ve etkili bir şekilde ulaşmak için sürü üyelerinin optimal rotalarını hesaplar, böylece sürü robotlarının koordineli bir şekilde hareket etmelerini sağlar. Bu şekilde, sürü sistemleri, karmaşık ortamlarda başarılı bir şekilde çalışabilir ve çeşitli görevleri yerine getirebilir.

2.4.2.2. Yol-planlaması

Çoklu robotların iş birlikçi haritalama deneyleri genellikle simülasyon veya laboratuvar ortamlarında gerçekleştirilir, bu da pratikte elde edilen sonuçların genellikle sınırlı olduğu anlamına gelir. Ayrıca, başarılı uygulamalar incelendiğinde, genellikle az sayıda robotla sınırlı ölçekte yapıldığını görürüz. Ancak, son zamanlarda sürü halindeki robotlarla bir ilgi alanının tam haritasını çıkarmakla kalmayıp aynı zamanda bölgesel veya bütünsel bir alanda yol planlaması yapma fikri daha çekici hale gelmiştir. Bu durum, bir dizi robotun bir araya gelerek karmaşık görevleri yerine getirebilmesi ve çeşitli uygulamalarda etkili bir şekilde kullanılabilmesi fikrine dayanır. Bu yaklaşım, robotik teknolojinin gelişimiyle birlikte daha fazla ilgi görmekte ve araştırmacıların dikkatini çekmektedir.

İHA'ların sürü halinde görev yapabilmesi için belirli bir rotaya ihtiyaç vardır. Hareket bilgisinin üretilmesi için başlangıç ve hedef noktaları arasındaki optimum yol, ortamın engelleri ve mekanın yapısı dikkate alınarak belirlenmelidir (Sang ve diğerleri, 2021). Bu bağlamda farklı mobil araçlar için 2 boyutlu ve 3 boyutlu ortamlara yönelik çeşitli yol planlama çalışmaları yapılmıştır (Lin ve diğerleri, 2022). Evrimsel hesaplama ve sürü zekası algoritmaları, sürü İHA'ları için genellikle tercih edilen yol planlama algoritmalarıdır (Cekmez ve diğerleri, 2018).

Örneğin İHA'ların izleyeceği yolları çokgenler olarak değerlendirip yol planlama sırasında doğruluğu artırmak için GA ile Bulanık Mantık (Fuzzy Logic (FL)) birleştirmişlerdir (Sathyan ve diğerleri, 2016). Burada, sürü üyesi İHA'lar Çoklu Gezin Satıcı Problemi ile Poligon Ziyareti (Polygon Visiting Multiple Traveling Salesman Problem (PVM-TSP)) problemi olarak sınıflandırılmıştır. Araştırmacılar, bu probleme özgü genetik fuzzy kümeleme yöntemi (Sathyan ve diğerleri, 2016) önermektedir. Genetik fuzzy kullanılarak geliştirilen iki farklı algoritma bulunmaktadır. Birisi her İHA'nın kapsadığı mesafeyi kümelemek için, diğeri ise hesaplama süresini azaltmak için kapsanan mesafeyi yakınlaştıran bir maliyet fonksiyonu kullanmaktadır. Böylece, FL'nin evrensel yaklaşımçı özelliği ve doğrusal olmayan karakteristikleri, belirli bir uygulama için uygun üyelik fonksiyonları kümesi ve bir kural tabanı geliştirmek için gereken deneme yanılma durumunu azaltmak için GA ile bir araya getirilerek kullanılmıştır. Ancak bazen bölünmüş yollar arasındaki mesafe çok kısa olabiliyor. Bu da ani yön değişikliklerine neden olabilir. Dolayısıyla hem verimliliği azaltabilir hem de çarpışma riskini artırabilir. Benzer şekilde Liu ve diğerleri, Yapay Sinir Ağı (YSA) ile rotayı

oluştururken, YSA'nın öğrenme parametrelerinin doğruluğunu ayarlamak için GA'yı kullanmışlardır (C. Liu ve diğerleri, 2019). Çalışmada, İlk olarak, birden fazla İHA arasındaki göreceli konum ilişkisi, her bir İHA'nın hedef alanın sınırı ile olan konum ilişkisi ve her bir İHA'nın hareket performansı sinir ağının girdileri olarak alınır ve çıktı olarak her bir İHA'nın kabaca rotası elde edilir. Daha sonra, sinir ağının ağırlıkları ve eşikleri genetik algoritma kullanılarak optimize edilir ve çoklu İHA'ların iş birlikçi bölgesel keşif optimal yolları çözülür.

Başka bir GA tabanlı çalışma (Z. Zhou ve diğerleri, 2020), uçuşlar sırasında dinamik hedefleri tespit etmek ve geri dönüş yolunu da hesaba katmak amacıyla sürü rotasını belirlemek için Bağışıklık Genetik Algoritması (Immune Genetic Algorithm (IGA)) kullanmaktadır. GA, optimizasyon problemlerini çözmek için yüksek sağlamlığa sahiptir ancak erken olgunluk, yavaş yakınsama hızı vb. gibi bazı kusurları vardır (Cheng ve diğerleri, 2002). Yazarlar, bu kusurların etkilerinin azaltılması için iki aşamadan oluşan bir strateji sunmuştur. Strateji, iki bağlantılı aşamadan oluşur: iş birlikçi hedef arama aşaması ve en yakın üsse dönen İHA'lar için uçuş rotası planlama aşaması. İlk aşamada, belirsiz ortamlarda İHA'ların hedef arama verimliliğini artırmak için IGA kullanılması önerilmiş ve probleme özgü bir bağışıklık operatörü tanıtılarak, algoritmanın sağlamlığını artırmak ve optimal çözüme olan yakınsama hızını arttırmak amaçlanmıştır. İkinci aşamada, her bir İHA için etkili bir yol oluşturmak amacıyla, olay tetikleme anından en yakın dönüş üssüne kadar olan optimal yolun bulunması için Böl ve Fethet Deterministik Yol Optimizasyon Algoritması (BFDYOA) geliştirilmiştir (Z. Zhou ve diğerleri, 2020).

GA algoritmasıyla karşılaştırıldığında, genetik çeşitliliğin artırılmasına odaklanan mutasyon öncelikli Diferansiyel Evrim (Differential Evolution (DE)) algoritmasıyla sürü için hedef yolların ortaklaşa belirlenmesine yönelik çalışmalar da gerçekleştirilmiştir (Cimino ve diğerleri, 2016). Bu makalede, sürü üyeleri arasındaki koordinasyon, İHA'ların hedef rotayı belirlerken salınan dijital feromonlara dayanmaktadır. Adaptasyon ise DE ile gerçekleştirilmekte ve hem İHA'ların hem de ortamın parametrik davranışını içermektedir. Burada, çekici veya iten feromonlar, sürü içindeki İHA'lar arasında, yakın zamanda bulunan hedeflerin uygunluk veya uygunluk dışı durumu hakkında dolaylı iletişime izin vermektedir. Başka bir deyişle, bir İHA yeni bir hedef tespit ettiğinde, çekici bir feromon salar ve komşuluktaki diğer İHA'lar, feromon gradyanını hissedebilir ve hedef desenlerini tespit ederken iş birliği yapmak için bu feromonları takip ederek yol-planlaması yapabilir (Cimino ve diğerleri, 2016).

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda, sürü üyeleri için gerekli yol planlamaları sunulmuş olsa bile gerçek zamanlı uygulamalarda, özellikle ağaçlık alanlar veya yoğun yerleşim bölgeleri gibi sistem dinamiklerine sahip alanlarda keskin dönüşlerin bulunduğu yolların yumuşatılması gerekebilir. Bu durumu göz önünde bulunduran yazarlar yolları düzeltmek ve hesaplama hızını verimli kılmak için buluşsal sürü zekası algoritmalarına yöneldiler (X. Li ve diğerleri, 2016; Perez-Carabaza ve diğerleri, 2018).

Perez-Carabaza ve diğ. yüksek seviyeli düz bölümlü yörüngeleri takip eden bir İHA filosunun arama süresini en aza indirmek amacıyla oluşan ayırık karar değişkenleri içeren problemler için ACO temelli yeni bir yaklaşım sunmaktadır (Perez-Carabaza ve diğerleri, 2018). Sunulan yaklaşımda, sezgisel arama ile feromon izlerinin birleştirilmesi sayesinde, ilk iterasyonlardan itibaren daha yüksek kalitede çözümler elde etmeyi amaçlar. Bu algoritmanın etkili olmasının nedeni, feromon izlerinin maksimum ve minimum değerler arasında bir denge oluşturmasıdır. Bu denge, feromon izlerinin aşırı derecede güçlendirilmesini veya zayıflatılmasını önler, böylece daha dengeli ve optimize edilmiş bir arama yapılmasını sağlayabilir (Perez-Carabaza ve diğerleri, 2018). Benzer şekilde Li ve ark. da buluşsal sürü zekası algoritmalarına yönelerek tarım alanlarındaki İHA'ların uçuş rotalarını optimize etmek için değişken komşu azaltan geliştirilmiş PSO algoritmasını önermektedir (X. Li ve diğerleri, 2016). Burada, temel amaç toplam uçuş mesafesinin en aza indirmesi yerine tüm İHA grubunun uçuş rotalarının minimum iş süresi ile optimize edilmesidir. Önerilen hibrit algoritmada, İHA uçuş rotası planlaması için PSO kullanılırken, genetik operatörler, parçacıkların konum güncellemeleri için kullanılmış ve yerel bir arama tekniği olan değişken komşu azaltan yakınsamanın hızlanması için kullanılmıştır. Bu yaklaşımların başlıca kısıtlaması, ek optimizasyon gerektirmeksizin düz bölümlü yolları takip edebilen dron tarzında İHA'lar için uygunken, farklı yeteneklere sahip sabit kanatlı İHA'lar veya düğümler arasındaki mesafenin önemli olduğu ortamlarda, daha fazla düzeltme veya optimizasyona ihtiyacının olmasıdır.

Buraya kadar bahsedilen yol-planlaması çalışmaları düğüm tabanlı yöntemlere dayanmaktadır. Her ne kadar çalışmaların sonuçları ilgi çekici olsa bile, büyük haritalarda bu çok maliyetli ve zaman alıcı olmaktadır. Son zamanlarda örnekleme tabanlı yöntemler, daha az hesaplama karmaşıklığına sahip olması, daha az düğüm içermesi ve büyük haritalarda daha optimal çözümler sunması nedeniyle İHA içeren ve 3 boyutlu yol planlaması gerektiren uygulamalar için daha kullanışlı hale gelmiştir. Bu durum özellikle İHA'ların batarya kapasitesinin sınırlı olmasından kaynaklıdır ve görevlerini mümkün olan en kısa sürede yerine getirmeleri oldukça önemli bir konudur (Xu ve diğerleri, 2021).

Bu bağlamda İHA uygulamalarına en iyi şekilde uyarlanacak örnekleme tabanlı yol planlama yöntemlerinden biri Rapidly Random-Exploring Tree Star (RRT*) algoritmasıdır (Karaman ve Frazzoli, 2011). Ancak geniş alanlarda bellek tüketiminin artması ve hedefe yakınsama yavaşlaması gibi sorunlar RRT*'ye yeni alternatif arayışlarını başlatmıştır (Fan ve diğerleri, 2023). Informed-RRT* (Gammell ve diğerleri, 2014), RRT*-Smart (Islam ve diğerleri, 2012), PQ-RRT* (Y. Li ve diğerleri, 2020), Cloud-RRT* (D. Kim ve diğerleri, 2014) vb. gibi RRT* versiyonlarına rağmen, son zamanlarda Aslan ve ark. tarafından geliştirilen Goal Distance-based RRT* (GDRRT*), hızlı yakınsama ve büyük alanlardaki başarısıyla dikkat çekicidir (Aslan ve diğerleri, 2023).

Birçok algoritma, yolun kısaltılmasıyla birlikte yol planlama süresini artırır veya zamanı kısaltmak adına sadece küçük ve/veya engelsiz ortamlarda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Büyük ve karmaşık engeller içeren ortamlarda hızlı bir yol planlama algoritması geliştirmek hala zorlu bir süreçtir. Son zamanlarda, araştırmacılar, yolun optimize edilmesi ve daha hızlı planlama sağlanması amacıyla var olan yol planlama algoritmalarında optimizasyon ve yapay zekâ algoritmalarını kullanmışlardır. Wang ve ark. (J. Wang ve diğerleri, 2020), Nöral RRT* algoritmasını önermiştir, bu algoritma için 2B ortamlarda A* algoritması tarafından üretilen yol planlarını referans veri olarak kullanılmış, daha sonra, A* tarafından üretilen ortamlar ve yol planları bir Evrişimli Sinir Ağı (Convolutional Neural Network (CNN)) modeli ile beslenmiştir. Sonuç olarak, yazarlar daha hızlı bir şekilde hedefe ulaşan bir algoritma önerdiklerini ileri sürmüştür. Ancak, A* algoritması büyük ve karmaşık ortamlarda kullanıldığında zorluklar yaşanırken, bu çalışma da sadece 2B ortamlarla sınırlı kalmıştır.

Flores-Caballero ve ark., bu tip 2B ortamlardan sıyrılıp altı farklı 3B ortam senaryosuna dayalı olarak Pruned A* algoritmasıyla bir yol planlama çalışması önermiştir (Flores-caballero ve diğerleri, 2020). Üretilen yollar, DE ve GA algoritmaları ile optimize edilmiştir. Ancak, bu uygulama da küçük ortamlarla sınırlıdır ve dolayısıyla büyük engeller içeren büyük ortamlarda A* çok yavaş çalışmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, Aslan ve diğerleri, çalışmalarında yalnızca yeni bir RRT* türevi olan GDRRT* yöntemini önermekle kalmamış, aynı zamanda yol optimizasyonu için PSO algoritmasını kullanmışlardır (Aslan ve diğerleri, 2023). Bu optimizasyonun bir sonucu olarak, uygulanan GDRRT*-PSO yönteminin büyük ortamlarda planlanan yolu önemli ölçüde kısalttığını öne sürmüşlerdir. Ayrıca, bu çalışma, GDRRT*-PSO'nun hız açısından tercih edilir olması için Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek (Bidirectional Long Short-Term

Memory (BiLSTM)) tabanlı derin bir mimari kullanarak GDRRT*-PSO yolunu tahmin etmek için yeni bir yöntem niteliği taşımaktadır.

Önceki paragraflarda özetlenen hedef arama, izleme ve takibi, iş birlikçi haritalama, lokalizasyon ve yol-planlaması gibi sürükleyici uygulamaların temel amaçlarından biri, çevredeki engellerle çarpışmadan hedefe ulaşmanın en kısa yolunu keşfetmektir. İHA'ların sürü halinde görev yapabilmesi için belirli bir rotaya ihtiyaç vardır. Hareket bilgisinin üretilmesi için başlangıç ve hedef noktaları arasındaki optimum yol, ortamdaki engeller ve ortamın yapısı dikkate alınmalıdır. Hava sürüsü sistemi uygulamalarında hedef veya hedeflere yönelik görevler sırasında veya bu görevlerin dışında toplanma ve formasyon oluşturma gibi alt görevlerin hedefe ulaşmadan tamamlanması daha kritik hale gelmektedir. Bu nedenle sürü hareketlerinin başından sonuna kadar toplama, oluşum kontrolü, hedef araştırması ve yol planlaması gibi birçok alt görevi içeren uygulamaların planlanması gerekmektedir. Bu amaçla bir sonraki bölümde sürü İHA sistemi oluşturmanın ve sürü ile hareket etmenin temelini oluşturan formasyon kontrolü konusunda literatür kapsamında yapılan çalışmalar ele alınmıştır.

2.4.3. Uçuş formasyon kontrolü

İHA'lar ile oluşturulan sürü sistemlerinde başarılı bir yol planlamasının ardından her sürü üyesi, yakın çevresindeki üyelerle etkileşime girmeli ve veri akışını sağlamalıdır. Böyle bir iletişim topolojisinin fikir birliğine dayalı algoritmalar (Konsensüs Algoritmaları) ile sağlanacağı öne sürülmektedir (Davis ve diğerleri, 2016). Sürü sistemlerinde temel prensip, sürünün hareketi boyunca çevresel verileri toplaması ve yakın çevresindeki sürü üyelerle etkileşim içinde olmasıdır. Bu etkileşimle elde edilen veri seti, sürü üyeleri arasında koordineli ve kollektif bir hareketi sağlamak için birçok doğrusal olmayan algoritma ile desteklenebilir. Bu amaçlarla yapılan konsensüsa dayalı çalışmalar toplama (Soysal ve Şahin, 2005), formasyon oluşturma ve kontrol etme (Kuriki ve Namerikawa, 2014; T. Nguyen ve diğerleri, 2018), izleme (Ma'Sum ve diğerleri, 2013), gözetleme (Petit, 2016) ve yiyecek arama (Lu ve diğerleri, 2018) gibi çeşitli konulara çözümler sunmaktadır.

Sürü sistemlerinin oluşturulması için yapılan uygulamaların başında gelen formasyon kontrolü, özellikle kentsel ortamlarda karşılaşılan kargo teslimatı, trafik izleme ve otoyol veya köprü denetim uygulamalarında aşılması gereken bir sorundur (Huang ve diğerleri, 2022). Belirli görevler üzerinde yapılan çalışmalarda (Kuriki ve

Namerikawa, 2014; Lizzio ve diğerleri, 2021, 2022a; Nedjah ve Junior, 2019; Petit, 2016) formasyonun konum verilerini işleyen yer değiştirme tabanlı bir konsensüs algoritması ile sağlanması önerilmiştir. Bunlardan J. Petit, iş birlikçi kontrol sistemleri adı altında akın eden dronlar için formasyon koruma modellemesi yapmıştır (Petit, 2016). İlk olarak, dronlar arasında bir formasyon oluşturmak için geleneksel bir konsensüs algoritması kullanmıştır (Kuriki ve Namerikawa, 2014). Bu şekilde, belirli bir oluşum şekline sahip bir sürü, çevresinin standart bir görüntüsünü elde edebilir. Daha sonra bu formasyon kontrol sistemine formasyon şeklinin maksimum boyutlarına ilişkin verilerden oluşan geri bildirim verilmiştir (Petit, 2016). Söz konusu çalışma kapsamında gerçekleştirilen simülasyonlarda geri beslemeli ve geri beslemesiz formasyon kontrolleri karşılaştırılmış ve önerilen geri besleme kontrolü ile formasyon şeklinin daha verimli korunduğu gösterilmiştir (Petit, 2016). Bu durumlarda önemli bir sınırlama, her üyenin önerdiği algoritmanın (H. T. Nguyen ve diğerleri, 2019) küresel bir konum ölçüm sistemi gerektirmesidir. Dolayısıyla kapalı ortamlarda daha verimli olurken, dış ortamlarda durum daha da zorlaşır. Ayrıca herhangi bir veri kaybının olmadığı varsayılmaktadır. Burada harekete başlamadan önce diziliş şeklinin ayarlanabileceği anlaşılmaktadır. Ancak hareket sırasında oluşabilecek komplikasyonlar göz ardı edildiğinden arızalara ve iletişim kopukluklarına karşı savunmasızdır. Bu durumdan da anlaşılabileceği üzere daha verimli sürü sistemleri için sağlam ve esnek yapıların (Nedjah ve Junior, 2019) geliştirilmesi gerekmektedir.

Spesifik görevlerin yanı sıra, sürünün hareketlerinin detaylı bir şekilde planlandığı, toplama, formasyon kontrolü, hedefe ulaşma gibi birçok alt görevi de içeren uygulamalar son dönemde popüler hale geldi. Bu uygulamalarda bazen sürüden bir lider seçilir ve tüm sistem dinamikleri bu lidere göre şekillendirilir. Lider takibini içeren konsensüsa dayalı toplanma algoritmasının kullanıldığı bir çalışmada (Carli ve diğerleri, 2020), sürü, dağıtılmış yönlü bir graf tarafından oluşturulan belirli bir formasyon şeklini baz alarak bir noktada toplanmıştır. Daha sonra bu formasyon şeklini koruyarak uçuşunu gerçekleştirmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında, bir yiyecek arama algoritması ile sürü üyeleri engellere veya birbirlerine çarpmadan hedefe ulaşmak için uygun yörüngeyi takip etmiştir (Carli ve diğerleri, 2020). Ancak lider takibi, merkezi sürü sistemine benzer olduğundan büyük ölçekli uygulamalar için verimsizdi. Bu nedenle sürü İHA'ları ile hedef odaklı çalışmalarda alan kapsamanın maksimum verimlilikle sağlanması giderek önem kazanan bir sorundur. Özellikle casus İHA'ların takip görevlerinde başarısızlığa neden olabilir Bu sorunun üstesinden gelmek ve otonom hareket sırasında İHA'ların

değişen dinamiklerini ölçmek için, başka bir çalışmada asimptotik olarak kararlı ancak doğrusal olmayan kontrol yasalarını (Lyapunov'un doğrudan yöntemi ve değiştirilmiş değişmezlik ilkesi) içeren konsensüsa dayalı bir algoritma önerilmiştir (Muslimov ve Munasypov, 2021). Bu sayede merkezi olmayan uçak-uçak etkileşim mimarisini benimseyen sabit kanatlı uçakların oluşturduğu formasyon alanı korunmuştur (Muslimov ve Munasypov, 2021). Burada, konsensüs mimarisi altında iletişim topolojisi korunurken, sabit kanatlı lider İHA veya diğer takipçi İHA'ların arızaları ve iletişim aksaklıkları göz ardı edilmiştir. Böyle bir durum liderle ilgili koordinasyon sorunlarına açıktır (Muslimov ve Munasypov, 2021). Bunun yanı sıra, İHA sürülerinin hedefe yönelik hareketi sırasında zaman ve enerji tasarrufu söz konusu olduğunda, formasyon şekillerinin veya alanlarının bozulup yeniden yapılandırılması gerekir. Bu amaçla yapılan bir çalışmada (L. Liu ve diğerleri, 2018), konsensüs iletişim topolojisine sahip bir sistemin formasyonunun yeniden yapılandırılması için dağıtılmış iş birlikçi kontrol problemine karşı Lyapunov teorisi ve Doğrusal Matris Eşitsizliği (Linear Matrix Inequality (LMI)) yöntemi önerilmiştir. Ancak sürü kapasitesinin sistem üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Sürünün büyüklüğü ise çözülmesi gereken başka bir sorundur. Çünkü, çok sayıda İHA'dan oluşan sürülerin temel fikir birliği (konsensüs) algoritmalarıyla kontrol edilmesi zor olabilir. Böyle bir sorunu ele alan bir çalışmada (T. Wang ve diğerleri, 2022), potansiyel bir fonksiyon tabanlı çok katmanlı konsensüs kontrol yapısı önerilmiştir. Bu yapı içerisindeki çok katmanlı graf yapısı sayesinde İHA'lar sabit bir çalışma alanı üzerine rastgele dağıtılarak, katmanlar arasındaki kuvvetler aynı seviyede olduğunda belirlenen formasyona doğru hareket ettirilmiştir (T. Wang ve diğerleri, 2022). Aksi takdirde, İHA'lar, alt katmanların bir dizi alt grubu içinde ilk katmanı oluşturmuş ve ardından hedeflenen formasyona göre grup içindeki komşu İHA'lar belirlenmiştir (T. Wang ve diğerleri, 2022). Bu komşu İHA'lar alt katman topolojisini oluşturmuştur. Sürü istenen formasyona ulaşana kadar, alt katmanların üst katmanlara dahil edilmesi için pozisyonları güncellenmiştir (T. Wang ve diğerleri, 2022). Önerilen uygulama büyük ölçekli sürü formasyonu için olumlu sonuçlar göstermiş olsa da özellikle büyük sürülerde yaygın olan çarpışma nedeniyle üye kaybı göz önüne alınmamıştır. Büyük ölçekli sürü yapılarında, iletişim kopmasından kaynaklanan üye kaybı yaygındır ve sürü, formasyon kontrolünü sürdürmek için yeterince sağlam olmalıdır.

Dinamik bir ortamda sürü robotlarının başlıca sorunlarından biride, sistem parametrelerini dış ortama uyumlu hale getirmek için esnek bir şekilde güncellenmesidir. Bir sürü sistemin kontrol parametreleri, sürü üye sayısındaki değişikliklere ve ortamın

boyutuna duyarlıdır. Bu tür sorunları çözmek için yapılan bir çalışmada, formasyon durum kontrolü ve İHA'ların konumlandırma kontrolü için Geliştirilmiş Konsensüs Algoritması (Improved Consensus Algorithm (ICA)) algoritmasının minimum ayarlama stratejisi kullanılmıştır. Ayrıca, statik ve dinamik engellerle başa çıkmak için ICA-PSO ve Model Öngörülü Kontrol Parçacık Sürü Optimizasyonu (Model Predictive Control Particle Swarm Optimization (MPC-PSO)) algoritmaları önerilmiştir (Wu ve diğerleri, 2020). Önerilen algoritma, çevredeki engellere bağlı olarak farklı başlangıç durumlarına göre farklı uçuş formasyonlarına geçmek için yeterince esnek olsa da uçuş sırasında meydana gelebilecek üye kayıplarına karşı zayıftır (Wu ve diğerleri, 2020). Bu durum göz ardı edilmiştir.

Sürü İHA'lar için yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde, gerçek zamanlı uygulamalardaki veri akışı sınırlamaları ve sistem tasarımındaki olası aksaklıklar nedeniyle hedef tespiti, yol planlaması ve formasyon kontrolü gibi problemlerin hala geliştirilmesi gereken konular arasında olduğu belirlenmektedir. Araştırmacılar tarafından geliştirilen uygulamaların artması, yeni problemlere olan duyarlılığı da artırmaktadır. Örneğin, sürünün hareketi sırasında üye kayıplarına ve iletişim kaybına karşı dayanıklı olma, uçuş formasyonunu yeniden düzenleme esnekliği gibi önemli sorunlar öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, İHA sürü sistemlerine yönelik çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. İlk olarak, sürü sisteminin temelini oluşturan toplanma algoritması kullanılarak çevreye dağılmış İHA'lar belirli formasyon şekillerine göre aynı irtifada toplanmıştır. Ardından, sürü üyelerinin birbirlerine veya çevre engellere çarpmasını önlemek için bir formasyon kontrolü gerçekleştirilmiştir. Önerilen sürü sisteminin geniş alanlarda etkili bir şekilde hedef arama yapabilmesi için bir yol planlama algoritması da önerilmiştir.

Bu çalışmada, öne çıkan bir özellik, sanal lider tabanlı konsensüs algoritması ile oluşturulan formasyon kontrolünün, son dönemin etkili yol planlama algoritması olan GDRRT*-PSO algoritmasıyla birleştirilerek sürü sistemi üyeleri arasında meydana gelebilecek arızalara karşı dayanıklı ve sürü üye sayısındaki değişikliklere göre yeni formasyonlar oluşturabilecek kadar esnek bir topoloji oluşturmaktır. Bu topoloji, sürü İHA sistemlerinin ihtiyaçlarını karşılamak üzere geliştirilen bir dizi algoritmanın bir araya getirilmesiyle şekillenmiştir. İlk olarak, sürü İHA'ların belirli bir formasyonda kontrol edilmesini sağlamak için sanal lider tabanlı konsensüs algoritması kullanılmıştır. Ardından, akıllı yol planlaması için tasarlanmış olan GDRRT*-PSO algoritması devreye

girmiştir. Bu algoritma, geniş alanlarda etkili bir şekilde hedef arama yapmak için tasarlanmıştır. Sonuç olarak, bu entegre yaklaşım, sürü İHA sistemlerinin baştan sona yönetilmesini sağlar ve formasyon kontrolünden yol planlamasına kadar birçok önemli görevi kapsar.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Son dönemlerde İHA'ların kullanım alanları oldukça genişlemiştir, bu durumda teknolojik gelişmelerin rolü büyüktür. Hem yazılım hem de donanım teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, birçok İHA'nın sosyal ve askeri alanlarda daha yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. İHA'lar, kullanıldıkları alanlara göre farklı yapısal çeşitliliklere sahiptir. Örneğin, eğlence, nakliye, ulaşım, dağıtım ve trafik izleme gibi sosyal alanlarda genellikle daha küçük ve manevra kabiliyeti yüksek döner kanatlı İHA'lar tercih edilirken, askeri alanlarda ise daha büyük, sabit kanatlı ve güçlü İHA'lar tercih edilmektedir. Bu farklı yapısal çeşitlilik, her alanın ihtiyaçlarına göre daha uygun çözümler sunabilmektedir.

İHA kullanımının artmasıyla birlikte, çok çeşitli görevlerin daha hızlı ve verimli bir şekilde yerine getirilmesi için yeni ve etkili sistemlere olan talep artmaktadır. Bu bağlamda, özellikle çoklu robotik sistemler üzerinde yoğunlaşılması, görevlerin koordinasyonunu ve yürütülmesini daha etkin hale getirebilir. Örneğin, birden fazla İHA'nın koordine edilmesi, tek bir İHA'ya kıyasla görevlerin daha hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlayabilir.

Bu tez bölümünde, oluşturulan sürü İHA topolojisinin detaylarına daha derinlemesine odaklanılacak ve bu topolojinin görev yürütme süreçlerini nasıl daha etkin hale getirebileceği detaylı bir şekilde incelenecektir. Temel sürü topolojilerinde karşımıza çıkan çeşitli konular arasında graf yapıları, konsensüs algoritmaları, sürü toplanması, uçuş formasyonu oluşturma ve gerçek veya sanal sürü liderinin takibi gibi sürü sistemlerindeki alt topolojiler yer alır.

Graf yapıları, İHA'ların birbirleriyle iletişim kurma ve koordinasyon içinde çalışma yeteneklerini sağlamak için önemli bir rol oynar. Bu yapılar, İHA'ların bir ağ oluşturarak bilgi alışverişi yapmasını ve grup olarak belirli görevleri yerine getirmesini sağlar. Örneğin, İHA'lar arasında doğrudan iletişim veya dolaylı bilgi paylaşımı gerçekleştirmek için bir graf yapısı kullanılabilir. Graf yapıları aynı zamanda potansiyel olarak İHA'ların konumlarını izlemek, diğer üyelerle etkileşimde bulunmak ve grup içindeki diğer İHA'larla senkronize olmak için kullanılabilir.

Konsensüs algoritmaları, sürüdeki İHA'ların birbirleriyle fikir birliğine varmasına ve ortak bir hedefe doğru ilerlemesine yardımcı olurken, sürü toplanması, İHA'ların belirli bir bölgede toplanarak birlikte hareket etmelerini sağlar. Uçuş formasyonu oluşturma, İHA'ların belirli bir düzen içinde uçmalarını sağlayarak güvenlik ve

etkinliklerini artırırken, gerçek veya sanal sürü liderinin takibi, sürü içindeki İHA'ların birbirlerini takip etmelerini ve belirlenen liderin rotasını izlemelerini sağlar.

Bu detaylı inceleme, İHA teknolojisinin gelecekteki kullanımlarını ve gelişimini daha iyi anlamamıza katkı sağlayacak ve sürü İHA sistemlerinin nasıl daha verimli ve etkili hale getirilebileceği konusunda önemli bilgiler sunacaktır. Bu bilgiler, gelecekteki İHA projelerinin planlanması, tasarımı ve uygulanması süreçlerinde değerli bir rehberlik sağlayabilir.

3.1. Sürü İHA Topolojisi

Sürü robotiğinin topolojisi, bir grup robotun koordineli bir şekilde birlikte hareket etmesini sağlayan yapısal düzenlemeleri ifade eder. Bu düzenlemeler, sürü içindeki her bir robotun diğerleriyle olan etkileşimini ve iletişimini yönlendirir. Özellikle yüksek manevra kabiliyetine sahip İHA'lar gibi sistemlerde, bu düzenlemeler üç boyutlu ortamda daha karmaşık hale gelebilir. Örneğin, İHA sürüsünün birlikte hareket etmesini sağlamak için her bir İHA'nın diğerleriyle konumunu, hızını ve görevlerini paylaşması gerekir. Bu, İHA'ların birbirleriyle olan fiziksel veya kablosuz iletişimini içeren bir dizi karmaşık etkileşimi içerir. Örneğin, tamamen bağlantısız bir sürü topolojisinde, her robot bağımsız olarak hareket eder ve diğer robotlardan herhangi bir bilgi almaz. Diğer yandan, merkezi bir kontrol birimi veya lider tarafından yönlendirilen bir sürü topolojisinde, tüm robotlar belirli bir otoriteye bağlıdır ve hareketlerini bu otoritenin talimatlarına göre ayarlar. Bir diğer sürü topolojisi de ağa bağlı sürü topolojileridir. Bu topolojiyi benimseyen robotlar, birbirleriyle iletişim kurarak ve bilgi paylaşarak birlikte hareket ederler. Bu tip topolojiler, genellikle sensör ağı veya kablosuz iletişim ağı gibi altyapıları kullanarak bilgi aktarımını sağlarlar.

Genel anlamda, sürü topolojileri çeşitli uygulamalarda kullanılan robot gruplarının etkin ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için önemli bir rol oynar, bu topolojiler görev gereksinimlerine, ortamın özelliklerine ve robotların yeteneklerine göre çeşitlilik gösterebilir, böylece her türlü uygulama için uygun bir yapı sağlarlar. Bu şekilde, sürü topolojileri, robot gruplarının koordinasyonunu ve iş birliğini optimize etmek için tasarlanmış esnek ve ölçeklenebilir bir çerçeve sunar.

Sürü İHA'lar, birbirleriyle etkileşim halinde olan ve birlikte hareket eden robotların oluşturduğu karmaşık sistemlerdir. Bu sistemlerde, birçok sürü üyesinin aralarındaki etkileşim ve bu etkileşim sonucunda ortaya çıkan birlikte hareket etme

becerisi, sürü kontrolü için kritik öneme sahiptir. Bu etkileşimleri ve birlikte hareket yeteneğini açıklamak için çeşitli model yapıları geliştirilmektedir. Graf teorisi, sürü robotlarının hareketlerini ve etkileşimlerini modellemek, optimizasyon problemlerini çözmek ve sürü içindeki davranışları analiz etmek için son derece uygun bir araçtır (Ming ve diğerleri, 2023). Özellikle, graf teorisi ile oluşturulan graf yapıları, sürü içindeki her bir robotun diğerleriyle olan ilişkilerini ve bu ilişkilerin nasıl organize edildiğini açıkça gösterir (Adoni ve diğerleri, 2023). Bu yapılar, sürü İHA'larının birlikte hareket etme stratejilerini optimize etmek için kullanılabilir. Ayrıca, graf teorisi, sürü İHA'larının uçuş formasyonlarını oluşturmak, çarpışmaları önlemek ve enerji tüketimini azaltmak gibi önemli optimizasyon problemlerini çözmek için de kullanılabilir (Kuriki ve Namerikawa, 2014). Bu sayede, sürü İHA'larının daha etkin bir şekilde birlikte çalışması ve belirlenen hedeflere daha hızlı ve güvenli bir şekilde ulaşması sağlanabilir. Dolayısıyla, graf teorisi sürü İHA'larının kontrol ve yönetimi açısından vazgeçilmez bir araç olarak öne çıkmaktadır.

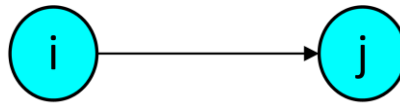
3.1.1. Sürü İHA'ların iletişimde graf yapısı

Graf teorisi, matematiksel bir alan olup, grafiksel yapıların ve bu yapıların özelliklerinin incelendiği birçok alanda kullanılan çok yönlü bir disiplindir (Gross ve diğerleri, 2018). Örneğin, bilgisayar biliminde, ağ analizinde, optimizasyonda ve veri madenciliğinde graf teorisinin birçok uygulaması bulunmaktadır. Özellikle, bilgisayar ağlarının yapısal analizi ve performansının iyileştirilmesi gibi alanlarda graf teorisi önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, sosyal ağların modellenmesi ve iletişim ağlarının analizi gibi sosyal bilimlerdeki birçok problem de graf teorisi kullanılarak ele alınır. Bu nedenle, graf teorisi matematikle birlikte birçok farklı disiplini kapsayan geniş bir alanı temsil eder. Bir graf, bir küme olarak tanımlanan elemanlar ve bu elemanlar arasındaki ilişkilerin bir gösterimidir (Gross ve diğerleri, 2018).

Sürü robotları ve graf teorisi arasında önemli bir ilişki bulunmaktadır. Graf teorisi, birçok nesne arasındaki ilişkileri matematiksel olarak modellemek için kullanılan bir alan olup, bu ilişkiler genellikle noktalar (düğümler) ve bu noktaları birbirine bağlayan çizgilerden (kenarlar) oluşan yapılarla temsil edilir. Sürü robotları da birbirleriyle etkileşim halinde olan ve birlikte hareket eden robotların oluşturduğu sistemlerdir. Sürü robotları, graf teorisiyle yakından ilişkilendirilebilir çünkü bu robotlar genellikle birbirleriyle iletişim kurar ve birlikte hareket ederler (Danilchenko ve diğerleri, 2023).

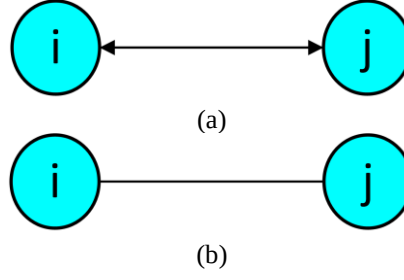
Örneğin, sürü içindeki robotların en kısa yol bulma, bir hedefe ulaşma veya sürü içindeki iletişim ağlarının güçlendirilmesi gibi problemler graf teorisi kullanılarak çözülebilir. Bu sayede, sürü robotları daha etkin bir şekilde koordine edilebilir ve birlikte çalışabilir, bu da çeşitli uygulama alanlarındaki performanslarını artırabilir. Dolayısıyla, graf teorisi sürü robotlarının davranışlarını anlamak ve optimize etmek için güçlü bir araç olarak kullanılabilir.

Sürü robotların birbirleriyle veya bir merkez etrafındaki iletişimi ve bilgi alışverişi, yönlü veya yönsüz graf modelleri kullanılarak ifade edilebilir (Peccoud ve diğerleri, 2024). Yönlendirilmiş graf, her bir kenarın bir yönü olan bir graf türüdür. Yani, bir düğümden diğerine olan bağlantılar bir yönde akar. Örneğin, bir İHA'nın diğer bir İHA'ya bilgi göndermesi fakat geri dönüş alamaması gibi durumlar bu tür graf modelleriyle temsil edilebilir. Yönsüz graf ise kenarların her iki yöne de akabileceği bir graf türüdür. Yani, bir düğümden diğerine olan bağlantılar her iki yönde de geçilebilir. Yönlü bir graf modeli genellikle $G = (N, E)$ çifti ile tanımlanır (Peccoud ve diğerleri, 2024). Burada, $N = \{1, 2, 3 \dots, n\}$ şeklinde, sonlu sayıda elemanı olan bir düğüm kümesini temsil eder ve n adet düğümden oluşur. E , ise kenarlar veya bağlantılar olarak adlandırılır ve $E \subseteq N \times N$ sıralı düğüm çiftlerinden oluşan bir kenar kümesidir. Sürü halindeki i . ve j . üyelerin iletişim halinde olduğu varsayıldığında, bu iletişim Şekil 3.1'deki gibi $(i, j) \in E$ şeklinde ifade edilir. Bu ifade, j üyesinin i üyesinden bilgi alabildiğini fakat, i üyesinin j üyesinden bilgi alamayacağını belirtir. Ayrıca, (i, j) düğümlerine ait kenar için i ana düğüm, j ise alt düğüm olarak adlandırılır.



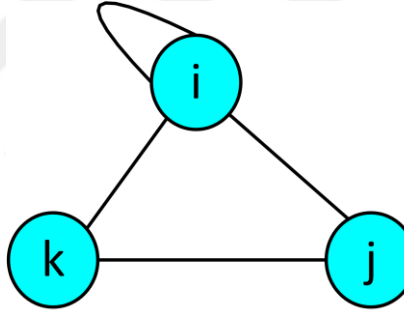
Şekil 3.1. Yönlü graf yapısı

Yönsüz graf modellerinde, Şekil 3.1'de sunulan yönlü graf modelinin aksine, düğüm çiftleri arasında bir sıralama yoktur. Her iki üyede sürü sisteminin eşit şartlardaki düğümlerini oluşturur. Bu durumda, her iki üye de birbirleriyle veri alışverişinde bulunabilir. Bu yönsüz graf modelleri Şekil 3.2'deki gibi gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Yönsüz graf yapısı

Yönlü veya yönsüz graf yapılarında takibi yapılacak olan bir dizi kenarın gösterimi $(i_1, i_2), (i_2, i_3), \dots$, şeklinde tanımlanır (Gross ve diğerleri, 2018). Yönlü graf yapısında Şekil 3.3'deki gibi kenar dizisi aynı düğümde başlayıp aynı düğümde biterse buna döngü yani, cycle denir ve bu dairesel graf veya cycle graf, tek bir döngüden veya başka bir deyişle en az üç düğümden oluşan kapalı bir zincire bağlı bir graftır (Rahman, 2017). Eğer, durum tek bir düğüm üzerinde oluyorsa buna da kendi kendine kenar (self-edge) denilmektedir.



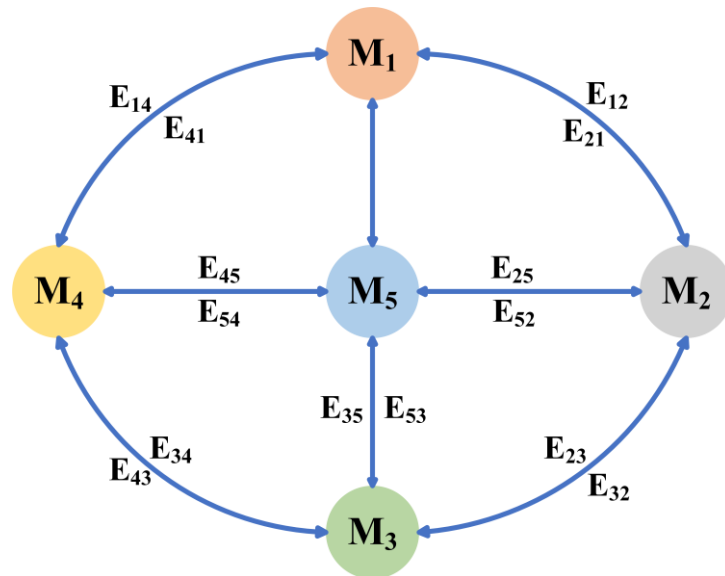
Şekil 3.3. Döngü graf yapısı

Sürü veya çoklu robotik sistemlerde hedeflenen göreve yönelik farklı formlarda graf yapıları tercih edilmektedir. Örneğin, bir sürü robotun bir depoda koordineli bir şekilde malzemeleri taşıması gereken bir lojistik operasyonunu düşünelim. Her bir robot, depodaki farklı bölgeler arasında malzemeleri taşımak için birbirleriyle iletişim halinde olmalıdır. Bu durumda, her bir robotun bir düğüm olduğu ve robotlar arasındaki iletişimi temsil eden yönlendirilmiş bir graf kullanılabilir. Her bir düğüm, belirli bir alanda taşınması gereken malzemeleri temsil eder ve graf, bu malzemelerin hangi robotlar arasında nasıl dağıtılacağını gösterir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda, bir sürü İHA sistemi ele alınmıştır. Bu sistemde, İHA'ların belirli bir alanda hedefleri tespit etmek ve izlemek için iş birliği yapmaları gerekebilir. Bu tür bir görev için, sürü halindeki İHA'ların iletişim topolojisi,

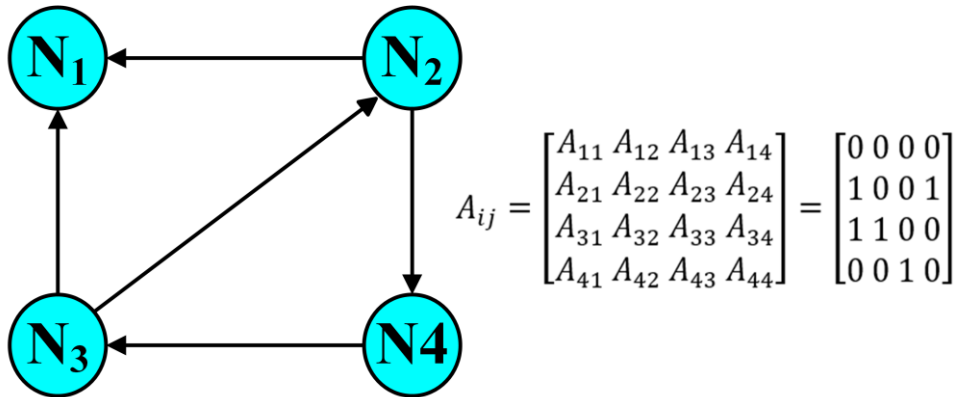
anlık konum verilerinin işlenebildiği, bilgilerin kolaylıkla paylaşılabildiği, her İHA'nın bir düğüm olduğu ve İHA'lar arasındaki iletişimi temsil eden yönlü bir graf kullanılarak oluşturulabilmektedir. Bu graf yapısı, her İHA'nın belirli bir hedefi izlemek için birlikte çalıştığı bir senaryoyu temsil edebilir. Bu tezdeki uygulamalarda, konum verilerine dayalı sürü iletişimi Dağıtılmış Yönlü Grafik (DYG) yapısı ifade edilmektedir. Bu graf yapısı ağdaki düğümler arasındaki ilişkileri ve veri akışını temsil etmek için kullanılan bir yapıdır. Yönlü bağlantılara sahiptir ve dağıtılmış sistemlerde sıklıkla kullanılır. Dinamik değişikliklere uyum sağlayabilir ve düğümler arasında iş birliği yapılmasını, veri akışını ve veriler üzerinde uygulanan etkinlik izlenebilirliğini sağlar (Z. Li ve diğerleri, 2015). Bu özelliklerinden ötürü, DYG, genellikle karmaşık ve büyük ölçekli ağ ortamlarında veri iletişimi ve iş birliği için tercih edilmektedir (Abdessameud ve Tayebi, 2018).

Bu tez çalışmaları kapsamında sürü İHA sistemleri için önerilen DYG yapısının genel formu $G_i = (M_i, E_{ij})$ şeklinde ifade edilebilir. Burada, M_i düğüm kümesini yani sürü üyesi İHA'ları tanımlarken, E_{ij} , i üyesi ile komşuluğunda bulunan j üyeleri arasındaki kenarlar kümesini belirtir. Bu tezde önerilen algoritmalar kapsamında kenarlar kümesi sürü üyeleri arasındaki anlık Öklid mesafesi d olarak tanımlanmıştır. DYG, her üyenin kendi alt kümesinin diğer üyeleriyle doğrudan iletişim kurabildiği bir graf yapısıdır. Bu yapının özellikle tercih edilmesinin en önemli nedeni üyeler arasında bütünsel iletişim olması ve her üyenin iletişim topolojisine bilgi akışı sağlayarak sistem kontrolünü daha verimli hale getirebilmesidir. Söz konusu temel DYG yapısı Şekil 3.4'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Dağıtılmış yönlü graf (DYG) Yapısı

Sürü uygulamaları, karmaşık sistemlerdeki davranışı modellemek ve anlamak için yaygın olarak kullanılır. Bu uygulamaların fiziksel modellemesinde graf yapıları kadar, matematiksel modellemesinde de komşuluk (adjacency) matrisi kullanılmaktadır. Komşuluk matrisi, bir grafın düğümleri arasındaki ilişkileri ve bağlantıları temsil etmek için kullanılan bir kare matristir. Bu matris, grafın yapısını matematiksel olarak temsil ederken, matrisin her bir elemanı da grafın düğümleri arasındaki bağlantı durumunu gösterir. Örneğin, eğer i . düğüm ile j . düğüm arasında bir kenar varsa, ilgili matris elemanı 1'e eşit olur; aksi halde 0'dır. Graf yapısını anlamak için komşuluk matrisi kullanıldığında, her bir düğümün kenarlarına olan bağlantıları kolayca gözlemlenebilir. Ayrıca, bu matris, grafın yönlü veya yönsüz graf olup olmadığını belirlemek için de kullanılabilir. Bu şekilde, bir grafın yapısını anlamak ve analiz etmek için komşuluk matrisi önemli bir araçtır ve graf teorisinde sıkça kullanılan bir kavramdır. Graf teorisi ve komşuluk matrisi, sürü uygulamalarının yanı sıra birçok diğer alanda da geniş bir şekilde kullanılan önemli kavramlardır. Örneğin, Şekil 3.5'de verilen yönlü graf yapısı 4 düğümden ve 5 kenardan oluşmaktadır. Aşağıda verilen komşuluk matrisi A_{ij} 'nin i . satırı ve j . sütunu, i . düğümü ile j . düğümü arasında bir kenarın varlığını göstermektedir. Eğer i . ve j . düğümleri arasında bir kenar varsa, ilgili matris elemanı 1'e eşit olur; aksi halde 0'dır. Yani, $(A_i, A_j) \in E$ ise $A[i][j] = 1$ iken $(A_i, A_j) \notin E$ ise $A[i][j] = 0$ olur. Şekil 3.5'de verilen graf yapısının komşuluk matrisi elemanları A_{21} ve A_{31} 'nin değeri 1 iken A_{12} ve A_{13} 'ün değeri 0'dır. Burada, 2. düğümden ve 3. düğümden 1. düğüme yönlü bir kenar bulunmaktadır. Kenarlar tek yönü olduğundan aksi yönlerde bilgi alışverişi olmadığından A_{12} ve A_{13} 'ün değeri 0'dır.



Şekil 3.5. Dört düğümden oluşan yönlü graf yapısının komşuluk matrisi

Bir graf yapısını temsil etmek için kullanılan bir başka yöntem de komşuluk listesidir. Komşuluk listesi, bir grafın her düğümünün komşu düğümleriyle ilişkilerini belirtmek için kullanılan bir liste veya dizi yapısıdır. Her düğümün bir listesi vardır ve bu liste, o düğümün doğrudan komşularını içerir. Örneğin, bir düğümün komşuluk listesi, o düğümün doğrudan bağlı olduğu diğer düğümleri içerebilir. Komşuluk listesi, grafın yapısını daha açık bir şekilde gösterir ve her bir düğümün komşularını kolayca görselleştirmeye olanak tanır. Ayrıca, yönlendirilmiş grafiklerde düğümlerin giriş ve çıkış derecelerini belirlemek için de kullanılabilir. Graf yapısı ve komşuluk listesi arasındaki ilişki, bir grafın yapısını temsil etmek ve analiz etmek için farklı yöntemler sunarak graf teorisinde önemli bir rol oynar. Şekil 3.5’de verilen yönlü graf yapısının düğümlerine ait komşuluk listeleri: $N_1 = \{\}$, $N_2 = \{N_1, N_4\}$, $N_3 = \{N_1, N_2\}$, ve $N_4 = \{N_3\}$ şeklinde yazılabilir.

Komşuluk matrisi ve listesi, graf yapılarını temsil etmek ve analiz etmek için kullanılan farklı yöntemlerdir, her birinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Komşuluk matrisi herhangi iki düğüm arasındaki bağlantıyı hızlıca kontrol etme imkânı sağlar ve matrisin belirli bir elemanını kontrol etmek sabit bir zaman alır. Ayrıca, lineer cebir ve matematiksel operasyonlar için uygundur ve grafın özelliklerini matematiksel olarak analiz etmek için kullanılabilir. Grafın büyüklüğü ne olursa olsun, matrisin boyutu sabit kalır ve matris operasyonları genellikle hafıza ve işlemci kullanımı açısından etkilidir. Ancak, büyük graf yapıları için gereksiz derecede fazla bellek tüketebilir ve özellikle seyrek graf yapılarında boşluk içerebilir. Graf büyüdükçe matris boyutu da artar, bu da bellek ve işlemci kullanımını artırır. Eğer graf seyrekse, yani düğümler arasındaki bağlantılar azsa, matrisin çoğu elemanı sıfır olacaktır ve bu gereksiz bellek kullanımına yol açabilir.

Komşuluk listesi, graf seyrekse daha az bellek kullanır ve yeni düğümler veya kenarlar eklemek veya çıkarmak kolaydır, çünkü ilgili düğümün listesine yeni bir giriş eklemek veya çıkarmak yeterlidir. Ayrıca, grafın yapısını daha açık bir şekilde gösterir ve komşuları hızlıca görselleştirmeye olanak tanır. Ancak, iki düğüm arasındaki doğrudan bağlantıyı kontrol etmek için komşuluk listesini taramak gerekebilir ve matematiksel işlemler, matris temelli algoritmalar kadar doğal değildir. Ayrıca, liste elemanları ekleme sırasına bağlıdır ve bu da düzensiz bellek dağılımına yol açabilir.

Sonuç olarak, hangi temsili kullanmanın daha iyi olduğu, uygulanacak işlemlere, grafın boyutuna ve yapısına bağlıdır. Örneğin, matris temelli işlemler için komşuluk matrisi daha uygundur, ancak büyük ve seyrek graf yapıları için komşuluk listesi bellek

verimliliği açısından daha iyidir. Bu tez kapsamında DYG graf yapısı kullanıldığından komşuluk matrisi üzerinden bilgi alışverişinin kontrolü sağlanmıştır. Ayrıca, sanal lider tabanlı sürü formasyonu için önerilen graf yapıları da sürü büyüklüğüne göre özel olarak belirlenmiştir. Bu yapılara sonraki bölümlerde değinilecektir.

3.1.2. Konsensüs algoritması

Sürü halinde çalışan İHA sistemlerine yönelik savaş, gözetleme ve keşif görevleri, tehlikeli madde ayıklama ve dağıtma, uzay tabanlı interferometreler, yeniden yapılandırılabilir sensör ağları gibi potansiyel uygulamaların gerçekleştirilmesi için, formasyon kontrolü, yiyecek arama, görev ve rol atama, yük taşıma, hava trafik kontrolü ve ortak arama gibi çeşitli iş birlikçi kontrol yeteneklerinin geliştirilmesi gerekmektedir (Ouyang ve diğerleri, 2023). Birden fazla otonom aracın iş birlikçi kontrolünün sağlanması için bir dizi teorik ve pratik zorlukların aşılması gerekir. Bunlar, tek bir sistem yerine alt sistemlerden oluşan bir sistemin geliştirilmesi, ekibin iletişim bant genişliği ve bağlanabilirliğinin artırılması, araçlar arasındaki bilgi alışverişinin güvenilir hale getirilmesi ve ne zaman, kiminle ve neyle gerçekleşeceğine karar verilmesi gibi problemlerdir (Lizzio ve diğerleri, 2021). Ayrıca, sürü hedefleri ile bireysel hedefler arasındaki uzlaşmanın fikir birliğine dayandırılması ve her bir aracın hesaplama kaynaklarının her zaman sınırlı olması da göz önünde bulundurulmalıdır.

Gerçek dünyadaki iletişim topolojileri genellikle tam bağlantılı değildir. Çoğu zaman, İHA'ların göreceli konumları ve çevresel faktörler gibi değişkenlerden etkilenir ve bu nedenle zamanla dinamik olarak değişirler. Ek olarak, kablosuz iletişim kanalları çok yönlü olmaya, zayıflamaya ve kesintilere maruz kalabilir. Bu nedenle, gerçek dünyadaki iletişim kısıtlamaları iş birlikçi kontrolü sağlamak için önemli bir zorluk oluşturur. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, sürü İHA'ların komşuluk ilişkileri kullanılarak ayrı bir iletişim ağı oluşturabilir.

İş birlikçi fikir birliği diğer bir adıyla konsensüs algoritmaları, araçlar arasında yalnızca komşu araçlarla etkileşim olduğunu varsayar ve araçlar, komşularının bilgi durumlarına göre kendi bilgi durumlarını günceller (Lizzio ve diğerleri, 2022a). Hedef, ağdaki tüm araçların bilgi durumlarının ortak bir değere ulaşmasını sağlayacak şekilde güncellenmiş bir kural geliştirmektir. Bu amaçla geliştirilen konsensüs algoritmaları bir grup veya ağdaki bağlı cihazlar arasında ortak bir hedefe ulaşmak için birlikte çalışma yeteneğini ifade eder (Lizzio ve diğerleri, 2022b). Bu algoritma, genellikle dağıtık

sistemlerde kullanılır ve her bir cihazın veya düğümün bağımsız olarak karar verdiği ancak sonunda tüm düğümlerin fikir birliğine ulaştığı iletişim kısıtlamaları, düğüm arızaları ve diğer olası sorunlarla başa çıkma protokolü içerir. Bu algoritmalar, sadece komşular arasındaki iletişimi gerektirdiği için güç tüketimini minimize eder ve gizliliği artırır. Ayrıca, sürünün ölçeklenebilirliğini ve sağlamlığını geliştirir.

Konsensüs algoritmaları, araçlar arasındaki etkileşim topolojilerinin dinamik olarak değişmesine izin verir, bu da iletişim bağlantılarının zamanla seyrek veya aralıklı hale gelmesine olanak tanır (Campion ve diğerleri, 2019). Bu özellik, gerçek dünya senaryolarında iletişim topolojilerinin genellikle tam olarak bağlantılı olmadığı ve iletişim bağlantılarının genellikle gürültülü ve güvenilmez olduğu durumlarda son derece faydalıdır (Y. Zhang ve diğerleri, 2019). Ayrıca, araçların sınırlı iletişim aralığına ve bant genişliğine sahip olduğu durumlarda da bu algoritmaların kullanımı oldukça etkilidir.

En bilinen konsensüs algoritmaları kripto para birimlerinin temelini oluşturan İşin Kanıtı (Proof of Work (PoW)) algoritması ve düğümlerin arızalanabileceği ve hatta kötü niyetli olabileceği durumlarda güvenilir bir ağ oluşturacak Pratik Bizans Hata Toleransı (Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)) algoritmasıdır. PoW algoritması madencilik adı verilen işlem gücü gerektiren karmaşık matematiksel problemleri çözerek blok zincirinin onaylanmasını sağlar (Sriman ve diğerleri, 2021). PBFT ise bir sürüye liderlik eden aracın, bazı araçların arızalanması veya düşmanla iş birliği yaparak sahte komutlar gönderebileceği ve gerçekten emir veren liderin bunu nasıl tespit edebileceği problemine karşı güvenilir bir konsensüs sağlar (Qi ve Guan, 2023).

Konsensüs algoritmasının temel prensibi, her İHA'nın benzer bilgi durumlarına sahip olmasını sağlamaktır. Bu, araçlar arasındaki iletişim ağının sürekli bir iletişim sağlaması veya iletişim bant genişliğinin yeterince büyük olması durumunda her bir aracın bilgi durumunun güncellenmesini sağlar. Bilgi durumu güncellemesi, iletişim verileri sürekli olarak aktarıldığında, yani sürekli zaman boyunca bir diferansiyel denklem kullanılarak modelleme yapılır (Lizzio ve diğerleri, 2021). Ancak, iletişim verileri ayrı paketler halinde iletiliyorsa, yani ayrık zaman dilimlerinde, bilgi durumu güncellemesi için bir fark denklemi kullanılır (Lizzio ve diğerleri, 2021).

3.1.2.1. Sürekli zamanlı sistemlerde konsensüs algoritması

Sürü robotığında komşular arasındaki iletişim, sürekli bilgi paylaşımına izin verdiğinde veya iletişim bant genişliği yeterince büyük olduğunda, sistem bir dizi

diferansiyel denklem tarafından yönetilen sürekli zamanlı bir sistem olarak modellenebilir (Ren ve Beard, 2008). Bu durumda, her bir düğümün durumu ve davranışı, sürekli olarak güncellenen bilgi akışı ile belirlenir. Örneğin, bir İHA ağı içindeki her İHA'nın konumu ve hızı, diğer İHA'lardan aldığı sürekli konum ve hız bilgileriyle belirlenebilir. Bu sürekli bilgi alışverişi, sistemdeki her bir düğümün yani İHA'nın dinamik davranışını tanımlayan diferansiyel denklemlerin entegrasyonunu gerektirir. Bu şekilde, sürekli zamanlı bir sistem modeli oluşturularak sistem analizi ve kontrolü için matematiksel bir model sağlanır.

Sürekli zamanlı sistemlerde İHA'ların bilgi değişkeni C_i olsun. Bu sistemde bilgi değişkeni üzerinde fikir birliği sağlayacak İHA'ların sayısı ve aynı zamanda düğüm sayısı $i = 1, 2, 3, \dots, n$ olarak kabul edildiğinde yalnızca yerel bilgi alışverişinden yararlanılarak C_i 'nin ortak bir değere yakınsaması amaçlanır. Yerel bilgi alışverişinde bulunacak bir i düğümünün komşularının kümesi N_i olarak ifade edilir. Bu bağlamda konsensüs algoritmasının genel ifadesi Denklem 3.1'deki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{C}_i(t) = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} [C_i(t) - C_j(t)] \quad (3.1)$$

Burada, i . İHA'dan alınan bilgi verisi C_i ile i . İHA'nın komşuluğunda bulunan j . İHA'dan alınan veri C_j arasındaki farkın zaman sonsuza doğru giderken 0 olması beklenir. Böylece sürü üyesi İHA'ların temelde aynı C_i noktasında fikir birliğine ulaştığı varsayılır. Denklemden, sürü üyeleri arasındaki bilgi verilerinin farkının bir çarpanı olarak verilen katsayı a_{ij} , Bölüm 3.1.1'de bahsettiğimiz sürü topolojilerine ait graf yapılarının komşuluk matrisi A_{ij} 'dir. Bu matris, konsensüsü sağlayacak sürü üyelerinden bilgi verisi taşıyan veya taşımayan üyelerin sisteme olan katkısını ifade etmektedir. Denklem 3.1'de ifade edilen dağınık sürü sistemine ait konsensüs ifadesi doğrusal bir dinamik sistem haline getirilerek daha kolay çözümlenebilir. Bunun için, Denklem 3.2'de verildiği haliyle durum vektörü $C(t)$ ve $-\mathcal{L}$ durum matrisi cinsinden aşağıdaki gibi yeniden ifade edilebilir (Ren ve Beard, 2008).

$$\dot{C}(t) = -\mathcal{L}_n C(t) \quad (3.2)$$

Burada, $[C(t) = C_1(t), C_2(t), \dots, C_n(t)]$ global durum vektörüdür ve böyle bir sistemin kararlılık özellikleri durum matrisi $-\mathcal{L}$ spektrumuna bağlıdır. Durum matrisi her zaman en az bir boş özdeğere sahiptir, bu da sistemin asimptotik olarak kararlı olmadığı anlamına gelir. Fakat, matrise ait spektrum 0'da yalnızca tek bir boş özdeğer veriyorsa ve geri kalan özdeğerler negatif gerçekte bileşenleri içeriyorsa sistemin dahili kararlılığı sağlanabilir. Sürü sistemlerinde bu tip bir kararlılığın sağlanmasında Bölüm 3.1.1'de bahsettiğimiz DYG modellemeleri kullanılabilir. Nitekim, Ren ve Beard çalışmalarında, yönlendirilmiş yayılan ağaçlı bir graf olan G ile ilişkilendirilen zıt Laplacian $-\mathcal{L}$ 'nin, yalnızca basit bir sıfır özdeğerine sahip olduğunu aynı zamanda diğer tüm özdeğerlerin de negatif gerçekte bileşenlere sahip olduğunu göstermektedir (Ren ve Beard, 2008). Benzer şekilde, eğer yönsüz bir G grafi bağlı bir graf ise bu graf ile ilişkili zıt Laplacian $-\mathcal{L}$ basit bir 0 özdeğerine sahiptir ve diğer tüm özdeğerler negatiftir (Lizzio ve diğerleri, 2021). Bu bulgu, bu tür ağların karmaşık yapısına rağmen dahili olarak kararlı olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, sistemin dahili kararlı olduğu ve durum değişkenleri $C(t)$ 'nin herhangi bir başlangıç koşulu $C_i(0)$ için sınırlı kaldığı söylenebilir.

$\mathcal{L}$, matrisi dağıtılmış yönlü graf yapısı G ile ilişkilendirildiğinde ve zaman sonsuza ıraksadığında $C(t)$, bilgi verileri $\mathcal{L}C(0)$ 'a yakınsar; burada $\mathcal{L} = 1_n v^T$ 'dir. Durum matrisi $\mathcal{L}$ için v sol birim özvektörüdür. Dolayısıyla, her C_i bilgi değişkeni değerinin $\sum_{i=1}^n v_i C_i(0)$ tarafından belirlenen ortak bir değere yakınsadığı ve konsensüsün sağlandığı görülebilir (Ren ve Beard, 2008).

3.1.2.2. Ayırık zamanlı sistemlerde konsensüs algoritması

Konsensüs tabanlı sürü algoritması, kooperatif sürü üyeleri arasındaki komşuluk ilişkilerine dayalı olarak bilgi akışını sağlayan bir algoritmadır. Bu algoritma, sürü üyeleri arasındaki iletişim ve bilgi paylaşımını yönetmek için tasarlanmıştır. Sürü üyeleri, kendi durumlarını diğer üyelerle paylaşarak ve alınan bilgileri işleyerek, ortak bir konsensüs hedefine ulaşmaya çalışırlar. Bilgi verileri, sürekli zaman boyunca değil, ayırık paketler halinde paylaşıldığında, zamanın belli kesitlerinde örnekleme yapılarak elde edilen ayırık zamanlı veri değişkenleri $C_i[k]$ bilgi durumu güncellemesi için fark denklemlerini kullanır (Lizzio ve diğerleri, 2022a). Böylece, ayırık zamanlı konsensüs algoritmasına ait eşitlik Denklem 3.3'deki gibi olur.

$$C_i[k + 1] = \sum_{j \in N_i} d_{ij} C_j[k] \quad (3.3)$$

Ayrık zamanlı konsensüs algoritmasının durum örneklemesinin sürü üyeleri arasındaki bilgi alışverişini ve konsensüs oluşturma sürecini etkili bir şekilde yönettiği öne sürülebilir. Burada, $d_{ij} > 0$ durumunda İHA'lar arasında iş birlikçi veri akışı güncellemelerinin olduğu ve i . sürü üyesinden komşusu j . üyeye bilgi akışının olduğu varsayılır. Aksi durumda yani, $d_{ij} = 0$ olduğunda ise İHA'lar arasında hiçbir bilgi akışının olmadığı varsayılır. d_{ij} , tüm komşu sürü üyeleri arasındaki ilişkiyi içerecek şekilde bir matrise aktarıldığında, her durumda bir özvektörü $\mathbf{1}_n$ 'e eşit olan bir satır stokastik matrisi D oluşturulur (Ren ve Beard, 2008). Bu durumda, i . sürü üyesinin güncellenmiş konsensüs verisi $C_i[k + 1]$, üyenin mevcut durumu ile komşuluğundaki yani C_i kümesindeki üyenin Denklem 3.4'de verildiği üzere ağırlıklı ortalamasından oluşturulur (Ren ve Beard, 2008).

$$C[k + 1] = DC[k] \quad (3.4)$$

Satır raslantısal matrisi D , dağıtılmış yönlü graf yapısı G ile ilişkilendirildiğinde ve zaman sonsuza ıraksadığında $C[k]$, $DC[0]$ 'a yakınsar; burada $D = \mathbf{1}_n \mu^T$ 'dir ve D 'nin sol birim özvektörüdür μ ile ifade edilir. Dolayısıyla, her C_i bilgi değişkeni değerinin $\sum_{i=1}^n \mu_i C_i(0)$ tarafından belirlenen ortak bir değere yakınsadığı ve konsensüsün sağlandığı görülebilir (Ren ve Beard, 2008). Bu durum, yönlü ve yönsüz ağların dinamikleri ve davranışları üzerine daha derinlemesine analiz ve araştırmalar için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

3.2. Konsensüs Tabanlı Sanal Lider Sürü Topolojisi

İHA modellemelerinde, genellikle konum, hız veya ivme gibi değişkenlere dayalı temel fiziksel dinamikler belirlenir. Bu tez kapsamında, Denklem 3.5'te sunulan ayrık zamanlı tekil entegratör dinamik modeli tercih edilmiştir (Yang ve diğerleri, 2018). Bu modelin tercih edilme sebebi, iletişim topolojisinin uygulanabilirliği ve kontrolünün daha kolay anlaşılmasına olanak tanımasıdır. Ayrıca, İHA'ların hareket dinamiklerinin modellenmesi sırasında Kalman filtresi gibi sezgisel ve ayrık durum takibi tekniklerinin

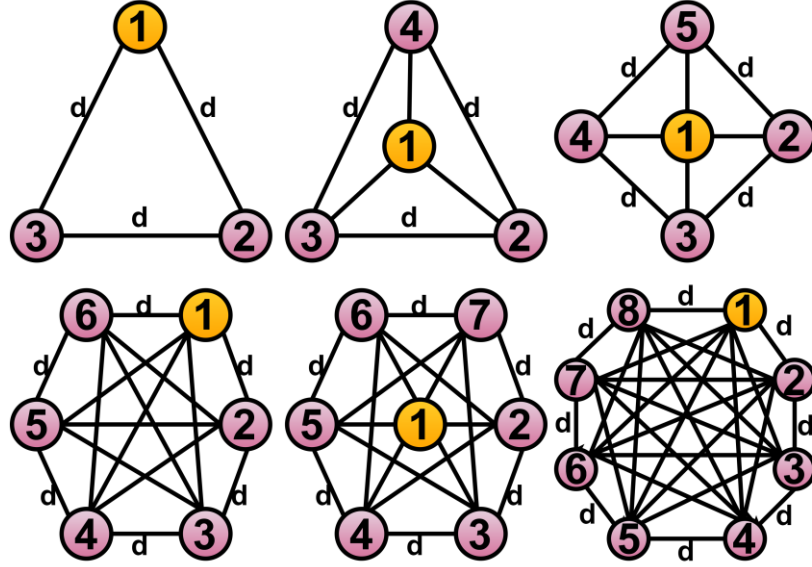
kullanılmasına olanak tanıdığı da belirtilmektedir (Yan ve diğerleri, 2023). Bu şekilde, İHA'ların belirsizliklerle başa çıkma yeteneklerini artırarak, gerçek zamanlı durum takibi ve kontrolünü daha etkin hale getirebilir. Bu tez çalışmasında, Denklem 3.5'deki gibi konum bazlı temel bir ayrık zamanlı tekil integratör modelinin kullanılması, İHA'nın hareket dinamiklerinin daha iyi anlaşılmasını ve kontrolünün daha kolay ve etkin bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + u_i(t), \quad i \in N, N = \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (3.5)$$

Burada, üç boyutlu uzayda sürü halinde hareket eden bir İHA'nın anlık konumu $x_i(t)$ olarak ifade edilir. Kontrol girdisi $u_i(t)$, İHA'nın bir sonraki konumu $x_i(t + 1)$ üzerinde etkilidir. Sürü İHA uygulamalarının çoğunluğu, kontrol girdisinin ortam değişkenlerine bağlı olarak ayarlanmasına ve sürü içinde koordineli ve kolektif hareketlerin sağlanmasına odaklanmaktadır. Bu tez çalışmasında, kontrol girdisinin sistem performansına etkili ve verimli bir şekilde katkı sağlaması için bir dizi algoritma geliştirilmiştir.

İHA sürüsünün boyutu, sürü üyelerini içeren bir küme olan N ile belirtilir ve her sürü üyesi, bir R yarıçaplı küresel sensör ayak izine sahiptir. Konsensüs temelli sürü topolojileri, üyeler arasında bütünsel iletişimi ve her üyenin bu topoloji üzerindeki veri akışına katkısını içerir, bu da önemli avantajlar sağlar. Sürü dağılımı içerisinde anlık konumun anında paylaşılabilirdiği bu topolojide daha önce bahsettiğimiz DYG yapıları kullanılır (Z. Li ve diğerleri, 2015). Her sürü üyesi, diğer komşu sürü üyeleriyle doğrudan temas halindedir.

Gerçek zamanlı olarak sürüler halinde çalışan birçok robotik sistem, iç veya dış müdahalelere maruz kalabilir. Bu nedenle, sürünün bu gibi durumlarda sağlamlık ve esneklik göstermesi önemlidir. Bu tez kapsamında da İHA sürü sistemleri için sağlamlık ve esneklik sağlayacak Konsensüs-tabanlı Sanal Lider Takibi Algoritması (KSLTA) geliştirilmiştir. Bu algoritma, sürü sisteminin, iletişim kesintileri veya üye arızaları durumunda bile parametrelerini dinamik olarak ayarlayarak kendisine verilen görevleri ustalıkla yerine getirebilmesini sağlar. Sanal lider temelli ve sürü iletişiminde kullanılan graf yapısı $G_{SL} = (N, E) \cup \{S_L\}$ olarak gösterilir. Bu yapı standart graf yapısına bağlı sürüye eklenecek olan sanal lider (S_L) İHA'nın özelinde tanımlanmış bir dağıtılmış yönlü graf yapısıdır. Sanal lider takibi üzerine kurulu sürü topolojisinin graf yapıları Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Sanal lider tabanlı DYG yapısı

Burada sunulan DYG yapıları, geometrik hesaplamaların yoğunluğunu azaltmak amacıyla sanal liderin konumuna göre yeniden yapılandırılmaktadır. Örneğin, üç veya dört İHA'dan oluşan sürülerde, sanal lider trigonal ve tetragonal formasyonun merkezine yerleştirilir. Beş veya daha fazla üyeden oluşan sürülerin düzeni, üye sayısının tek veya çift olmasına bağlı olarak belirlenir. Tek üyeli sürülerde, sanal lider çift taraflı bir çokgenin tepe noktasında konumlandırılırken, çift üyeli sürülerde, sanal lider çift taraflı çokgenin merkezinde yer alır. Ayrıca, sürü üyeleri arasındaki anlık mesafe d , konsensüs algoritmalarında fikir birliğine varılan bilgi değişkenini temsil eder. Burada, d mesafesi, üyeler arasındaki anlık mesafelerden oluşan kenar seti E_{ij} 'yi oluşturur. Dağınık bir sürü, büyüklüğüne göre önceden belirlenmiş bir formasyon şeklini alır. Her i ve j üyesi arasındaki mesafe d , Denklem 3.6'daki gibi ifade edilir (Lizzio ve diğerleri, 2022a).

$$d_{ij} = ||x_i - x_j|| \quad (3.6)$$

Bu tez kapsamında sunulan konsensüs tabanlı sanal lider algoritmasının temel amacı DYG yapısı ile ilişkili D matrisinin d mesafesine bağlı belirlenen aralıkta kalarak belirli bir irtifada toplanan sürü sisteminin kararlı bir uçuş formasyonu oluşturmasını sağlamaktır. Bu bağlamda sürü topolojisinin ilk adımı bulunduğu ortamda sürüye uygun bir eş yükselti de toplanmasıdır.

3.2.1. Eş yükseltide (İrtifada) toplanma algoritması

Sürü İHA'ların kontrolü tek bir İHA'nın kontrolüne nazaran oldukça zor ve karmaşık problemleri beraberinde getirir. İHA'lar ile yapılacak olan koordineli ve kollektif hareketler sırasında üç boyutlu ortam parametrelerinin kontrol edilmesi ve güncellenmesi sistem üzerinde işlem yükünü arttırmaktadır. Dolayısıyla, sürü İHA sistemlerinin kullanılacağı uygulama kapsamında elverişli bir irtifada toplanması ve göreve yönelik uçuşları buna göre gerçekleştirmesi sürü sistemleri açısından önemli ve stratejik avantajlar sağlayabilir. Belirli bir irtifada toplanma stratejisi başta askeri operasyonlar olmak üzere tarım uygulamalarından, arama kurtarma faaliyetlerine ve altyapı denetimine kadar geniş bir yelpazede kullanılabilir (Pan ve diğerleri, 2023). Bu strateji sayesinde enerji verimliliği büyük ölçüde artırılabilir ve sabit bir irtifada uçmak, sürekli yükselip alçalmak yerine, sabit bir hızda ilerlemeyi gerektirir, bu da İHA'ların daha uzun süre havada kalmasını sağlayabilir. Enerji verimliliğinin yanı sıra iletişim kolaylığı da önemli bir faktördür; sabit bir irtifada toplanmış İHA'lar, birbirleriyle daha istikrarlı bir iletişim kurabilir, kollektif hareket koordinasyonlarını artırabilirler. Ayrıca, belirli bir görev için sürü halinde çalışan İHA'ların sabit bir irtifada toplanması, görevin daha etkili bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanır; örneğin, gözlem görevlerinde daha kapsamlı bir alanı izleyebilir veya takip edebilirler. Güvenlik açısından bakıldığında da sabit bir irtifada toplanan İHA'lar hava sahasında daha belirgin bir kontrol sağlayarak diğer hava araçlarıyla çarpışma riskini azaltabilir, böylece genel hava trafiği güvenliğinin de artmasını sağlayabilir. Genel olarak bakıldığında, belirli bir görev için düzenli bir şekilde konumlandırılmış İHA'lar, operasyonel verimliliği artırır, görevin gereksinimlerini daha iyi karşılayabilir ve daha hızlı yanıt verebilirler. Bu nedenle, sürü İHA'ların sabit bir irtifada toplanması, İHA teknolojisi uygulamalarında önemli bir rol oynamaya adaydır.

Bu tez kapsamında yapılan uygulamalarda da ortamda dağınık halde bulunan İHA'lar öncelikle ortam şartlarına göre uygun bir irtifada toplanmıştır. Bu strateji sürü sistemine sonrasında gerçekleştireceği alt görevler için önemli kolaylıklar sağlamıştır. Özellikle, uçuş formasyonunun kontrolünde işlem süresi ve enerji verimliliği açısından ön plana çıkmaktadır. Sürü üyelerinin bu tez kapsamında önerilen topoloji içerisinde paylaştığı bilgi verileri daha önce bahsettiğimiz aralarındaki Öklid mesafesi d 'den oluşturulur. Sürü üyeleri Şekil 3.6'da sunulan geometrik formasyon bağlantılarına göre toplanır veya formasyon bağlantısını tanımlayan belirli noktalarda bir küme halinde

yığılır. Sürünün toplanacağı noktalar graf teorisiyle ilişkili D matrisinde tutulur. Bu matris, köşegenleri '0' olan bir mesafe matrisi (kare matris) olarak oluşturulur ve önerilen formasyon şeklini korumak için sürekli olarak güncellenir. Bu durumda d_{ij} , Denklem 3.6'da verildiği gibi i üyesi ile j komşusu arasındaki anlık paylaşılan formasyon mesafesidir (Carli ve diğerleri, 2020).

Sürü üyelerinin çevre şartlarına daha hızlı tepki vermesi ve sürü kontrolüne daha kısa sürede uyum sağlaması için üyeler sabit bir yükseklikte toplanır ve sonraki her hareket güncellemesinde bu yükseklik korunmaya çalışılır. Bu, sürü sistemi için en hızlı ve en kolay yolu sağlayabilir. İlk olarak sürü sistemine bir sanal lider atanır. Sanal lider kümesinde sürü sistemine eklenecek olan tek bir üye $S_L(t)$ yer almaktadır. Sanal lider ve takipçi üyelerden oluşan sürü kümesi $N(t) = N_f(t) \cup S_L(t)$ şeklinde ifade edilir. Sanal lider hariç her bir İHA'nın komşularına ve lider İHA'ya olan z eksenindeki uzaklıklarının farkının ortalaması z_{io} olarak ifade edilir (Ren ve Beard, 2008) ve Denklem 3.7'de verildiği gibi hesaplanır.

$$z_{io}(t) = \frac{\sum_{j=1}^{|N_i(t)|} [z_i(t) - z_j(t)]}{|N_i(t)|}, \quad i \in N_f(t), j \in N(t) \quad (3.7)$$

Hesaplanan bu ortalama değer i . İHA'nın anlık konum değerinden çıkarılarak bu İHA'nın yeni konumu haline gelir. Bu konum Denklem 3.8'deki gibi tespit edilir.

$$z_i(t+1) = z_i(t) - z_{io}(t), \quad i \in N_f(t) \quad (3.8)$$

Elde edilen bu yeni konum, Denklem 3.9'daki gibi sanal lider İHA'nın gitmesi gereken z eksenindeki hedef konumu $z_i^*(t+1)$ olarak seçildiğinde, tüm sürü üyeleri belli bir yükseklikte toplanacaktır (Carli ve diğerleri, 2020).

$$z_i^*(t+1) = z_i(t+1), \quad i = S_L(t) \quad (3.9)$$

Komşu sürü üyeleri ve sanal lider İHA belirli bir irtifada toplandığında istenilen formasyon uçuşu yapmak kolaylaşır. İrtifa tabanlı formasyon kontrolü birçok sürü sistemi görevi için oldukça elverişlidir (Fathian ve diğerleri, 2018).

Sonuç olarak, sabit bir irtifada toplanma stratejisi, İHA'ların formasyon kontrolünde önemli avantajlar sunar. Enerji verimliliğini artırır, iletişimi stabilize eder, güvenliği ve operasyonel verimliliği artırır.

3.2.2. Formasyon kontrolü

Sürü sistemlerinde uçuş formasyonunun kontrolü, İHA'ların daha önceden belirlenmiş veya görev sırasında göreve özgü tasarlanmış bir geometrik şeklin korumasını hedeflemektedir. Bu kontrolün sağlanması, merkezi bir kontrol ünitesinin varlığında oldukça basittir, burada tüm ekip üyeleri istenen formasyon şeklini ve konumunu önceden bilir ve birbirlerinden habersiz de olsa istenen formasyonu merkeze bağlı bir şekilde oluşturabilir. Öte yandan, merkezi olmayan dağılmış formasyon kontrolü için her aracın istenen formasyon şeklini bilmesi yetmez aynı zamanda formasyonun konumu ve şekli sürü üyeleri arasında müzakere edilmektedir. Dolayısıyla bilgi verileri formasyonun merkezini içerir ve her aracın manevra yapmadan önce formasyon şekline özgü bir merkezi bilgi önererek mevcut formasyon şeklinin oluşturulması için gereken durumu başlatması gereklidir. Sürü üyeleri daha sonra, tüm sürü üyelerince bilinen bir formasyon şeklinde uzlaşmaya varabilmek için konsensüs algoritmasını kullanır (Ren, 2006).

Bu tez çalışması kapsamında belirli bir irtifada toplanan sürü İHA'ların geliştirilen KSLTA algoritması sayesinde formasyon şeklini koruyarak ve gerektiğinde ortam şartlarına uygun bir şekilde formasyon şeklini yeniden tayin ederek istenen hedefe ulaşma görevini gerçekleştirmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, komşu sürü üyelerine ve ortamdaki engellerin konumuna göre adaptif potansiyel itme-çekme fonksiyonlarını içeren bir formasyon kontrolü çerçevesi kullanılmıştır (Carli ve diğerleri, 2020; Lionis ve Kyriakopoulos, 2009; Yamashita ve Suzuki, 2010).

Sürü üyeleri arasında sabit bir yükseklik korunduktan sonra, $x - y$ düzleminde belirli bir geometrik şekle uyarlanmış bir formasyon bağlantısı kolay bir şekilde oluşturulabilir. Sürü üyelerinin toplandıktan sonra ve hareket halindeyken formasyon mesafelerini koruyabilmeleri için öncelikle hedef ve engel kümeleri oluşturulur. Hedef kümesinin her bir elemanı olan T_{ij} , her bir sürü üyesi çiftin arasındaki mesafenin istenen formasyon mesafesine eşit veya yakın olması için Denklem 3.10'daki gibi formüle edilmiştir. Bu hedef koordinatı komşu üyenin konumu x_j 'ye istenen formasyon mesafesi kadar yönlü bir büyüklük eklenerek hesaplanır (Carli ve diğerleri, 2020). D , Şekil 3.6'da

sunulan uygun formasyon şekline göre sürü üyeleri arasındaki mesafelerden (d_{ij}) oluşturulmuş köşegenleri 0 olan bir kare matristir.

$$T_{ij}(t) = \left\{ x_j(t) + D \frac{x_i(t) - x_j(t)}{\|x_i(t) - x_j(t)\|} \right\}, \quad i \in N_f(t), j \in N(t) \text{ ve } i \neq j \quad (3.10)$$

Sürü hareketi sırasında sürü üyelerinin formasyon şekline bağlı bulunmaları gereken bu hedef koordinatları ve bir sonraki konum güncellemelerinin olduğu noktalar Denklem 3.11’de verilen T_i kümesinde toplanarak hedef kümesini oluşturur (Carli ve diğerleri, 2020).

$$T_i(t) = \bigcup_{j \in N - \{i\}} T_{ij}(t) \quad (3.11)$$

Engel kümesinin oluşturulmasındaki temel mantık hem ortamdaki engellere hem de sürü üyesi İHA’ların birbirlerine çarpmasını engelleyecek bir dizi konum bilgisinin oluşturulmasına dayanır. Bu kapsamda, ortamda bulunan engellerin bilinen konumları veya koordinatları, Denklem 3.12’de sunulan engel kümesi O_i ’ye dahil edilir (Carli ve diğerleri, 2020).

$$O_i(t) = \bigcup_{j \in N - \{i\}} O_{ij}(t), \quad i \in N_f(t), j \in N(t) \text{ ve } i \neq j \quad (3.12)$$

Ayrıca, her sürü üyesinin diğer üyelerin konumunu engel olarak kabul etmesiyle üyeler arasındaki çarpışma da önlenmiş olur. Bu durumda, komşulukta bulunan sürü üyelerinin konumları $O_{ij}(t) = x_j(t)$ eşitliği ile bu engel kümesine dahil edilir. Bunun yanı sıra, sürü üyesi İHA’ların kendi aralarındaki güvenli mesafeyi koruyarak hareket edebilmeleri için ek sabitler ve dinamik kurallar belirlenir. Bu şekilde, çarpışma risklerinin minimize edilmesi ve güvenli uçuş rotalarının oluşturulması sağlanır.

Hedef ve engel kümelerinde anlık olarak toplanan verilere göre sürü üyelerinin anlık konumlarına formasyon mesafesini korumak için itme-çekme fonksiyonlarına ait kuvvetler uygulanır. Bu kapsamda, sürü üyeleri arasındaki konsensüs algoritmasının bilgi verisi olarak İHA’lar tarafından paylaşılan d_{ij} mesafesi belirlenen formasyon şekline

göre oluşan eşik değeri ε_r 'ye eşit veya daha büyük olduğunda, bu d_{ij} mesafesi hedef kümesine dahil edilir. Daha sonra bu mesafenin korunması için sürü üyeleri arasında çekme kuvveti uygulanır. Ayrıca, sürü üyelerinin eş yükseltide olması potansiyel çekme kuvvetini oluşturacak fonksiyonun Denklem 3.13'deki gibi basit bir formda yazılmasını sağlar (Carli ve diğerleri, 2020). Bu sayede, İHA'lar arasındaki koordinasyon ve formasyon bütünlüğü daha etkin bir şekilde sağlanır.

$$F_{ij}^T(x_i(t)) = \begin{cases} x_{1i}(t)x_{2i}(t) - x_{1i}(t)T_{2j}(t) + x_{1i}(t) - T_{1j}(t), \\ x_{2i}(t) - T_{2j}(t) \end{cases}, \quad i \in N_f(t), j \in N(t) \text{ ve } i \neq j \quad (3.13)$$

Burada, x_{1i} ve x_{2i} i . İHA'nın sırasıyla $x - y$ eksenindeki anlık koordinatlarıdır. $T_{1j}(t)$ ve $T_{2j}(t)$ ise hedef kümesinde yer alan formasyon şekline ait noktaların $x - y$ koordinatlarıdır. Eğer sürü üyesi i hedef noktası $T_{ij}(t)$ 'ye ulaşmışsa $x_i(t) = T_{ij}(t)$ olur. Bu eşitlik sonucunda çekme kuvveti $F_{ij}^T(x_i(t)) = 0$ olur. Böylece, uçuş formasyon şekli sağlanmış olur ve İHA'lar istenilen formasyonda hareket etmeye devam edebilir.

Yukarıda bahsedilenin aksine, konsensüs algoritmasının bilgi verisi olarak İHA'lar tarafından paylaşılan d_{ij} mesafesi belirlenen formasyon şekline göre oluşan eşik değeri ε_r 'den daha küçük ise bu sürü üyelerinin birbirlerine çok yakın olduğu anlamına gelir ve sürü üyeleri artık engel oluşturacak konumdadır. Bu durumda d_{ij} mesafesi engel kümesine dahil edilir. Daha sonra bu mesafenin artarak ε_r değerine ulaşması için sürü üyeleri arasında itme kuvveti uygulanır. Bu durumda, potansiyel itme kuvvetini oluşturacak fonksiyon Denklem 3.14'deki gibi basit bir formda yazılabilir (Carli ve diğerleri, 2020). Bu sayede, İHA'ların formasyon uçuşu boyunca birbirlerine veya engellere çarpması engellenir.

$$F_{ij}^O(x_i(t)) = \begin{cases} x_{1i}(t)x_{2i}(t) - x_{1i}(t)O_{2j}(t) + x_{1i}(t) - O_{1j}(t) \\ x_{2i}(t) - O_{2j}(t) \end{cases}, \quad i \in N_f(t), j \in N(t) \text{ ve } i \neq j \quad (3.14)$$

Benzer şekilde, burada, x_{1i} ve x_{2i} i . İHA'nın sırasıyla $x - y$ eksenindeki anlık koordinatlarıdır. $O_{1j}(t)$ ve $O_{2j}(t)$ ise engel kümesinde yer alan İHA'ların $x - y$ koordinatlarıdır. Eğer sürü üyesi i engel oluşturacak sınır noktası ulaşmışsa $x_i(t) = O_{ij}(t)$ 'dir. Bu durumda itme kuvveti $F_{ij}^O(x_i(t)) = 0$ olur. Böylece, uçuş formasyon şekli sağlanmış olur ve İHA'lar istenilen formasyonda hareket etmeye devam edebilir.

Böylece, birbirleri için engel oluşturacak sürü üyeleri istenen formasyon şekline göre konumlanır ve çarpışma tehlikesi ortadan kalkar. Ayrıca, bu durum İHA ve ortamda bulunan engeller içinde geçerlidir.

Bu tez kapsamında, potansiyel itme-çekme fonksiyonlarının 0'a yakınsayarak formasyon kontrolünü sağlaması bir minimizasyon problemi olarak görülmüştür ve daha önceki çalışmalarda (Carli ve diğerleri, 2020) önerilen zamana bağlı Adaptif Newton İterasyonu (ANİ) yöntemi kullanılarak sürü üyesi İHA'ların anlık konum güncellemeleri yapılmıştır.

3.2.2.1. Zamana bağlı adaptif newton iterasyonu minimizasyon algoritması

Zamana bağlı ANİ, dinamik sistemlerde veya zamanla değişen problemlerde kullanılan bir iterasyon algoritması türüdür ve bu iterasyon yöntemi, her adımda sistemdeki değişimlere uyum sağlamak için sistem özelliklerini dinamik olarak güncelleyen Newton-Raphson iterasyonunun bir varyasyonudur (X. Wang ve diğerleri, 2023). Özellikle, Newton iterasyonunda hesaplanan Jacobiyeen matrisi veya türevleri, bu iterasyon yönteminde sistem dinamiklerine göre sürekli olarak güncellenir. Bu sayede, sistemdeki değişikliklere hızlı bir şekilde tepki verilir ve yakınsama hızı artırılır.

Zamana bağlı ANİ, genellikle diferansiyel denklemlerin sayısal çözümünde ve optimizasyon problemlerinde yaygın olarak kullanılır. Özellikle, dinamik sistemlerin ve zamanla değişen problemlerin stabilitesini artırmak ve çözüm doğruluğunu optimize etmek için önemli bir araç olarak kabul edilir (Yıldız ve diğerleri, 2024). Bu iterasyon yöntemi, karmaşık sistemlerin modellenmesi ve analizinde önemli bir rol oynar, çünkü sistemlerdeki zamanla değişen koşullara hızla uyum sağlayabilir ve doğru sonuçlar elde edilmesine yardımcı olabilir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda, sürü üyesi İHA'lar arasında uygulanan itme-çekme fonksiyonları F_{ij}^T ve F_{ij}^O 'nin 0'a yakınsaması durumunda kontrol girdisi $u_i(t)$ 'nin etkisi ortadan kalkar ve $x_i(t + 1) = x_i(t)$ eşitliği elde edilir. Buda, sürü sistemi için kararlı bir uçuş formasyonu sağlandığının bir göstergesidir. Dolayısıyla, verilen ayrık zamanlı tekil integratör modelinin kontrol girişi $u_i(t)$ 'nin itme-çekme fonksiyonlarına bağlı olarak minimizasyonunun zamana bağlı ANİ ile gerçekleştirilmesi için, Denklem 3.5, Denklem 3.17'deki gibi yeniden yazılır (Carli ve diğerleri, 2020).

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \lambda \left(\Delta x_{çekme}(t) + \Delta x_{itme}(t) \right), \quad i \in N(t) \quad (3.17)$$

Burada, Δx_{itme} ve $\Delta x_{çekme}$ ifadeleri sırasıyla potansiyel itme ve çekme fonksiyonlarına ait anlık adım vektörleridir. Her bir konum güncellemesinde kullanılan sabit bir adım katsayısı λ olarak verilmiştir (Carli ve diğerleri, 2020). Δx_{itme} , adım vektörü Denklem 3.18’de verilen birbirine yakın sürü üyelerinin oluşturduğu engel kümesi elemanlarına uygulanan itme kuvveti $\bar{R}_{ij}$ ’lerin toplamı ile ifade edilir (Carli ve diğerleri, 2020).

$$\Delta x_{itme}(t) = \sum_{j \in N - \{i\}} \bar{R}_{ij}(t), \quad i \in N_f(t), j \in N(t) \text{ ve } i \neq j \quad (3.18)$$

Yukarıdaki denklemde ifade edilen itme kuvveti istenen eşik mesafesi veya sensör yarıçapı ε_r ’ye bağlıdır. Sürü üyesi İHA’ların komşularına olan uzaklığı d_{ij} istenen formasyon mesafesi ε_r ’den daha kısa ise sürü üyesi İHA’lara itme kuvveti uygulanmalı ve birbirlerinden uzaklaştırılmalıdır. Bu durumda, sürü sistem içerisinde devreye girecek olan itme kuvvetine ait eşitlik Denklem 3.19’daki gibi ifade edilmektedir (Carli ve diğerleri, 2020).

$$\bar{R}_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{R_{ij}(t)}{\left[1 + \left(\frac{\|R_{ij}(t)\|}{C_r} \right)^\mu \cdot \|R_{ij}(t)\|^3 \right]} - \frac{\varepsilon_r}{\left[\left(1 + \left(\frac{\varepsilon_r}{C_r} \right)^\mu \right) \cdot (\varepsilon_r)^3 \right]}, & d_{ij} \leq \varepsilon_r \\ 0, & d_{ij} > \varepsilon_r \end{cases} \quad (3.19)$$

Eğer sürü üyesi İHA’lar arasındaki anlık mesafe d_{ij} istenen formasyon mesafesinden büyük ise sürü sistemindeki itme kuvveti 0 olur. Böylece, çarpışma tehlikesi olmadığı söylenebilir. Denklemde 3.19’da ifade edilen C_r ve μ ise sabit itme katsayılarıdır. Bu katsayılar sürünün bulunduğu ortamın hassasiyetine göre seçilebilir. Ayrıca, $R_{ij}(t)$ potansiyel itme fonksiyonuna bağlı yönlü bir büyüklüktür. Denklem 3.14’de verilen potansiyel itme fonksiyonunun pozitif gradyanı Denklem 3.20’deki itme faktörün $R_{ij}(t)$ ’yi belirler (Carli ve diğerleri, 2020).

$$R_{ij}(t) = +[\nabla F_{ij}^O(x_i(t))]^{-1} \cdot F_{ij}^O(x_i(t)), \quad i \in N_f(t), j \in N(t) \text{ ve } i \neq j \quad (3.20)$$

Kontrol girdisi $u_i(t)$ 'ye etki eden bir diğer ifade ise $\Delta x_{çekme}$ adım vektörüdür. Denklem 3.21'de sunulan bu adım vektörü birbirine uzak sürü üyelerinin oluşturduğu hedef kümesi elemanlarına uygulanan çekme kuvvetinin birim yönde etki eden çekme faktörü $A_{ij}(t)$ değerlerinin toplamından oluşur (Carli ve diğerleri, 2020).

$$\Delta x_{çekme}(t) = \sum_{j \in N - \{i\}} \frac{A_{ij}(t)}{\|A_{ij}(t)\|}, \quad i \in N_f(t), j \in N(t) \text{ ve } i \neq j \quad (3.21)$$

Komşuluk ilişkilerine göre potansiyel çekme fonksiyonuna bağlı yönlü büyüklük olan $A_{ij}(t)$ Denklem 3.22'de verilen potansiyel itme fonksiyonunun negatif gradyanı ile belirlenir (Carli ve diğerleri, 2020).

$$A_{ij}(t) = -[\nabla F_{ij}^T(x_i(t))]^{-1} \cdot F_{ij}^T(x_i(t)), \quad i \in N_f(t), j \in N(t) \text{ ve } i \neq j \quad (3.22)$$

Tekil integratör modelinin kontrol girdisi $u_i(t)$ potansiyel itme-çekme fonksiyonlarının adım vektörleri ile düzenlenebilir. Fakat, her konum güncelleme adımında 0'a yakınsamaya çalışan potansiyel kuvvetler beklenen formasyon şekline göre bir hataya neden olur. İstenilen formasyon şekli ile görev sırasında sürü İHA'ların oluşturduğu formasyon şekli arasında bir hata payı $\varphi_i(t)$ oluşur (Carli ve diğerleri, 2020). Bu hata denklemi Denklem 3.23'de verilen eşitlik ile tespit edilebilir.

$$\varphi_i(t) = \frac{\sum_{j \in N_i(t)} \|d_{ij} - [x_i(t) - x_j(t)]\|}{|N_i(t)|}, \quad i \in N_f(t), j \in N(t) \text{ ve } i \neq j \quad (3.23)$$

Sürü sisteminin uçuş formasyonunu daha hızlı oluşturabilmesi için bu hata verisinden faydalanılarak adaptif bir adım katsayısı λ belirlenebilir. Bu katsayı, hata değerinin yüksek veya düşük olduğu durumlara göre ayarlanabilir. Bu sayede, itme çekme fonksiyonlarının minimizasyonu daha hızlı yapılabilir. Bunu sağlayabilmek için art arda oluşan iki formasyon hatası arasındaki fark $E_{fi}(t)$ Denklem 3.24'de belirtildiği şekilde kullanılabilir (Carli ve diğerleri, 2020).

$$E_{fi}(t) = \varphi_i(t) - \varphi_i(t-1), \quad i \in N_f(t) \quad (3.24)$$

Sürü İHA'lar hareket halinde iken mevcut durumda oluşan formasyon hatası ile önceki formasyon hatası arasındaki fark negatif ise yani hata payında mevcut durum içerisinde iyileşme varsa λ katsayısı daha minimal değerlerde yani 0 ile 0.5 aralığında olmalıdır. Bu durumun tersine, mevcut durumda oluşan formasyon hatası ile önceki formasyon hatası arasındaki fark pozitif ise yani hata payında mevcut durum içerisinde kötüleşme varsa λ katsayısı daha yüksek değerlerde yani 0.5 ile 1 aralığında olmalıdır. Bu önermeyi sağlayacak hataya bağlı adaptif adım boyutu $\lambda_i(t)$ Denklem 3.25'deki gibi ifade edilebilir (Carli ve diğerleri, 2020).

$$\lambda_i(t) = \rho \cdot e^{E_{fi}(t)}, \quad i \in N_f(t) \quad (3.25)$$

Sonuç olarak, sürü İHA'ları için görev uçuşu sırasında, itme ve çekme fonksiyonları kullanılarak formasyon kontrolü sağlanabilir. Ayrıca, zamana bağlı adaptif Newton iterasyonu ile sürü konum güncellemeleri daha hızlı ve daha doğru bir şekilde yapıldığında sürü sisteminin verimliliği artmaktadır.

3.2.3. Sanal lider takip algoritması

Sürü İHA'ların uçuş boyunca uygulayacağı formasyon kontrolü sağlandıktan sonraki aşamada sürünün üyelerinin belirli bir hedefe doğru ilerlerken çevredeki engellere çarpmadan hareket edebilmeleri gerekir. Bunun için daha önce yapılan bir çalışmada gerçek liderin izlendiği bir yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemle liderin potansiyel çekim fonksiyonu koordinat ile çakışacak şekilde ayarlanmıştır (Carli ve diğerleri, 2020). Böylece gerçek bir lidere bağlı olarak yörünge takibi gerçekleştirilir. Fakat, sürü İHA'lar için kullanılan birçok robotik sistem, gerçek zamanlı uygulamalar sırasında iç veya dış müdahalelere maruz kalabilmektedir. Bu müdahaleler kimi zaman sürü üyeleri arasında iletişim kopukluğuna kimi zamanda arızalan sürü üyelerine neden olabilir. Bu durumda daha önce önerilen gerçek lider tabanlı yaklaşımlar (Carli ve diğerleri, 2020; Nedjah ve Junior, 2019; Ren ve Beard, 2008) çökebilir. Özellikle lider İHA'nın arızalandığı veya iletişiminin koptuğu düşünülürse durum oldukça tehlikeli bir hal alabilir. Bu nedenle sürünün bu tür durumlara karşı sağlamlık (Jung ve Ariyur, 2011) ve esneklik (Sampedro ve diğerleri, 2016) gösterebilmesi gerekir. Ancak gerçek lider takibi, bir engelle

karşılaşıldığında formasyonun bozulması ve uçuş dinamiklerindeki kayıpları göz ardı etmektedir (Carli ve diğerleri, 2020; Nedjah ve Junior, 2019; Ren ve Beard, 2008).

Bu tez kapsamındaki amacımız da sağlamlık, esneklik ve ölçeklenebilirlik kavramlarını sürü sistemlerine kazandıracak bir dizi algoritmalar ortaya koymaktır. Bu amaçla KSLTA algoritmasını geliştirdik. Bu algoritma kapsamında sürü İHA'lar için kullanılan sıradan graf yapıları yerine sürü büyüklüğüne göre yeniden tasarlanabilen yeni bir graf topolojisi öneriyoruz. Burada, daha önce belirttiğimiz sanal lider esas alınarak geliştirilen graf yapısı G_{SL} üzerinden sanal lider takibi yapan bir algoritma geliştirilmiştir. Bu sanal graf yapısının bilgi verilerinin saklanması için oluşturulan formasyon şekline bağlı sürü İHA iletişim topolojisi uçuş sırasında Şekil 3.6'da verilen DYG yapısı ile ilişkilidir.

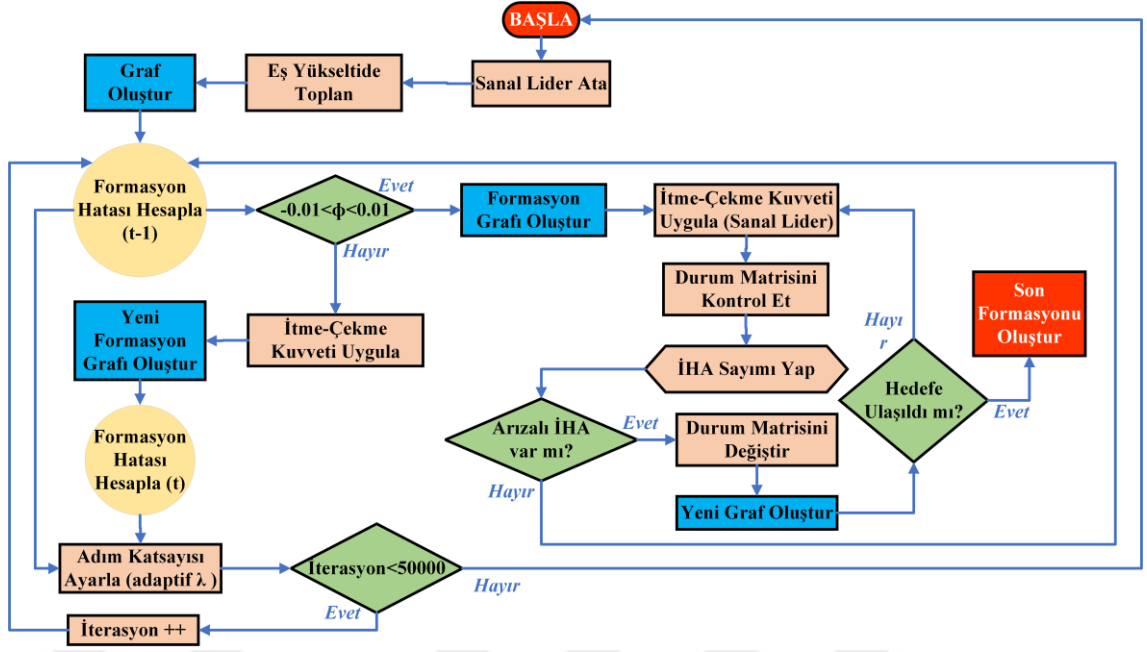
Sanal lider ve tüm sürü üyeleri için potansiyel itme-çekme fonksiyonlarına bağlı formasyon koruma algoritması uygulanır. Her sürü üyesi, konumu güncelledikten sonra formasyon mesafesini yeniden kontrol eder ve formasyon hatası $\varphi_i(t)$ 'yi sürekli olarak hesaplar. Bu algoritma sayesinde sürü sistemi, üyeler arasındaki iletişim kesintisi veya arızalara rağmen iç parametrelerini güncelleyerek amaçlanan görevi başarıyla yerine getirebilir.

Sürü üyelerinin formasyon uçuşu sırasında belirli bir hedefe doğru ilerlerken çevredeki engellere çarpmadan hareket edebilmeleri için hedeflenen noktanın koordinatı hedef kümesine dahil edilir ve sanal lider İHA'nın konumu bu noktaya ulaşıncaya kadar sanal lider İHA'ya Denklem 3.26'da verilen çekme kuvveti uygulanır.

$$F_j^T(S_L(t)) = \begin{Bmatrix} S_{1L}(t)S_{2L}(t) - S_{1L}(t)T_{2j}(t) + S_{1L}(t) - T_{1j}(t), \\ S_{2L}(t) - T_{2j}(t) \end{Bmatrix}, \quad i = S_L(t), j \in N(t) \quad (3.26)$$

Bu çekme kuvvetine göre yenilenen her konum güncellemesinde formasyon hatası hesaplanarak sürü üyesi İHA'ların iletişimi kontrol edilir. Burada, $T_{1j}(t)$ ve $T_{2j}(t)$ noktaları sürü İHA'ların ulaşması gereken nihai hedefin $x - y$ eksenindeki koordinatıdır. $S_L(t)$, ise sanal lider İHA'nın uçuş boyunca takip edilen anlık konumudur.

Bu tez kapsamında 3. Bölümde bahsedilen sürü sistemleri için oluşturulan graf yapılarını, toplanma algoritmasını ve formasyon kontrolünü içeren KSLTA algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Konsensüs-tabanlı Sanal Lider Takibi Algoritması (KSLTA) akış diyagramı

Şekil 3.7’de verilen akış diyagramına göre ortama rasgele dağılmış olan İHA’lara bir sanal lider ataması yapılır. Sonrasında tüm sürü üyelerine Denklem 3.7, 3.8 ve 3.9’u içeren eş yükseltide toplanma algoritması uygulanarak sabit irtifa sağlanır. Sabit irtifada toplanan sürü üyelerinin iletişimini sağlayacak ilk graf yapısı oluşturulur. Oluşturulan graf yapısına göre formasyon hatası hesaplanır ve beklenen aralıkta değilse sürü üyelerine itme-çekme kuvvetleri uygulanarak sürü uçuş formasyonu oluşturulur.

İstenen uçuş formasyonu alındıktan sonra sürü üyelerine sanal liderin konumuna bağlı hedef noktaya doğru çekme kuvveti uygulanır. Bu çekme kuvveti ile hareket eden sürü üyelerinin her konum güncellemesinden sonra engeller ve İHA’ların yakınlık durumuna göre çarpışmayı engellemek için itme kuvveti de uygulanır. Eğer formasyon hatası %2’nin üzerinde ise yani istenen formasyon mesafesinden çok uzakta bir durum değeri varsa veya bu durum değeri 0 ise İHA sayımı yapılır. Durum matrisi (D) içerisinde saklanan İHA bilgi verileri de kontrol edilerek yapılan sayım sonucunda sürü üyelerinin sayısına göre Şekil 3.6’da verilen yeni bir formasyon şekli alınır ve hedefe doğru harekete devam edilir. Sanal lider hedef noktaya ulaştığında son kez formasyon kontrolü yapılır ve nihai formasyon şekli alınarak görev tamamlanır.

3.2.4. GDRRT*-PSO ile sürü İHA'lar için rota planlaması

Sürü İHA'lara ait sistemler görev sırasında hedefe doğru yönelirken bölüm 3.2.2'de bahsettiğimiz konsensüsa dayalı formasyon kontrolü sayesinde anlık (online) olarak konum güncellemeleri yapabilirler. Sürü, hedefe doğru hareket ettiğinde, herhangi bir noktaya doğru ilerler ve bu noktalar kontrol girdilerine bağlı olarak sürekli olarak hesaplanır. Bu yaklaşım basit engel içeren ve nispeten dar olan görev sahalarında etkili olsa da geniş alanlardaki sürü İHA'ları için dezavantajlı bir durum oluşturur, çünkü konum tahmini için gereken işlem yükü zaman ve enerji açısından uygun değildir. Bu sebeple, geniş haritalara sahip alanlarda da etkili çalışan bir sürü sistemi oluşturmak için örnekleme tabanlı bir yol planlama algoritmasına ihtiyaç vardır. Aslan ve arkadaşları tarafından geliştirilen GDRRT* algoritması geniş alanlardaki hızlı yakınsama yeteneği ile dikkat çekmektedir (Aslan ve diğerleri, 2023). GDRRT*, geniş alanlarda hızlı yakınsama sağlayabilir ancak doğrusal olmayan ve gereksiz uzun yolların oluşmasına neden olabilir. Bu durumda GDRRT* ile belirlenen rota üzerinde daha yumuşak ve doğrusal yollar oluşturmak gereklidir. Nitekim, bu probleme çözüm olarak PSO algoritması önerilmiştir (Aslan ve diğerleri, 2023). PSO hali hazırda GDRRT* algoritması tarafından belirlenen rota üzerindeki noktaları (düğümleri) optimize ederek engelsiz en kısa doğrusal rotanın oluşmasını sağlar. Bu tez kapsamında da sürü İHA'ların akıllı yol planlaması için GDRRT*-PSO algoritması kullanılmıştır. Bu sayede sürü hareketi öncesinde belirlenen (offline) engelsiz rota sayesinde daha hızlı ve etkili bir şekilde geniş haritalarda sürü İHA görevleri gerçekleştirilebilir.

3.2.4.1. GDRRT* rota planlama algoritması

Son zamanlarda örnekleme tabanlı yöntemler, daha az hesaplama karmaşıklığına sahip olması, daha az düğüm içermesi ve büyük haritalarda daha optimal çözümler sunması nedeniyle İHA içeren ve 3 boyutlu yol planlaması gerektiren uygulamalar için daha kullanışlı hale gelmiştir. İHA uygulamalarına en iyi şekilde uyarlanacak örnekleme tabanlı yol planlama yöntemlerinden biri Random-Exploring Tree Star (RRT*) (Karaman ve Frazzoli, 2011). Ancak geniş alanlarda bellek tüketiminin artması ve hedefe yakınsama yavaşlaması gibi sorunların aşılması için GDRRT* gibi bir dizi yeni alternatif örnekleme tabanlı yöntemler öne sürülmüştür (Fan ve diğerleri, 2023).

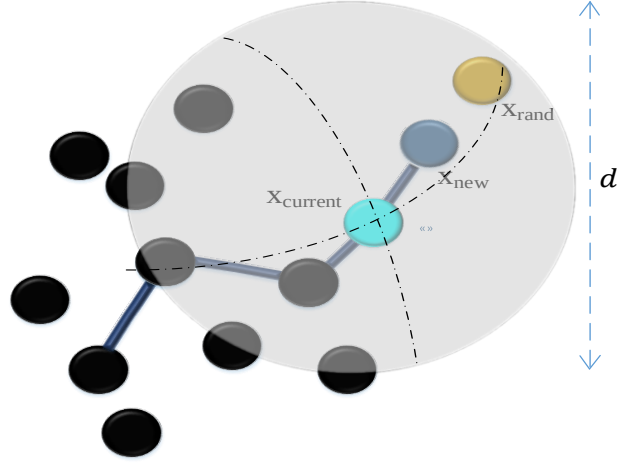
RRT*'nin sınırlama olmadan gerçekleştirilen rastgele örnekleme süreci hedefe yavaş yakınsamasındaki en büyük etkidir. Bu durumda, örnek sayısı sonsuza giderken, optimal yolu bulmayı garanti etse de yüksek boyutlu ortamlarda RRT*'ın yakınsama hızının önemli ölçüde azalması yavaş yakınsama problemini doğurur. Bu nedenle, yavaş yakınsama problemine çözüm sağlamak için daha farklı örnekleme stratejileri öne sürülebilir. Nitekim, RRT*'a alternatif algoritmalar geliştirilmiş olsa da birçok algoritma, yolu kısaltırken yol planlama süresini artırır veya süreyi kısaltma pahasına yalnızca küçük veya engelsiz ortamlarda çalışır. GDRRT* ise bu eksiklikleri gidermek için geliştirilen birçok yöntemden biridir ve 3 boyutlu ortamlarla uyumlu olması, hedefe hızlı yakınsaması ve düşük hesaplama maliyeti GDRRT*'yi öne çıkaran özellikleridir (Aslan ve diğerleri, 2023).

GDRRT*, RRT* algoritmasında olduğu gibi tamamen rasgele örnekler almak yerine belirli bir bölgede sınırlı örnekleri rasgele alma eğilimindedir. Buradaki sınırlandırma sayesinde yeni atanan örneğin kontrollü bir şekilde hedefe yakınsaması amaçlanmaktadır. GDRRT* ile yol planlaması yapılmadan önce belirlenen d mesafesine göre kontrollü örnek ataması yapılır. Bu d değerine bağlı olarak geliştirilen örnek atama denklemi Denklem 3.27'de ifade edilmiştir (Aslan ve diğerleri, 2023).

$$x_{rand} = \left(x_{current} - \frac{d}{2}\right) + rand(0,1) \times \left(\left(x_{current} + \frac{d}{2}\right) - \left(x_{current} - \frac{d}{2}\right)\right) \quad (3.27)$$

Bu denklemle, yeni örnek tüm uzay bölgesine RRT*'da olduğu gibi rastgele atanmaz. Yeni rastgele örnek x_{rand} , mevcut düğüm $x_{current}$ 'ün merkezine çizilen $d/2$ yarıçaplı bir uzayda rastgele bir değer ile alınabilir. Yani örnekleme aralığı bu $d/2$ yarıçaplı bir uzayla sınırlıdır. Şekil 3.8'de GDRRT* algoritmasına ait örnekleme alınabilir bir bölgenin temsili sunulmuştur.

Ayrıca, gereksiz örneklemeyi önlemek için hedef noktaya en yakın düğümler sürekli olarak kaydedilir. Rastgele örnekleme hesaplaması hedefe en yakın düğümü ifade eder. Hedeften uzaklaşan yeni düğümler dikkate alınmaz. Bu sayede yeni atanan her düğüm hedefe yakınsama sağlar.



Şekil 3.8. GDRRT* algoritmasına bağlı rasgele örneklem ataması (Aslan ve diğerleri, 2023)

Yeni atanan örnek ile hedef arasında bir engelin olduğu durumlarda GDRRT* algoritması RRT* gibi davranır (Aslan ve diğerleri, 2023). GDRRT*'nin çıktısı olan yol, başlangıç düğümü ile hedef düğüm arasında RRT*'ye kıyasla daha hızlı bir şekilde yakınsar. Ancak, bu yolun RRT* ile oluşturulan yoldan daha uzun olabileceği unutulmamalıdır. Çünkü GDRRT*'deki örnekleme işlemi de rastgele gerçekleşir. Bu durumda, GDRRT* her zaman daha kısa bir yol garanti etmez. Bununla birlikte, GDRRT*, hedefe daha yakın noktalarda örnekleme yaparak RRT*'den çok daha hızlı bir şekilde ilerler. Bu yaklaşım aynı zamanda daha az düğüm kullanılmasını sağlar. GDRRT*, RRT*'ye kıyasla daha az kaynak kullanarak hedefe daha hızlı yaklaşır bu sayede pek çok farklı 3 boyutlu ortamda yapılan testlerde GDRRT*'ın ortalama yol planlama süresinin RRT*'a göre yaklaşık 3 kat daha hızlı olduğu belirtilmiştir (Aslan ve diğerleri, 2023).

Bu tez kapsamında, sürü İHA sistemlerinin akıllı bir rota planlama algoritmasıyla donatılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, GDRRT* algoritmasının daha hızlı yol planlama avantajı, konsensüs tabanlı sanal lider takibi algoritmasıyla bütünleştirilmiştir. Böylece, sürü hareketi öncesinde belirlenen (offline) engelsiz rota, geniş haritalarda sürü İHA görevlerinin daha hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu entegrasyon, sürü İHA sistemlerinin verimliliğini ve performansını artırmayı amaçlamaktadır. Bu yeni rota planlama yaklaşımı, özellikle geniş alanlarda ve karmaşık ortamlarda sürü İHA görevlerinin etkin bir şekilde yönetilmesine olanak sağlayabilir.

3.2.4.2. GDRRT*-PSO ile rota optimizasyonu

Sürü halindeki İHA sistemlerinin havada hareketi söz konusu olduğunda, uçuş süreleri oldukça kritik bir rol oynar. Özellikle batarya kısıtlamaları, verimlilik açısından uçuş sürelerini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, uçuş rotasının mümkün olan en kısa sürede belirlenmesi son derece önemlidir. GDRRT* algoritması, büyük haritalarda yol planlama süresini önemli ölçüde azaltabilir. Ancak, rasgele örnekleme yapması ve sınırlı alanda örnekleme yapması, sürü sistemi için en kısa ve en uygun rotanın belirlendiğini garanti etmez. Bu nedenle, rotadaki doğrusalılığı artırmak ve dönüşleri yumuşatmak için bir düzenleme gereklidir. Bu ihtiyacı göz önünde bulunduran bir çalışmada (Aslan ve diğerleri, 2023), GDRRT* ile oluşturulan rotadaki düğüm çiftleri arasındaki mesafeyi en kısa hale getirerek ve dönüşleri yumuşatarak rota optimizasyonu için PSO algoritmasını önerilmiştir.

GDRRT* tarafından üretilen yoldaki mevcut düğümlerin dağılımı, engelsiz uzayda minimum yol sağlayacak şekilde PSO ile optimize edilir. Ancak bunun öncesinde, PSO tarafından üretilen yolun daha doğrusal olmasını sağlamak ve çözüm hızını artırmak için mevcut yoldaki düğüm sayısı azaltılabilir. Eğer azaltılma sonucunda rota üzerinde bulunan engeller ile çakışma durumu söz konusu ise düğüm sayısı sabit kalabilir.

PSO, doğada sürü halinde yaşayan hayvanların davranışlarını taklit eden, örneğin yiyecek arama gibi, bir optimize etme tekniğidir (Kennedy ve Eberhart, 2011). PSO, doğası gereği paralel ve dağınık bir yapıya sahiptir, bu nedenle görevlere özgü büyük ve karmaşık optimizasyon problemlerinde kullanılabilir (Yusup ve diğerleri, 2012). Ayrıca, az sayıda parametreye sahip olduğu için kolayca uygulanabilir ve genellikle diğer optimize etme tekniklerinden daha hızlı sonuçlar üretebilir. PSO algoritmasında sürüdeki her bir parçacık, parçacıkların bir çözüm uzayında rastgele dağıtıldığı ve bu parçacıkların problemin optimize edilmesi için deneyimini sürü ile paylaştığı sürü tarafından gerçekleştirilecek ortak göreve özgü uygunluk fonksiyonu arayarak hareket ettiği bir yöntemdir.

PSO'nun temel fikri, sürü parçacıklarının sayısının fazla olmasındaki avantajı yani uzayda sürü halinde arama yapabilme yeteneğini kullanarak farklı problemler için optimal çözümler üretebilmektir. Burada, en iyi çözüme ulaşmak için uzaya rastgele dağıtılan sürü parçacıkları arasındaki bilgi paylaşımı önemli rol oynar. Sürüdeki her parçacık problem uzayında bir çözümü temsil eder ve bu çözümlerin performansları bir uygunluk fonksiyonu aracılığıyla değerlendirilir (Kennedy ve Eberhart, 2011). Her

parçacık, kendi bulunduğu yerel en iyi kişisel konum ve hız çözümünü ve sürü içindeki tüm parçacıkların bulunduğu en iyi global çözümü takip eder. Algoritmanın her iterasyonunda, parçacıklar kendi hızlarını ve bulundukları konumu birbirleri ile paylaştıkları konum ve hız verilerine göre günceller. Bu güncelleme süreci, her bir parçacığın hızını ve konumunu etkileyen üç faktörle gerçekleştirilir. Bunlar, her bir parçacığın kendi en iyi yerel konumu (p_{best}), sürü içindeki en iyi global konumu (g_{best}) ve parçacıklara rasgele atanan bir vektördür ($rand()$). Bu üç faktöre bağlı her bir parçacığa ait yeni pozisyon ve hız değerleri Denklem 3.28 ve 3.29’da gösterildiği gibi hesaplanır (Kennedy ve Eberhart, 2011).

$$V_{i+1} = wV_i + c_1 \times rand_1(p_{best} - V_i) + c_2 \times rand_2(g_{best} - V_i) \quad (3.28)$$

$$P_{i+1} = P_i + V_{i+1} \quad (3.29)$$

Bu denklemlerde, i parçacık indeksi, w atalet ağırlık değeri, c_1 ve c_2 ivme katsayıları, V parçacık hızı, P parçacık konumu, $rand_1$ ve $rand_2$ 0 – 1 arasında rastgele değer üreten fonksiyonlardır (Sabancı ve Balci, 2020). Bu denklemler sayesinde PSO, doğası gereği sürü halindeki davranışın kolaylıkla taklit edilebildiği bir algoritma olup, birçok optimize edilmesi gereken parametre içermektedir (Yusup ve diğerleri, 2012).

Bu tez çalışması kapsamında, sürü İHA’lar için yol planlama problemi üzerine bir algoritma tasarlanmıştır. Dolayısıyla, optimizasyonu yapılacak olan amaç fonksiyonu Aslan ve ark. kullandığına benzer başlangıç ve hedef noktaları arasındaki yolun uzunluğu içeren uzaydaki ardışık düğümler arasındaki Öklid mesafesinin minimum değerini hesaplayacak şekilde Denklem 3.30’daki gibi formüle edilmiştir (Aslan ve diğerleri, 2023).

$$Path\ Length = \sum_{i=1}^{n-1} |pos_node_{i+1} - pos_node_i| \quad (3.30)$$

Burada, başlangıç ve hedef düğümleri hariç geriye kalan rota üzerindeki düğümler doğrusal olarak en kısa rotanın oluşturulabilmesi için engellerin dışındaki ortamda hareket ettirilir. Ortamdaki engel varlığı amaç fonksiyonun kısıtlamasıdır ve düğümler ile düğümler arasındaki kenarlar engellerin bulunduğu koordinat değerleri ile kesişmemelidir. Denklem 3.30’da ifade edilen pos_node ’lar uzaydaki n adet düğümün

her birinin koordinat deęerlerini ifade eder. Bu dūęümler arasındaki Öklid mesafelerinin toplamı sürü uçuşu için optimum olan rota *Path Length*'i hesaplar.

Özetle, bu tezin materyal ve yöntem kısmında önerilen KSLTA ve GDRRT*-PSO sayesinde ortamda rasgele dağılan İHA sürüsü sabit bir irtifada toplanmıştır. Ardından hedef noktaya ulaşmak için hareket etmektedir. Hareketi boyunca sürü üyeleri arasında formasyon kontrolü sağlanır. KSLTA ile uygulanan itme ve çekme kuvvetleri ile sürü hedef noktaya ilerlerken kendi aralarında ve engeller ile çarpışmadan kaçınır. GDRRT*-PSO algoritması ile önerilen yol-planlaması ile en kısa ve güvenli rota takip edilerek hedef noktaya ulaşılır. Tezin bir sonraki bölümünde önerilen algoritmalara ait simülasyon uygulamaları ve performansları ayrıntılı bir şekilde incelenecektir.



4. SİMÜLASYON UYGULAMALARI ve PERFORMASLARI

Sürü İHA sistemlerine yönelik çalışmalar özellikle bu araçların manevra kabiliyeti ve zorlu şartlara uygunluğu sebebiyle oldukça popülerdir. Fakat, bu avantajların yanında birde sistemi zorlayan problemler ortaya çıkmaktadır. Bunlardan başlıcaları, hedef tespiti sırasında koordineli ve kollektif uçuşlar, bölgesel veya noktasal bazda sürü toplanması/akını, uçuş formasyon kontrolü, iş birlikçi nihai karar verme mekanizması ve görev sırasında konsensüsü sağlamadır. Ayrıca bu problemlerin yanı sıra sürü sistemi içinde oluşan harici problemlere karşıda sistemin dayanıklı, esnek ve ölçeklenebilir olması gereklidir.

Etkili ve verimli sürü sistemlerin oluşturulmasında ortaya konulması gereken üç önemli kriter bulunmaktadır. Bunlar, Sağlamlık, Esneklik ve Ölçeklenebilirlik kavramlarıdır. Sağlamlık, sürü üyelerinin uçuş sırasında herhangi bir nedenle üyeler arasındaki iletişimde başarısız olması veya iletişimi kaybetmesi durumunda, geri kalan sürü üyelerinin görev tanımının gerektirdiği minimum başarıyı gerçekleştirebildiği bir sürü topolojisi kriteridir. Esneklik, herhangi bir nedenle bozulan sürü uçuş formasyonuna tepki olarak sürü üyelerinin iç parametrelerini güncelleyerek göreve özgü yeni uçuş formasyonlarını oluşturabilecekleri bir sürü topolojisi kriteridir. Ölçeklenebilirlik ise sürü görev tanımı içinde bulunan alt görevlerin biri veya birkaçını gerçekleştirebilmesi için kendi sisteminin farklı sayıda üyesi ile iş birliği içinde çalışabildiği bir sürü topolojisi kriteridir.

Bu tez kapsamında yapılan uygulama veya simülasyonlarda İHA sürü sistemi için akıllı bir yol planlama strateji oluşturulurken bu üç kavram dikkate alınmıştır. İlk uygulamada dayanıklı, esnek ve ölçeklenebilir bir yapıya sahip sürü sistemi için Konsensüsa-tabanlı Sanal Lider Takip Algoritması (KSLTA) geliştirilerek eş zamanlı (online) formasyon kontrolü ve rota planlaması yapabilen bir sistem ortaya konmuştur. İkinci uygulamada, daha geniş haritalarda işlem süresini kısaltacak verimli ve etkin bir sürü topolojisi oluşturmak için önceden GDRRT*-PSO algoritması ile oluşturulmuş (offline) rota planlaması ile önerilen KSLTA algoritması birleştirilerek birçok İHA sürüsü alanında kullanılabilecek hibrit akıllı bir yol kontrol sistemi oluşturulmuştur. Yapılan uygulamalar kapsamında sürü sisteminin uygulanabilirliği ve gözlemini kolaylaştırmak için aşağıda belirtilen ön koşullar kabul edilmektedir.

- (1) MATLAB simülasyon ortamında örneklenen İHA'lar noktasal veriler olarak ele alınmıştır. Bu İHA'ların etki alanı sensör yarıçapı ε_r ile belirlenmiştir ve bu uzunluk aynı zamanda güvenli mesafe olarak da kabul edilir.
- (2) Simülasyonlar sırasında İHA'nın, engelin ve hedef noktasının konumlarının önceden bilindiği varsayılmaktadır. Günümüzde, İHA'larda sıklıkla bulunan GPS ve IMU sensörleri, sürü üyesi İHA'ların konumlarının belirlenmesinde kullanılabilir. Ayrıca, İHA'lar kızılötesi, ultrasonik, radar veya LİDAR sensörleri ile mevcut konumlarına bağlı olarak engellerin yerini de tespit edebilmektedir.
- (3) Önerdiğimiz DYG yapısı sayesinde her bir İHA'nın ağıdaki diğer tüm İHA'lar ile çift yönlü olarak iletişim sağladığı varsayılmaktadır.

4.1. Sürü İHA Formasyon Kontrolü için Konsensüs-tabanlı Sanal Lider Takip Uygulaması

Sürü halindeki İHA'ların uçuş sırasında iş birliği içinde hareketinin sağlanması için formasyon kontrolü önemli bir etkidir. Bu amaçla, İHA sürülerini kontrol etmek için konsensüsa dayalı algoritmaların önerildiği bir çalışmadan (Carli ve diğerleri, 2020), esinlenerek sürü sistemlerinden beklenen sağlamlık, esneklik ve ölçeklenebilirlik kavramlarını ortaya koyacak Konsensüs-tabanlı Sanal Lider Takip Algoritması (KSLTA) geliştirilmiştir. Daha önce önerilen algoritmalarda engellerin olduğu ve engellerin olmadığı bir ortamda lideri takip ederek belirli bir hedefi tespit etmek veya o hedefe saldırı gerçekleştirmek mümkündür (Carli ve diğerleri, 2020; Garcia-Aunon ve Barrientos Cruz, 2018; Z. Li ve diğerleri, 2015).

Lider takibi ile yapılan uygulamalarda (Carli ve diğerleri, 2020) ilk etapta çevreye rastgele dağıtılan 3 İHA'nın konum verileri kullanılarak aynı irtifa toplama algoritması uygulanmıştır. Daha sonra eş merkezli yüksekliğe gelen sürü üyeleri arasında üçgen formasyonu oluşturulmuştur. Formasyon bağlantısı kurulduktan sonra önceden belirlenen lider İHA takip edilerek hedefe ulaşılır ve üçgen formasyonu yeniden oluşturulur. Önceki çalışmalarda (Garcia-Aunon ve Barrientos Cruz, 2018; Wu ve diğerleri, 2020) uygulanan algoritmalar, küçük ve dağınık çevresel engellere karşı etkili sonuçlar vermiştir. Ancak ortamı kaplayan büyük engeller söz konusu olduğunda sürünün hedefe nasıl ulaşacağını belirlemesi zorlaşır. Bu nedenle daha önce yapılan çalışmalarda (Carli ve diğerleri, 2020; Garcia-Aunon ve Barrientos Cruz, 2018; Z. Li ve diğerleri, 2015) kullanılan algoritmalar

bu tez kapsamında geliştirilmiş ve büyük engellere karşı davranışları test edilmiştir. Ayrıca genişletilmiş algoritma, engellerin varlığında formasyon şeklini sabit tutarak formasyon koruma ve alan taraması gerçekleştirmiştir. Ayrıca, sanal lider izleme algoritması kullanılarak simülasyonlar yapılmış ve bir öncekiyle (Carli ve diğerleri, 2020) karşılaştırılmıştır. Son olarak önerilen sanal lider tabanlı algoritmanın sürü sistemine getirdiği sağlamlık ve esneklik çözümleri gösterilmektedir. MATLAB programı ile yapılan simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

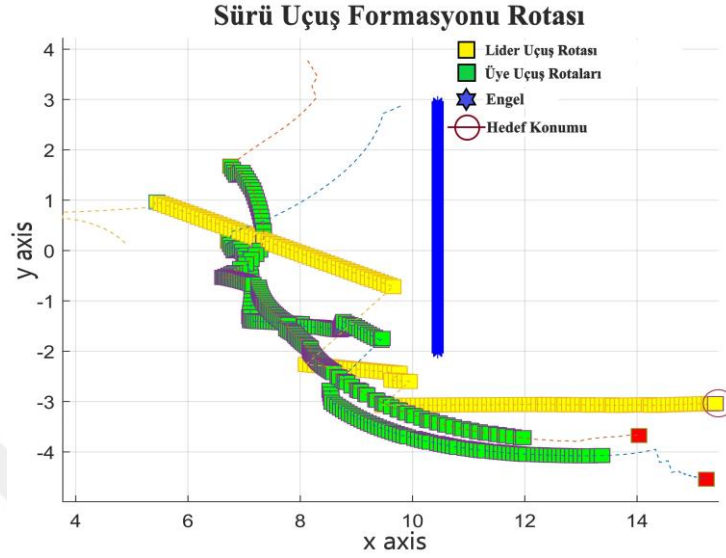
Çizelge 4.1. Konsensüs-tabanlı sanal lider takibi algoritmasının simülasyon parametreleri

Parametre	Değeri
Kontrol girdisi adım katsayısı (λ)	0.1
İtme kuvveti katsayısı (C_r)	0.1
İtme kuvveti katsayısı (μ)	1
İHA sensor yarıçapı (ϵ_r)	1.5

4.1.1. Lider takibi ile formasyon kontrolü uygulaması

Lider takip yönteminde iletişim topolojisinin tamamı lider İHA’ya bağlanır. Bu, dar alan ve hedefe yönelik uygulamalar için etkilidir. Ancak sürü İHA’ları ile yapılan bazı uygulamalarda, hedef noktaya ulaşmanın yanı sıra uçuş formunu koruyarak alanın taranması da hayati önem taşımaktadır. Uçuş sırasında sürü üyeleri arasında ortak veriler kullanılarak formasyon kontrolünün sağlanması, daha fazla alanda hareket ve kontrol kabiliyeti sağlar. Bu uygulama kapsamında gerçekleştirilen trigonal formasyon kontrolünün simülasyonları Şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4’de verilmiştir. Burada lider takip uygulamasında olduğu gibi rastgele dağılan İHA’lar arasında eş yükseltide toplanma ve trigonal formasyon oluşturulmuştur. Şekillerdeki siyah kare noktalar başlangıçta sürü üyelerinin rastgele dağıldığı konumlardır. Sarı kare nokta ise Lider İHA’nın konumudur. Öncelikle, farklı irtifalardaki İHA’lar eş yükseltide toplanma algoritması ile Şekil 4.1’deki gibi aynı irtifaya konumlandırılır. Sonrasında formasyon oluşturma algoritması ile ortamdaki İHA sayısına göre Şekil 4.2’deki gibi uçuş formasyonu oluşturulur. Buradaki yeşil daireler üyeleri, sarı daire lider İHA’yı, kesikli çizgiler ise hareket boyunca sürü üyesi İHA’ların takip ettiği yörüngeleri temsil etmektedir. Sürünün, Şekil 4.3’de görüldüğü gibi üç boyutlu ortamda hedef noktaya ulaşabilmesi için konuma dayalı bir sürü topoloji önerilmiştir.

Daha sonra Şekil 4.4’de verilen sürü hareketi sırasında formasyon şekli korunarak hedef noktaya ulaşılmıştır.



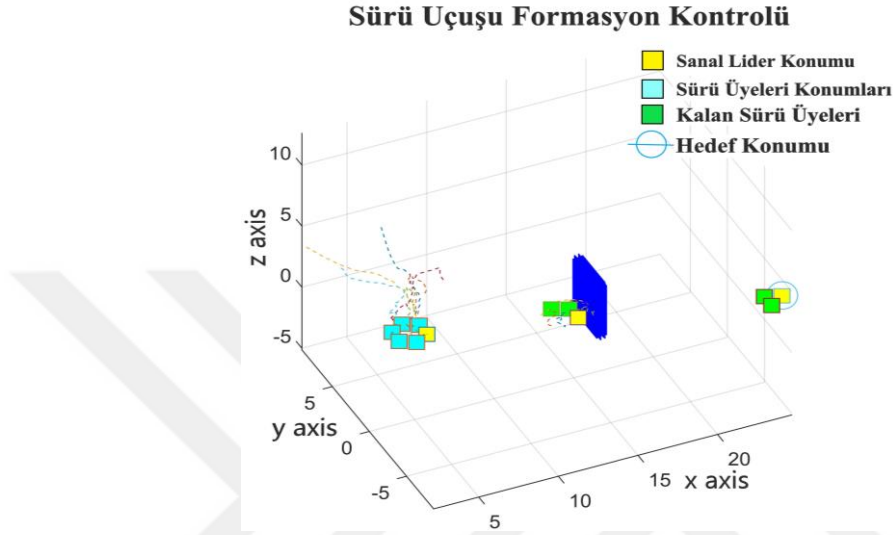
Şekil 4.4. Sürü lider takibi ile hedef tespiti ve formasyon kontrolü

Sürü üyeleri, hedef noktaya doğru olan hareketleri boyunca konum verilerini DYG yapısından yola çıkılarak oluşturulan D durum matrisi içinde paylaşırlar. Ayrıca, diğer uygulamalarda (Carli ve diğerleri, 2020) önerilen lider takibinde olduğu gibi liderin öncü olmasına gerek olmadığı için dış etkilere karşı daha dayanıklı bir sürü topolojisidir. Dolayısıyla bu formasyon kontrol algoritması ile alan tarama veya hedef takibi gibi sürü uygulamaları yapılabilir. Ancak gerçek zamanlı uygulamalarda sıklıkla görülebilen sürü üyelerindeki arızalar ve kayıplar göz ardı edilmiştir. Özellikle lider İHA’da oluşabilecek en ufak bir arıza veya iletişim kopukluğu tüm sistemi zor durumda bırakabilmektedir. Bu nedenle bu sorunların önüne geçebilmek için bu tez çalışmasında KSLTA algoritması geliştirilmiştir.

4.1.2. Konsensüs-tabanlı sanal lider takibi ile formasyon kontrolü uygulaması

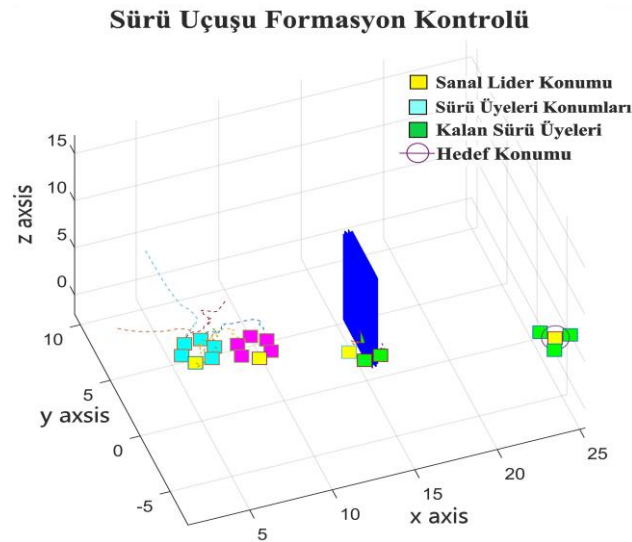
Sürü görevi yapan İHA’lar, teknik veya dış nedenlerden dolayı arızalar meydana gelse dahi istenilen görevi yerine getirebilecek kapasitede olmalıdır. Ayrıca sürü üyeleri dinamik çevresel değişikliklere karşı iç parametrelerini güncelleyebilmelidir. Bu sorunların çözümü için KSLTA algoritmasını öneriyoruz. Önerilen algoritma, sürü üyelerinin başarısızlıklarına rağmen uçuş oluşumunu koruyarak ve sürü görevinin

tamamlanmasını sağlayarak iç parametreleri dış etkenlere karşı düzenleyebilmiştir. Sanal lider takip algoritmasına dayalı simülasyon görüntüleri Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7’de sunulmuştur. Şekil 4.5’deki ilk uygulamada, üç sürü üyesi İHA ile iletişimin koptuğu senaryoya göre sürü, sistemde meydana gelen dinamik değişime karşı iç parametrelerini güncelleyerek yeni bir trigonal uçuş formasyonu oluşturmuştur.



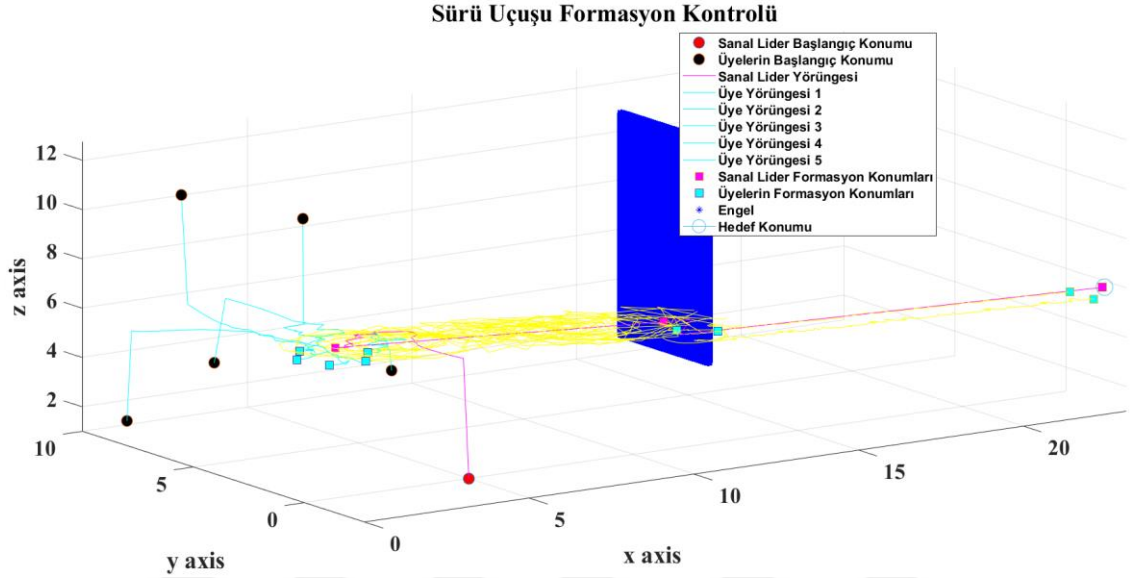
Şekil 4.5. Üç boyutlu ortamda konsensüs-tabanlı sanal lider takibi ile formasyon kontrolü (3 İHA kayıp)

İkinci uygulamada ise, iki İHA’nın iletişiminin koptuğu veya düştüğü görülmektedir. Bu durumda, sürü Şekil 4.6’daki gibi sanal lider merkezli tetragonal uçuş formasyonuna geçiş yapmıştır.



Şekil 4.6. Üç boyutlu ortamda konsensüs-tabanlı sanal lider takibi ile formasyon kontrolü (3 İHA kayıp)

Ek olarak, Şekil 4.7’de tüm adımları içeren bir simülasyon resmi verilmektedir. Her iki simülasyonda da sanal lideri temel alan algoritma sayesinde kalan sürü üyeleri sanal lideri takip ederek yeni bir formasyon oluşturmuştur. Yeni sürü formasyonu ile sürü bağlantısı kopmadan ve engele çarpmadan hedef noktaya ulaşılmıştır. Böylece daha sağlam, esnek ve ölçeklenebilir bir sürü topolojisi ortaya konmuştur.



Şekil 4.7. Üç boyutlu ortamda konsensüs-tabanlı sanal lider takibi ile formasyon kontrolü (3 İHA kayıp)

4.1.3. Konsensüs-tabanlı sanal lider takibi algoritması performans değerlendirmesi

Simülasyon sonuçlarına göre bu tez kapsamında önerilen 5 sürü üyesi ve 1 sanal lider ile yapılan sanal lider takibi algoritması ve önceki çalışmalarda (Carli ve diğerleri, 2020) önerilen 3 sürü üyesi ile gerçek lider takibi yapan algoritmaların hedef noktaya ulaşma süresi, iterasyon sayısı, rota uzunluğu ve sürü büyüklüğüne göre performansları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Öncelikle rastgele dağılan İHA’ların toplanma oluşumu sırasındaki performans değerleri incelendiğinde, sürü büyüklüğünün uçuş süresi ve iterasyon sayısı ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Ortama rastgele dağılmış sürü üyeleri Denklem 3.7, 3.8 ve 3.9’da verilen eş yükseltide toplanma formülleri sayesinde hızlı bir şekilde aynı irtifada toplanır. Gerçek lider takibinde eş yükseltide toplanma sırasında sürü, az üyeden oluştuğundan az bir farkla da olsa daha hızlı toplanmıştır. Daha sonra uygulanan itme-çekme fonksiyonlarıyla sürüler sürü büyüklüklerine göre uçuş formasyonu şeklini alır.

Lider takibi uygulamasında trigonal formasyon şekli oluşturulurken sanal lider uygulamasında sanal lider dahil 6 sürü üyesi için hegzagonal formasyon şekli oluşturulur.

Çizelge 4.2. Konsensüs-tabanlı sanal lider takibi algoritmasının simülasyon performansları

Formasyon	Parametreler	Lider Takibi (3 İHA)	Sanal Lider Takibi (3 kayıp İHA)	Sanal Lider Takibi (2 kayıp İHA)
Toplanma ve Formasyon Oluşturma	Süre (s)	43	56	58
	İterasyon Sayısı	83	102	105
	Rota Uzunluğu 1	1.50	1.30	4.10
	Rota Uzunluğu 2	4.80	7.90	5.20
	Rota Uzunluğu 3	4.10	8.50	10.5
	Rota Uzunluğu 4	None	8.00	10.1
	Rota Uzunluğu 5	None	5.40	6.20
	Rota Uzunluğu 6	None	6.00	6.10
Uçuş Formasyonu	Süre (dk)	11	17	19
	İterasyon Sayısı	1230	1866	2055
	Rota Uzunluğu 1	15.3	20.6	21.2
	Rota Uzunluğu 2	10.5	19.8	20.8
	Rota Uzunluğu 3	13.2	21.0	18.7
	Rota Uzunluğu 4	None	8.70	10.2
	Rota Uzunluğu 5	None	8.20	21.1
	Rota Uzunluğu 6	None	8.50	9.70

Uçuş formasyonlarının hedef noktaya ulaşana kadar kaydedilen süreleri de benzer şekilde sürü büyüklüğüyle orantılıdır. Üstelik sanal lider tabanlı uygulamalarda bunun engellerle veya birbirleriyle çarpışan veya iletişimi kaybeden üye sayısı ile ters orantılı olduğu söylenebilir. Lider takip uygulamasında daha basit bir yörünge oluşturularak hedefe daha kısa sürede ulaşıldığı söylenebilir. Ancak sürü sistemindeki arızalara veya iletişim kesintilerine karşı savunmasızdır. Herhangi bir sürü üyesi arızalandığında veya iletişimi koptuğunda sürü sistemi çökebilir. Özellikle gerçek lider İHA'da yaşanacak en ufak bir arıza veya iletişim aksaklığı tüm sistemi etkiler. Geriye kalan üyelerin yeniden formasyon oluşturabilmesi için tek şart, lider İHA'nın herhangi bir sorun yaşamamasıdır. Bu nedenle önerdiğimiz KSLTA algoritması sayesinde, daha verimli, sağlam, esnek ve ölçeklenebilir bir sürü sistemi için uçuş formasyonu oluşturma süresi, belirli bir tolerans aralığında gerçekleştirilebilir. Bu algoritma, formasyon sürecini optimize ederek sistemin performansını artırır ve farklı uçuş senaryolarına uyum sağlayabilir. Ayrıca, KSLTA algoritmasının sağladığı sağlam, esnek ve ölçeklenebilir sürü topolojisi formasyon sürecinin güvenilirliğini artırır. Bu özellikler sürü İHA'lar ile yapılan dinamik uçuş görevlerinde önemli avantajlar sunacaktır.

4.2. Konsensüs-tabanlı GDRRT*-PSO Sanal Lider Takip Algoritması ile Sürü İHA Akıllı Yol Planlama Uygulaması

Bölüm 4.1’de önerdiğimiz KSLTA algoritması da dahil olmak üzere, lider takipli çalışmalarda engelli ve engelsiz ortamlarda lider takibi yapılarak belirli bir hedefin tespit edilmesi veya bir hedefe saldırı düzenlenmesi gibi spesifik görevlerin gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır (Carli ve diğerleri, 2020; Yang ve diğerleri, 2018; Yıldız ve diğerleri, 2024). Bu uygulamalarda genellikle sürü sabit bir yükseklikte toplanır ve gerçek lideri veya sanal lideri takip ederek uçuş formasyonunu oluşturur. Daha sonra lider İHA takip edilerek önceden belirlenen hedef noktaya ulaşılır. Bu tür çalışmalar, küçük ve dağınık engellere karşı başarılı sonuçlar verebilmektedir; ancak haritanın boyutu büyüdükçe ve engel sayısı arttıkça hedef noktaya ulaşmak daha zor hale gelir.

Ayrıca, enerji, maliyet ve uçuş süresi konularında da verimsizlikler ortaya çıkabilir. Bu nedenle, daha önce yapılan çalışmalarda (Carli ve diğerleri, 2020; Yang ve diğerleri, 2018; Yıldız ve diğerleri, 2024) yol planlaması yapılmadan küçük ölçekli haritalar üzerinde basit engellerden kaçan sürü uçuşları, geniş alanlar için enerji ve maliyet açısından verimsizdir. Bu durum, büyük ve karmaşık görevlerde etkili olabilecek daha gelişmiş algoritmaların ve planlama stratejilerinin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma kapsamında daha önce kullanılan algoritmalar (Carli ve diğerleri, 2020; Yıldız ve diğerleri, 2022) geliştirilerek akıllı yol planlamasıyla (Aslan ve diğerleri, 2023) birleştirilmiş ve sürü İHA davranışları daha büyük haritalar üzerinde farklı büyüklükteki engellere karşı test edilmiştir. Ayrıca, bu tez kapsamında önerdiğimiz KSLTA algoritmasında kullanılan sanal lider sayesinde, sürü üye sayısında kayıp olsa bile kalan üyelerle uçuş formasyonu yeniden oluşturularak hedef noktaya ulaşılmaktadır. Böylece, sağlam, esnek ve ölçeklenebilir bir akıllı yol planlamasına sahip gelişmiş bir sürü sistemi ortaya konmuştur. Bu yaklaşım, büyük ve karmaşık haritalarda bile etkili ve verimli bir uçuş formasyonu sağlamaktadır. Tez kapsamında yaptığımız ikinci uygulamamızda önceki uygulamaya göre simülasyon ortamının haritası çok daha büyük olduğundan önerilen algoritmalar için daha önce Çizelge 4.2’de belirtilen İHA sensör yarıçapı (ε_r) 1.5’den 5’e çıkarılmıştır.

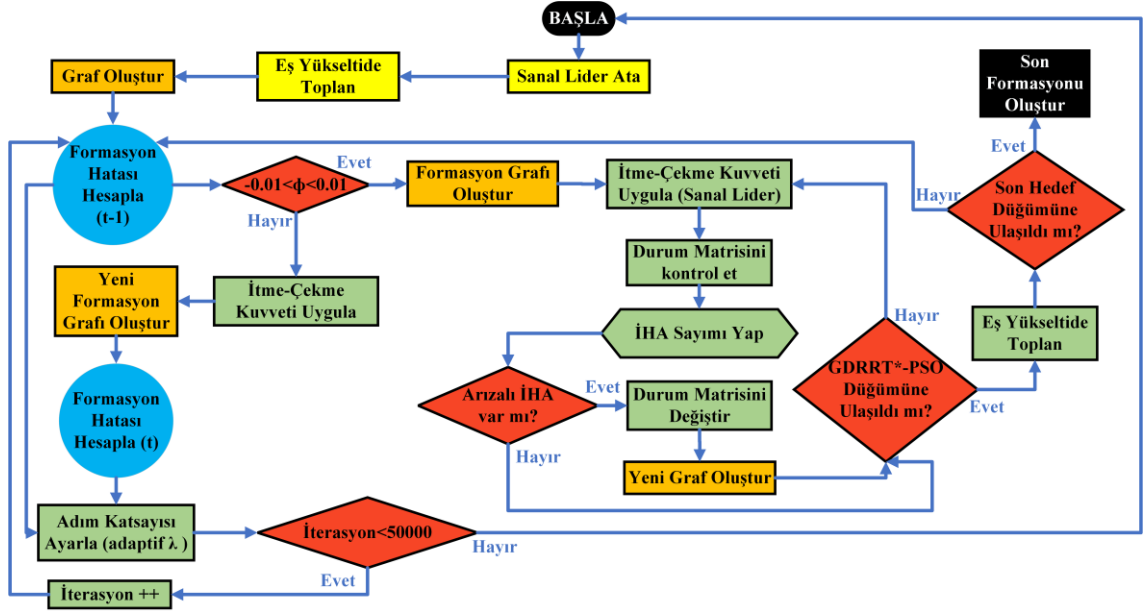
4.2.1. GDRRT*-PSO ile konsensüs-tabanlı sanal lider takip algoritması

Gerçek lider izleme yöntemi, tüm iletişim topolojisinin lider İHA'ya bağlı olduğu, hedef odaklı küçük veya iç mekân uygulamaları için başarılı sonuçlar üretebilmektedir. Öte yandan, daha geniş ve büyük alanlardaki sürü üyelerinin ortak verilerinin etkin bir şekilde işlenmesi için, iş birliğinin kontrol edilmesi ve hedef noktaya doğru hareket edilirken uçuş formasyonunun korunması gerekmektedir (Kuriki ve Namerikawa, 2014; T. Nguyen ve diğerleri, 2018). Ayrıca sürü üyeleri, belirli bir hedefe doğru hareket ederken gerçek lider takibi sırasında arızalara veya düşmelere karşı hassastır. Formasyon şekli bozulabilir veya iletişim topolojisi çökebilir. Özellikle lider İHA'da yaşanacak en ufak bir sorun tüm sistemi tehlikeye atabilmektedir. Bu durumu önlemek için daha önce önerdiğimiz sanal lidere dayalı bir formasyon kontrol algoritmasını (Yildiz ve diğerleri, 2024) sürü rota takibi için geliştiriyoruz. Bu ikinci uygulama kapsamında yapılan katkı, KSLTA ve GDRRT*-PSO algoritmasının birleştirilmesiyle hibrit bir algoritma oluşturulmasıdır. Bu şekilde sürünün hedef noktaya ulaşmak için kullanacağı en optimum rota belirlenir. Bu hem enerji hem de görev süresi açısından önemli bir gelişmedir. Önerilen hibrit algoritma ile sürü üyeleri, her bir GDRRT*-PSO düğümüne doğru hareket ederken sanal lidere göre konumlarını güncelledikten sonra sürekli olarak formasyon hatasını hesaplar. Sürü üyelerinin yanı sıra formasyon şekline bağlı olarak eklenen sanal lidere bağlı graf yapısı, G_{SL} hedef ve engel kümelerindeki değişiklikler sırasında sürekli olarak güncellenmektedir. Bu uygulama kapsamında GDRRT* yol planlama algoritmasının önerdiği rotanın optimizasyonunda kullanılan PSO algoritmasının parametre değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. PSO algoritmasının parametre değerleri

Kontrol Parametreleri	Değeri
Popülasyon büyüklüğü	150
İterasyon sayısı	150
İvme katsayıları ($c_1; c_2$)	1.5 ; 1.5
Atalet ağırlığı (w)	1

Eş zamanlı olarak optimize edilen GDRRT*-PSO yol planlama algoritmasına göre belirlenen rota dikkate alınarak KSLTA algoritması sürü hareketini sağlar. Önerilen algoritmaların akış şeması Şekil 4.8'de sunulmuştur.



Şekil 4.8. GDRRT*-PSO ile Konsensüs-tabanlı sanal lider takip algoritmasının akış diyagramı

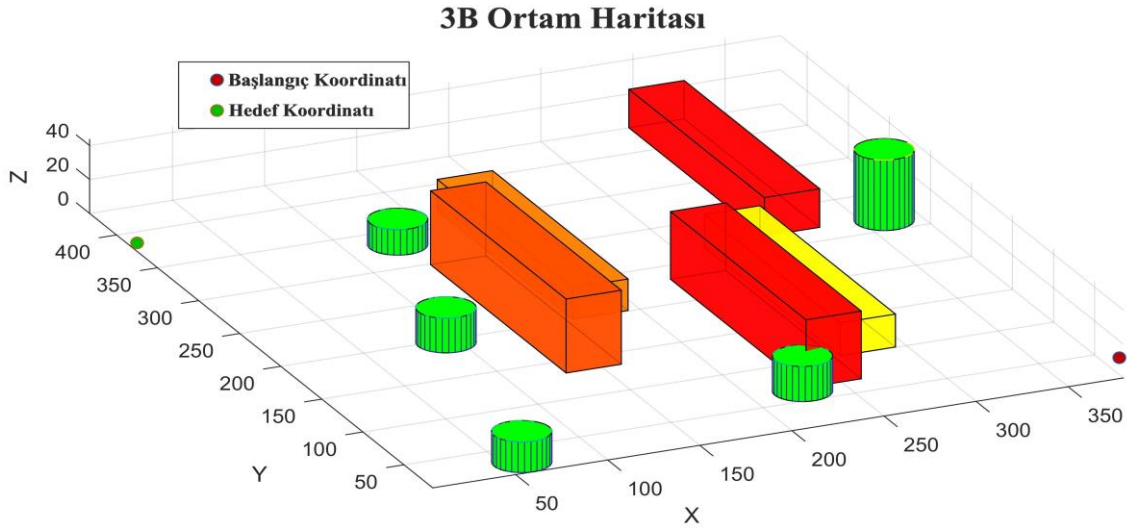
Akış şemasına göre öncelikle sürü üyelerine ek bir sanal lider ataması yapılır. Sonrasında ortama dağılmış sürü üyelerinin konum verilerine eş yükseltide toplanma algoritması uygulanır. Aynı irtifada toplanan sürü üyeleri arasında sürü büyüklüğüne göre Şekil 3.6’da verilen sürü uçuş formasyonuna ait bir graf yapısı oluşturulur. Daha sonra oluşan graf yapısının formasyon hatası hesaplanır. Formasyon hatası istenen aralıkta değilse sürü üyelerinin her birine itme ve çekme kuvvetleri uygulanarak beklenen uçuş formasyonu oluşturulur. Her bir itme-çekme kuvveti bir önceki formasyon hatasına bağlı olarak adaptif bir şekilde ayarlanır.

Sürü üyeleri arasındaki mesafe, istenilen formasyon mesafesine ulaştığında, uçuş boyunca korunacak bir uçuş formasyon grafiği oluşturulur. Bu formasyonu alan sürü, yol planlama algoritması GDRRT*-PSO tarafından belirlenen ilk düğüme doğru hareket ederken, sanal lider ile hedef düğüm arasındaki çekme kuvvetine bağlı kalır. Aynı zamanda sürü üyeleri, kendi aralarında itme ve çekme kuvvetleri uygulayarak, her bir düğüm noktasına sırayla hareket eder. Bu dinamik etkileşimler, sürünün belirlenen yolu izleyerek hedefine doğru ilerlemesini ve formasyonun korunmasını sağlar.

Sürü hareketleri boyunca, üyeler arasındaki mesafe sürekli olarak kontrol edilir. Beklenen formasyon mesafesinden çok uzakta bir konum bilgisi veya z ekseninde 0 koordinatı durumu, durum matrisi içinde yer aldığı anda, arızalı veya iletişimi kopmuş sürü üyeleri tespit edilir. Bu sayede, sürü üyeleri arasındaki uyum ve formasyonun korunması sağlanır, olası sorunlar hızlı bir şekilde belirlenerek gerekli önlemler alınabilir.

Sürü her düğüme ulaştıkça bir sonraki düğüme doğru ilerler. Böylece, algoritmayı izleyen konsensüs dayalı sanal lider ile hedef için belirlenen her noktaya, engellerle çarpışmadan ulaşılır. Ayrıca, sürü hareketi sırasında bazı üyelerin rastgele bir anda iletişimi kaybetmesi durumunda, algoritmanın yeniden formasyon oluşturma fonksiyonu devreye girer. Bu fonksiyon, sürünün yeni bir graf yapısı oluşturarak tekrar konsensüs dayalı bir formasyonu benimsemesini sağlar ve sürü yoluna devam eder.

Bu şekilde, KSLTA ve GDRRT*-PSO algoritmalarının birleştirilmesi, büyük ölçekli haritalar üzerinde hızlı ve etkili bir yol planlaması sağlarken, sağlam, esnek ve ölçeklenebilir bir sürü topolojisi oluşturur. Böylece, hedef noktaya başarılı bir şekilde navigasyon yapılması mümkün olur. GDRRT*-PSO'ya sahip KSLTA algoritmasını temel alan simülasyon sonuçları Şekil 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14'de sunulmaktadır. İHA sürüsünün iş birlikçi formasyon kontrollü uçuşuna yönelik çevresel haritası, Şekil 4.9'daki gibidir.

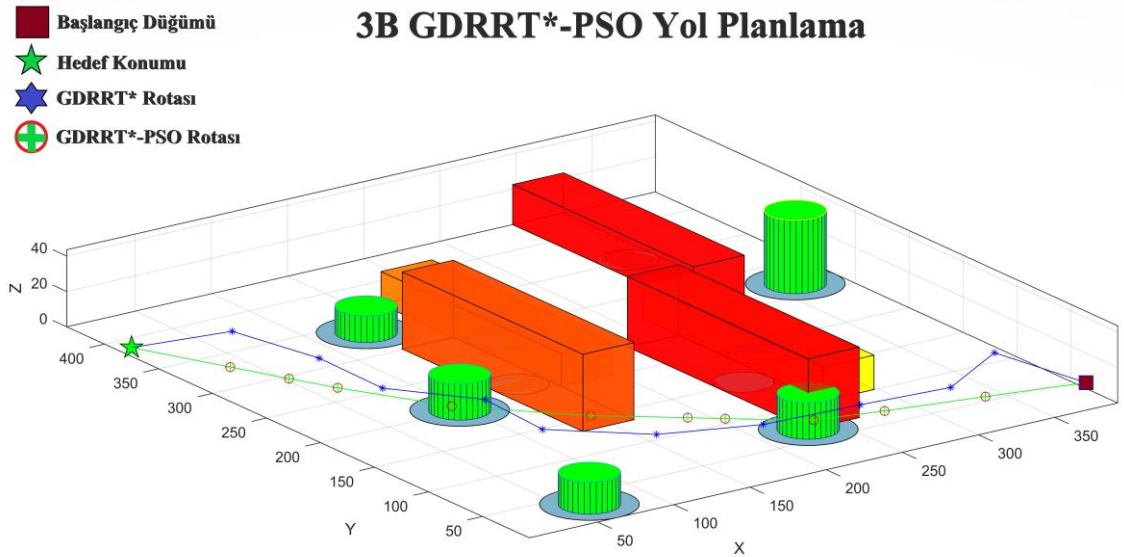


Şekil 4.9. Üç boyutlu ortam haritası

Bu ortamda farklı yükseklik ve büyüklükte çeşitli engeller mevcuttur. Kırmızı noktayla gösterilen konum, İHA sürüsünün toplanıp bir formasyon oluşturacağı başlangıç noktasıdır. Yeşil nokta sürünün ulaşması gereken hedef noktayı temsil eder. Simülasyonunun amacı, sürü üyeleri arasında engellere çarpmadan uçuş formasyonu sürdürmek ve hedef noktaya en kısa yoldan ulaşmaktır.

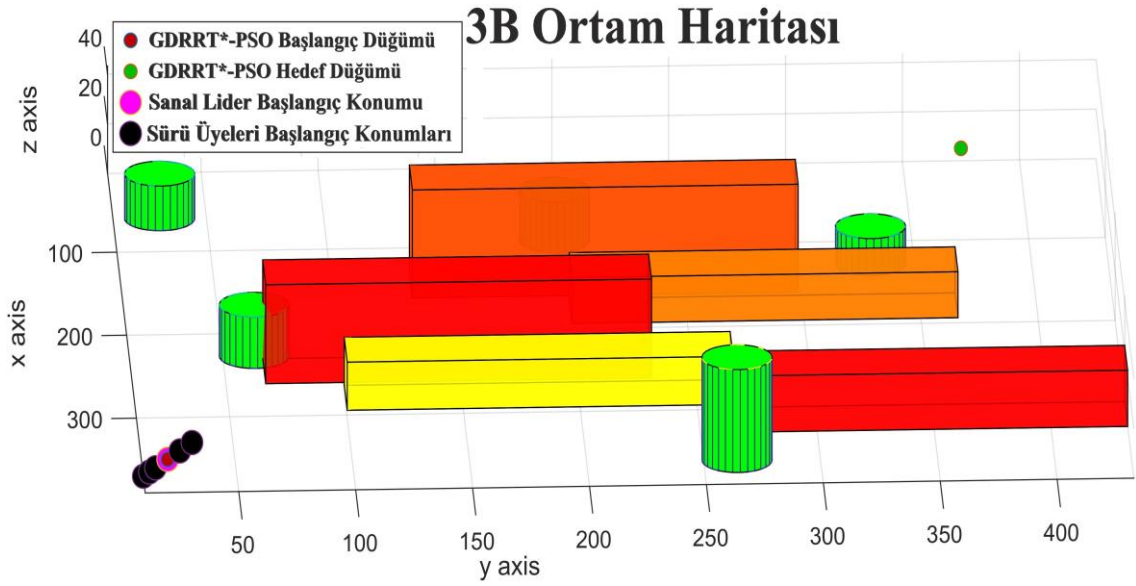
En kısa rotayı belirlemek için GDRRT*-PSO algoritması önerilmiştir. GDRRT*, engelsiz, doğrusal olarak birbirine bağlı noktalardan oluşan bir rota oluşturur. Ancak bu rota sürü üyelerinin izleyeceği son rota değildir. Bu rota üzerinde herhangi iki nokta

arasındaki doğrusal rota, engelsiz noktalarda rastgele gittiği için olması gerekenden nispeten daha uzundur. Daha sonra, optimum kısa mesafeleri belirlemek için PSO kullanılır. Burada GDRRT* ile elde edilen düğüm sayısının sabit olduğu varsayılır ve iki düğüm arasındaki en kısa Öklid mesafesi PSO kullanılarak optimize edilir. Böylece sürü için güvenli bir rota oluşturularak sürünün hedefe en az enerji harcaması ile en kısa sürede ulaşması sağlanır. GDRRT*-PSO kombinasyonu tarafından oluşturulan rota Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Uygulanan GDRRT* algoritması sayesinde yaklaşık 15 saniye kadar kısa bir sürede farklı büyüklük ve şekillerdeki engellerin bulunduğu ortamda engelsiz rota oluşturulmuştur. Ayrıca, GDRRT* algoritması ile belirlenen rota uzunluğu 652,64 iken uygulanan PSO rota optimizasyonu ile bu rota 569,10'a kadar kısalmıştır. Ayrıca, Şekil 4.10'da görüldüğü üzere keskin manevralara sahip düğümler yumuşatılmış ve bu sayede sürü sistemi için enerji ve maliyet açısından en verimli bir rota sağlanmıştır.

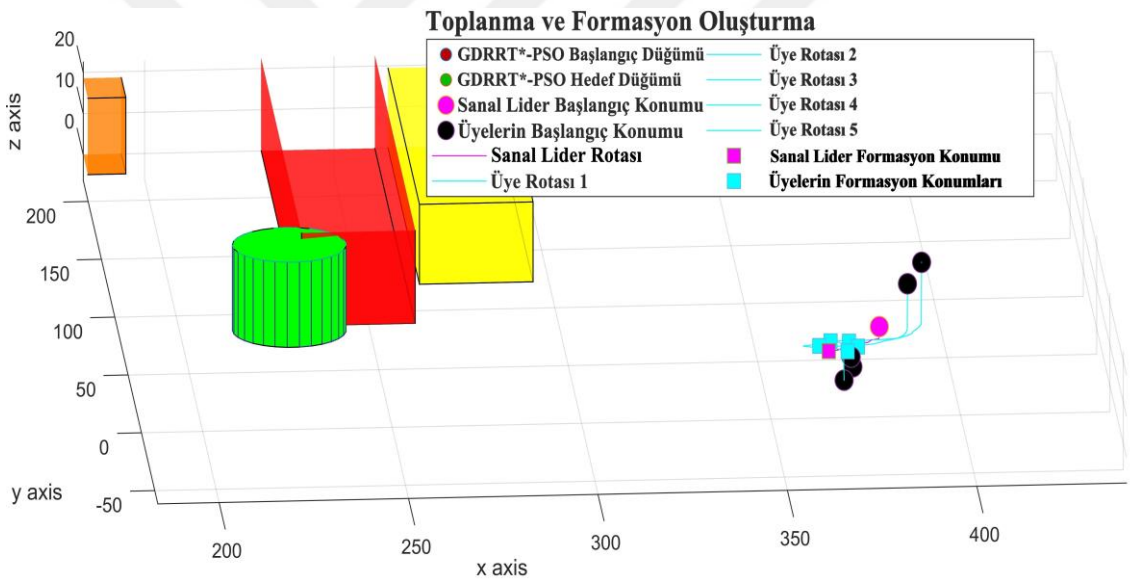


Şekil 4.10. Üç boyutlu ortamda GDRRT*-PSO algoritması ile yol planlama

Sürü sistemi için akıllı bir yol planlaması gerçekleştirdikten sonraki ilk aşamada 5 İHA'dan oluşan bir sürü Şekil 4.11'de gösterildiği gibi harita üzerindeki başlangıç noktasının etrafına rastgele dağıtılmıştır. Potansiyel itme ve çekme fonksiyonlarına dayalı toplanma algoritması uygulanmadan önce 5 İHA'dan oluşan sürüye sanal bir lider atanır. Daha sonra eş yükseltide toplanma ve formasyon oluşturma algoritması kullanılarak üyeler aynı yükseklikte Şekil 4.12'de görüldüğü üzere hegzagonal formasyonu oluşturur.

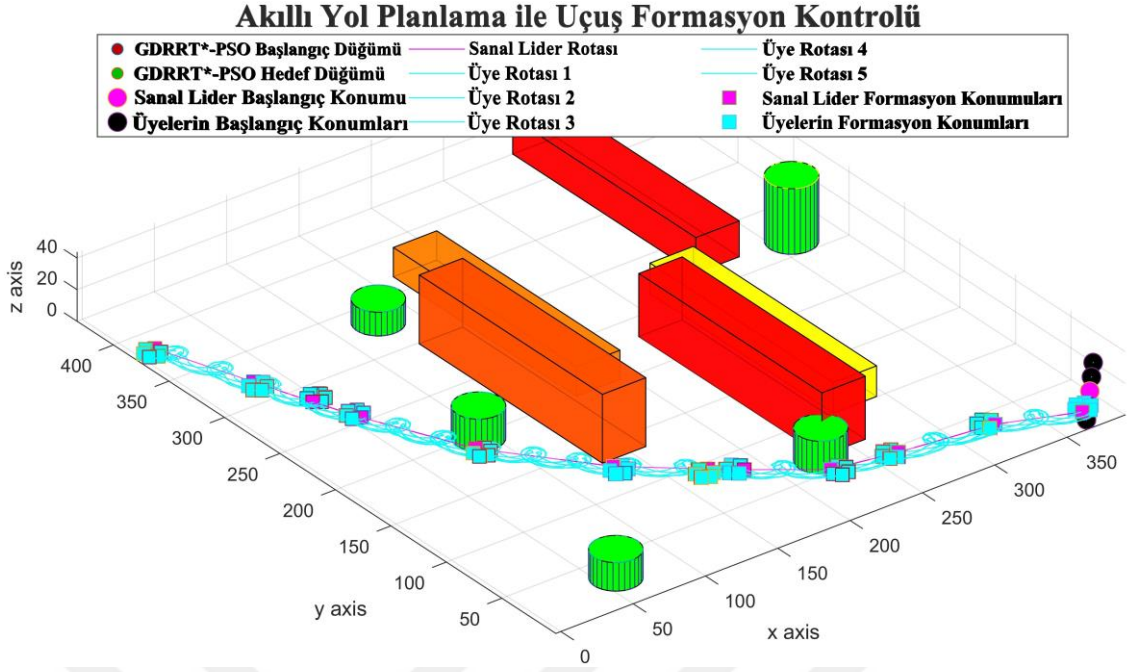


Şekil 4.11. Üç boyutlu ortamda başlangıç koordinatı etrafında sürü üyelerinin rasgele dağıtılması



Şekil 4.12. Üç boyutlu ortamda toplanma ve formasyon oluşturma

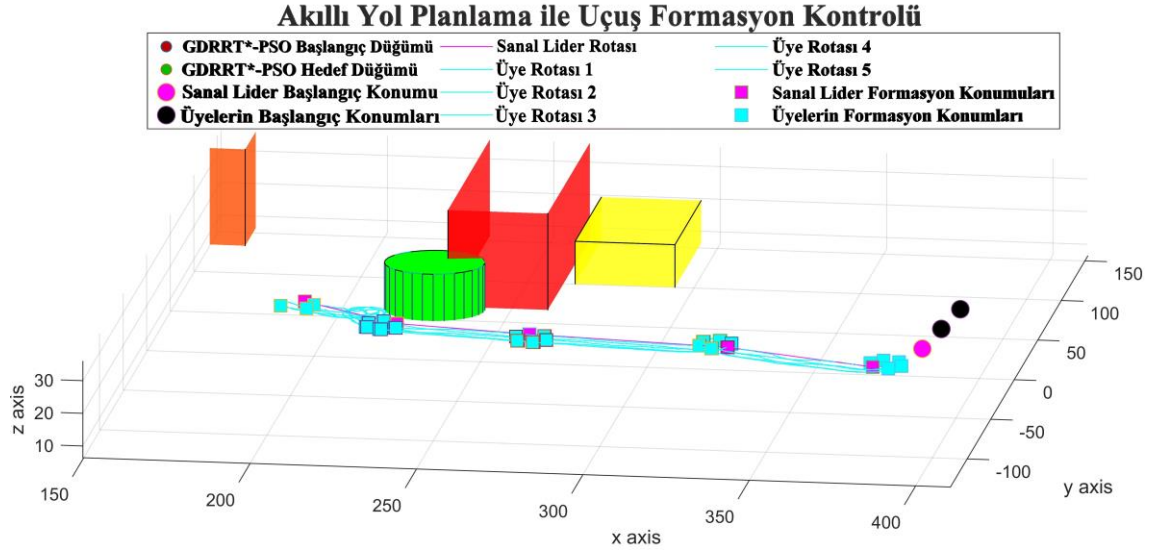
Önerilen algoritmalar ile İHA sürüsü belirlenen rota boyunca engellere çarpmadan uçuş formasyonunu koruyarak Şekil 4.13'deki gibi hedef noktaya hızlı bir şekilde ulaşmaktadır.



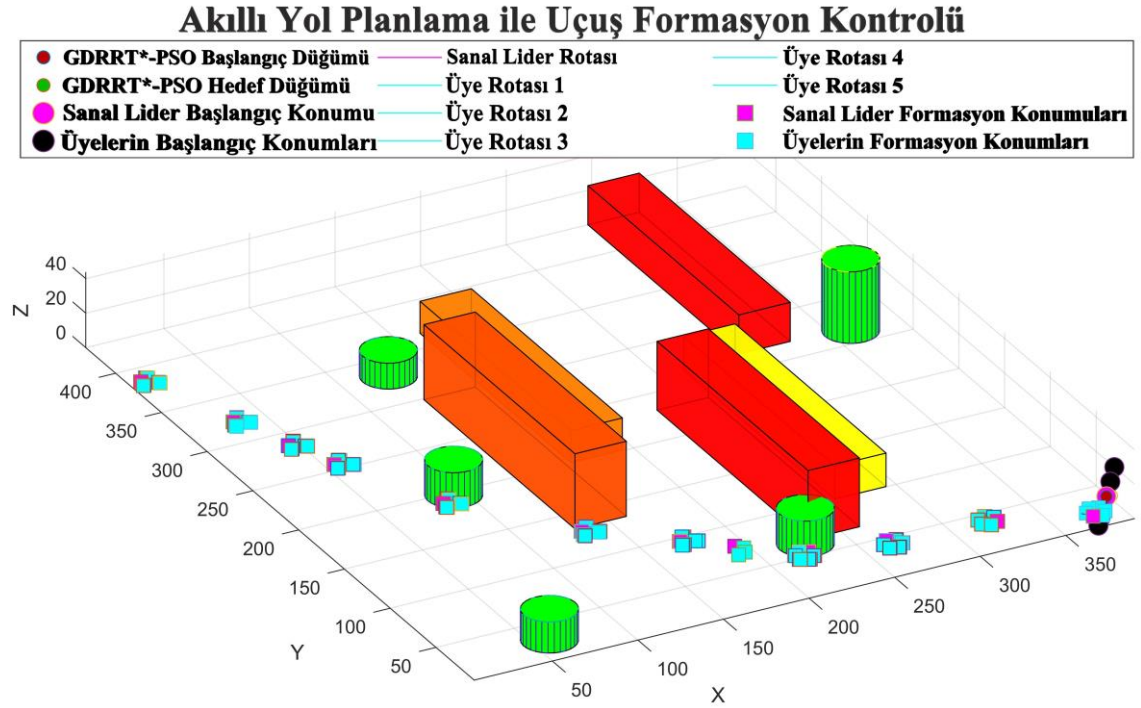
Şekil 4.13. Üç boyutlu ortamda GDRRT*-PSO ve KSLTA algoritmaları ile formasyon kontrolü

Sistemin sağlamlığını, esnekliğini ve ölçeklenebilirliğini test etmek için, rastgele sayıda İHA'nın uçuş sırasında rastgele bir anda arızalandığı veya iletişimi kaybettiği varsayılmaktadır. Bu, herhangi bir İHA'dan konum verisinin alınmadığı ve dağıtılmış yönlü grafik yapısına bağlı durum matrisindeki değerinin 0 olduğu veya beklenen formasyon mesafesinden uzakta bir değer ($d_{ij} \gg 5$) hesaplandığı anlamına gelir. Dolayısıyla bunlar konsensüsün sağlanamadığı durumlardır. Uçuş sırasında 2 sürü üyesi İHA'nın iletişiminin kesildiği Şekil 4.14'de sunulan ilk senaryoda, önerilen KSLTA algoritması sayesinde sürü, sanal bir lider atayıp kalan 4 İHA ile yeni bir tetragonal formasyon oluşturarak Şekil 4.15'de gösterildiği gibi engele çarpmadan hedef noktaya ulaşmıştır.

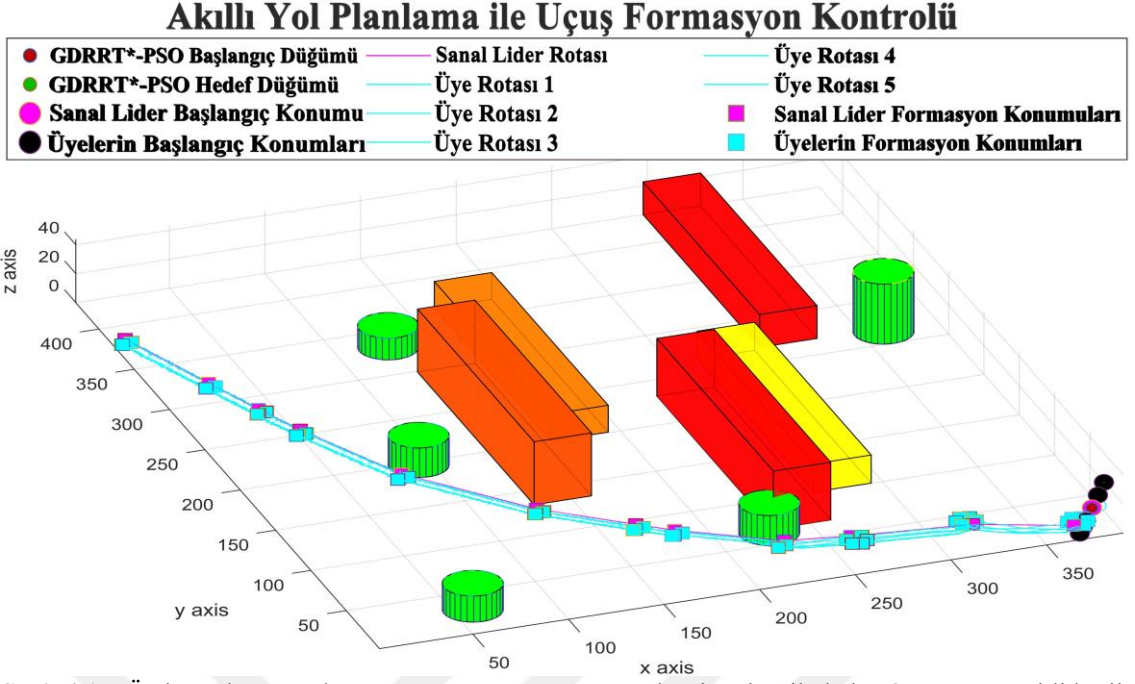
Bu açıdan değerlendirildiğinde, sürünün üyelerini kaybetmesine rağmen görevi tamamlayabilecek kadar sağlam bir sürü topolojisine sahip olduğu söylenebilir. Ayrıca, bozulan uçuş formasyonunu yeniden oluşturabilecek kadar esnek bir yapıya sahip olduğu da gözlemlenmektedir. Benzer bir senaryoda ise 3 İHA'nın iletişiminin kesildiği görülüyor. Önerilen yöntem sayesinde kalan 2 sürü üyesine sanal bir lider atanarak trigonal uçuş formasyonu oluşturulmuş ve hedef noktaya Şekil 4.16'da görüldüğü üzere uçuş formasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.14. Üç boyutlu ortamda GDRRT*-PSO ve KSLTA algoritmaları ile formasyon kontrolü sırasında 2 İHA'nın iletişiminin koptuğu an



Şekil 4.15. Üç boyutlu ortamda GDRRT*-PSO ve KSLTA algoritmaları ile kalan 3 üye ve sanal lider ile birlikte formasyon kontrolü



Şekil 4.16. Üç boyutlu ortamda GDRRT*-PSO ve KSLTA algoritmaları ile kalan 2 üye ve sanal lider ile birlikte formasyon kontrolü

4.2.2. Konsensüs tabanlı GDRRT*-PSO sanal lider takip algoritması performans değerlendirmesi

Sürü topolojilerinde bütünsel iletişim ve koordinasyon söz konusu olduğundan hedef noktaya ulaşma süresi ilk etapta bir performans ölçüsü olarak öne sürülebilir. Ancak bu noktada bazı kritik durumlarla karşılaşılabilir. Basit hedefe yönelik görevler için, sürü hareketi boyunca formasyon kontrolü olmadan lider takibi yapılabilir. Ancak alan tarama ve toplu saldırı veya savunma gibi görevlerde uçuş boyunca formasyon kontrolü daha önemlidir. Daha büyük ölçekli uygulamalarda lider takibi, formasyon kontrolü ve üyelere karşı yeniden formasyon veya uçuş sırasında meydana gelen iletişim kayıpları ön plana çıkmaktadır. Yukarıda belirtilen durumlar dikkate alınarak sürü İHA için geliştirilen akıllı yol planlamasına dayalı formasyon kontrolü algoritması ile yeni bir topoloji önerilmiştir. Kısacası, İHA'ların sürü halinde birçok alanda kullanılabileceği hızlı rota planlaması ve sağlam, esnek, ölçeklenebilir sürü yapısına sahip haberleşme topolojileri ile öne çıkabilecek bir sistem ortaya konmuştur.

Bu çalışmada sürü performansı kriteri, hedef noktaya ulaşma süresi, yineleme sayısı, rota uzunluğu ve sürü büyüklüğüne göre değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçlarının değerlendirme tablosu Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. GDRRT*-PSO ile konsensüs-tabanlı sanal lider takibi algoritmasının performans değerleri

Sürü Boyutu		5 İHA	Kalan 3 İHA	Kalan 2 İHA
Uçuş Formasyonu	Süre (dk)	76	42	54
	İterasyon Sayısı	4100	2352	2916
	Sanal Lider Rota Uzunluğu 1	570	570	570
	Rota Uzunluğu 2	685	266	632
	Rota Uzunluğu 3	711	284	654
	Rota Uzunluğu 4	662	636	296
	Rota Uzunluğu 5	706	638	644
	Rota Uzunluğu 6	696	242	288

Öncelikle, çevrede rastgele dağıtılan İHA'lar, GDRRT*-PSO algoritması tarafından önerilen ilk düğüme doğru hareket eder. Bu hareket sırasında önerilen düğüm noktası sanal liderin konumu olarak belirlenir ve sürü üyelerine uygulanan potansiyel itme ve çekme kuvvetleri doğrultusunda altıgen bir uçuş formasyonu oluşturulur. Uçuş formasyonlarının hedef noktaya ulaşma süreleri, sürünün büyüklüğüyle doğrudan orantılıdır. Özellikle İHA'ların sağlamlıklarını ve esnekliklerini değerlendirmek için rasgele sayıda İHA'nın düştüğü simülasyonlarda hedefe ulaşma süresi kısalmır. Ayrıca önerilen yol planlama algoritmasının, büyük bir harita üzerinde hedef noktaya daha avantajlı bir sürede ulaşmayı sağlayacağı ileri sürülebilir. Gerçek lider takip uygulamalarında (Carli ve diğerleri, 2020), daha basit bir yörünge tasarlanarak hedefe daha hızlı ulaşılacağı iddia edilse de, bu yöntem hala sürü sistemi arızalarına veya iletişim kesintilerine karşı hassastır. Ayrıca, daha önce önerdiğimiz çalışma (Yildiz ve diğerleri, 2024), sürü sistemi arızalarına veya iletişim kesintilerine karşı sağlam ve esnek olmasına rağmen, bu uygulamadaki gibi büyük haritalarda koordineli kolektif uçuş nedeniyle enerji ve maliyet açısından dezavantajlıdır.

Sonuç olarak önerilen algoritma, gerçek liderleri takip eden uygulamalara (Campion ve diğerleri, 2019; Carli ve diğerleri, 2020; Kuriki ve Namerikawa, 2014; Petit, 2016) göre sürü üyesi sayısındaki değişikliklere karşı daha sağlam bir yapı sağlamakta ve uçuş formasyonlarının değişmesine karşı daha esnektir. Ayrıca daha önce önerilen sanal lideri takip eden yol planlama algoritması ile karşılaştırıldığında, GDRRT*-PSO algoritması sayesinde daha büyük haritalarda daha hızlı yol planlaması sağlayarak enerji ve maliyet açısından önemli bir avantaja sahiptir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 İlk Uygulama için Sonuçlar

İHA'lar günümüzde birçok alanda talep gören teknolojik araçlardır ve bunların sürüler halinde konuşlandırılması büyük önem taşımaktadır. Ancak dinamik yapılarından dolayı sürü halinde kullanmak zor olabilir. Özellikle sürü üyelerinde meydana gelen arızalar ve dış etkenlerden kaynaklanan ani değişiklikler önemli sorunlara yol açabilmektedir. Bu çalışmada, ilgilenilen ortamın içinde veya dışında dağıtılan İHA'lar için bir toplama algoritması uygulanmıştır. Sürü üyesi İHA'ların veya ortamdaki engellerin dahil olduğu çarpışmalar veya iletişimde kesinti olmadan hedefe ulaşabilen sanal lider takibini esas alan bir yol planlama algoritması geliştirilmiştir. Sürü üyeleri arasında uçuşları sırasında fikir birliğine dayalı formasyon kontrolü sağlanarak bir iletişim topolojisi oluşturuldu. Burada sürü üyeleri anlık konumlarını paylaşırlar. Yalnızca konum bilgisi işlendiğinden uygulanması kolaydır.

Simülasyonlarda sürü sisteminin sanal lider algoritmasını kullanarak iç parametrelerini dış etkenlere karşı koruduğu ve üyelerinin başarısızlığına rağmen görevi tamamladığı görülmüştür. Bu nedenle İHA'lar için geliştirilen akıllı yol kontrolü sayesinde sürü problemlerine karşı verimli sonuçlar elde edildi. Ayrıca gerçek zamanlı uygulamalar üzerinde test yapılarak sistem performansı ölçülebilmektedir.

5.2 İlk Uygulama için Tartışma ve Öneriler

İlk uygulama kapsamında önerilen sistem kısıtlı sürü büyüklüğü ve kısıtlı ortam haritasında ortama yayılmış büyük engellere karşı oldukça verimli sonuçlar ortaya koymuştur. Öte yandan onlarca, hatta yüzlerce İHA içeren sürü sistemleri için zaman ve maliyet açısından sınırlı bir verimliliğe sahiptir. Yalnızca konum verisinin işlenmesi uyarlanabilir bir sistem oluşturmak açısından önemli kolaylıklar sağlasa da konum verilerinin yetersiz olabileceği uç noktalarda doğrusallaştırılmış bir dinamik modele ihtiyaç duyulabilir. Akıllı yol planlamasına ek olarak sonraki uygulamalarda bu sorunun üstesinden gelmek için ana sürünün alt sürülere bölünmesi ve hız veya ivme gibi potansiyel dinamiklerin de sisteme dahil edilmesi önerilebilir. Ancak, burada sistem dinamiklerinin tamamen değişmesi önerilen konsensüs yapısının da baştan sona yenilenmesini gerektirebilir. Bu durumda ortaya farklı görev problemleri ortaya çıkabilir.

Bir diğer öneri ise sanal lider tabanlı uygulama haricinde formasyon kontrolü için hiyerarşik bir sürü yapısı oluşturarak beklenen görev için farklı yaklaşımlar denenebilir. Fakat, bu tür bir sistem beraberinde fazladan kontrol parametreleri getirecektir buda işlem yoğunluğunun ve sonraki aşamalar içinse maliyetin artmasına neden olabilir. Uygulamanın bir diğer sınırlılığı ise harita boyutunun artması nedeniyle hedef noktaya ulaşmak için çok fazla alternatif rotanın oluşmasıdır ve bu rotaların optimum olduğu hakkında net bir kanaat oluşmamaktadır. Bu tez kapsamında yapılan ikinci uygulamada ise bu problem için uçuş öncesi çevrimdışı (offline) yol planlama algoritması geliştirilerek optimum rota belirlenebilir.

5.3 İkinci Uygulama için Sonuçlar

İkinci uygulama kapsamında önerilen sistemde sürü halindeki İHA'ların uçuş formasyon kontrolü KSLTSA tarafından sağlanırken, uçuş rotası GDRRT*-PSO adlı akıllı bir yol planlama algoritması kullanılarak oluşturulur. Sürü uçuşları sırasında fikir birliğine dayalı formasyon kontrolü sağlanarak bir iletişim topolojisi tanıtılmıştır. Bu topolojide, sürü üyeleri sensörlerinden okunan mevcut konumlarını paylaşırlar. Sürü üyeleri, hareket sırasında aralarında potansiyel itme ve çekme kuvvetlerini kullanarak formasyonu korumaya çalışırken, hedef düğümlere sırayla ulaşmaya çalışır. Bu süreçte, sürü, hedef düğümlere ulaşmak için hedef düğüm ile sanal lider arasındaki potansiyel çekme kuvvetini kullanır.

Önceki çalışmalara göre GDRRT*-PSO yol planlama algoritmasının büyük haritalarda daha hızlı olması, sürü sistemleri açısından enerji verimliliği ve düşük maliyet avantajları sağlar. Ayrıca, sürü üyelerinde arızalar veya iletişim kesintilerine rağmen uygulanan KSLTA algoritması sayesinde formasyon şekli simülasyon sırasında yeniden oluşturulabilir ve uçuş boyunca kontrol altında alınabilir. Böylece, yapılan simülasyon uygulamaları sayesinde sürü İHA sistemleri için akıllı bir rota planlaması yapıldığı ve sürü topolojisi içinde Sağlam ve Esnek bir yapı oluşturulduğu söylenebilir. Bu sayede, özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan sürü üye sayısındaki kayıplardan kaynaklanan kısıtlamaların üstesinden gelinebilir. Ayrıca, esnek formasyon yapısı, sürüye değişken görevlerde kolaylık sağlayacaktır.

5.4 İkinci Uygulama için Tartışma ve Öneriler

İkinci uygulama büyük ve geniş harita alanlarında sürü İHA'lar için KSLTSA algoritması sayesinde formasyon kontrolünün yanında GDRRT*-PSO algortması ile de akıllı bir yol planlaması sunabilir. Öte yandan, engeller açısından çok karmaşık olan ortamlarda, GDRRT* hedefe ulaşmak için engellere gerektiğinden fazla yaklaşabilir ve engele çarpma şansını artırabilir. Bu durumda, sistemi engelden kaçamayacak duruma sokabilir. GDRRT*, tamamen hedefe yakınsama üzerine odaklandığı için, hedefe yakın ancak engeller içeren bir alanda sıkışıp kalabilir. Bu duruma, yerel minimumda takılma denebilir. Ek olarak, GDRRT*'in en önemli parametresi olan d değeri çok küçük seçilirse, GDRRT* hedefe çok yavaş bir şekilde yakınsar. Ayrıca, GDRRT*-PSO önemli ölçüde yol uzunluğunu azaltırken, optimizasyon için ek zaman gerekecektir. Özellikle hızlı ve etkili sürü İHA sistemlerinde bu handikapların oluşabileceği göz önünde bulundurulmalı ve buna göre uygulama yapılmalıdır.

Bu tez kapsamında önerilen algoritmaların yanı sıra farklı sürü algoritmalarına dayalı gerçek zamanlı uygulamalarla sistem performansına yönelik deneyler yapılabilir. Ayrıca daha önce bahsettiğimiz, KSLTSA algoritmasının geliştirilmesi ve çoklu hedef tespiti için ana sürünün alt sürülere bölünmesi durumunda daha fazla görev aynı anda gerçekleştirilebilecektir. Ancak, bu durumun işlem yoğunluğu ve maliyet açısından dezavantaj yaratabileceği göz önüne alınmalıdır. Ayrıca önerilen KSLTSA algoritmasının karşılaştırmalı analizi için yeni önerilen sürü çalışmaları ve kullanılan yol planlama algoritmasında zamana bağımlılığı en aza indirmek amacıyla yapay zekâ tabanlı yol planlama algoritmaları ile karşılaştırmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdessameud, A., ve Tayebi, A., 2018, Distributed Consensus Algorithms for a Class of High-Order Multi-Agent Systems on Directed Graphs, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 63:10, 3464–3470, DOI:10.1109/TAC.2018.2799520
- Adoni, W., Lorenz, S., Fareedh, J., Gloaguen, R., ve Bussmann, M., 2023, Investigation of Autonomous Multi-UAV Systems for Target Detection in Distributed Environment: Current Developments and Open Challenges, *Drones*, 7:4, 263, DOI:10.3390/drones7040263
- Allard, Y., Shahbazian, E., ve Isenor, A., 2014, Unmanned Underwater Vehicle (UUV) Information Study, *Defence Research and Development Canada*, Montreal, Canada.
- Alonso-Mora, J., Montijano, E., Schwager, M., ve Rus, D., 2016, Distributed multi-robot formation control among obstacles: A geometric and optimization approach with consensus, *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2016-June, 5356–5363, DOI:10.1109/ICRA.2016.7487747
- Alsammak, I. L. H., Mahmoud, M. A., Aris, H., Alkilabi, M., ve Mahdi, M. N., 2022, The Use of Swarms of Unmanned Aerial Vehicles in Mitigating Area Coverage Challenges of Forest-Fire-Extinguishing Activities: A Systematic Literature Review, *Forests*, 13:5, 1–31, DOI:10.3390/f13050811
- Aslan, M. F., Durdu, A., ve Sabanci, K., 2023, Goal distance-based UAV path planning approach, path optimization and learning-based path estimation: GDRRT*, PSO-GDRRT* and BiLSTM-PSO-GDRRT*, *Applied Soft Computing*, 137, 110156, DOI:10.1016/J.ASOC.2023.110156
- Bae, I., ve Hong, J., 2023, Survey on the Developments of Unmanned Marine Vehicles: Intelligence and Cooperation, *Sensors*, 23:10, 4643, DOI:10.3390/S23104643
- Bakırcıoğlu, V., ve Kalyoncu, M., 2020, Bacaklı Robotların Yürüme Stratejileri Üzerine Bir Literatür Taraması, *Politeknik Dergisi*, 23:4, 961–986, DOI:10.2339/POLITEKNIK.573673
- Bayındır, L., ve Şahin, E., 2007, A review of studies in swarm robotics, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 15:2, 115–147.
- Bayındır, L., 2016, A review of swarm robotics tasks, *Neurocomputing*, 172, 292–321, DOI:10.1016/j.neucom.2015.05.116
- Bayram, H., Stefas, N., Engin, K. S., ve Isler, V., 2017, Tracking wildlife with multiple UAVs: System design, safety and field experiments, *2017 International Symposium on Multi-Robot and Multi-Agent Systems, MRS 2017*, 2018-January, 97–103, DOI:10.1109/MRS.2017.8250937
- Bodi, M., Thenius, R., Szopek, M., Schmickl, T., ve Crailsheim, K., 2012, Interaction of robot swarms using the honeybee-inspired control algorithm BEECLUST,

- Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 18:1, 87–100, DOI:10.1080/13873954.2011.601420
- Bonabeau, E., Theraulaz, G., Deneubourg, J. L., Aron, S., ve Camazine, S., 1997, Self-organization in social insects, *Trends in Ecology and Evolution*, 12:5, 188–193, DOI:10.1016/S0169-5347(97)01048-3
- Bourgault, F., Furukawa, T., ve Durrant-Whyte, H. F., 2006, Optimal search for a lost target in a Bayesian world, *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 24, 209–222, DOI:10.1007/10991459_21
- Brambilla, M., Ferrante, E., Birattari, M., ve Dorigo, M., 2013, Swarm robotics: A review from the swarm engineering perspective, *Swarm Intelligence*, 7:1, 1–41, DOI:10.1007/s11721-012-0075-2
- Broecker, B., Tuyls, K., Sklar, E., Caliskanelli, I., Sklar, E. I., ve Hennes, D., 2015, Hybrid insect-inspired multi-robot coverage in complex environments, *Towards Autonomous Robotic Systems: 16th Annual Conference, TAROS 2015, Springer*, 9287, 56–68, DOI:10.1007/978-3-319-22416-9_8
- Buerger, S. P., Fierro, R., Vinod, A., Salton, J., HomChaudhuri, B., Oishi, M., ve Novick, D., 2016, *Reachable set computation and tracking with multiple pursuers for the ASAP counter-UAS capability*, Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States),
- Caliskanelli, I., Broecker, B., ve Tuyls, K., 2015, Multi-Robot Coverage: A Bee Pheromone Signalling Approach, *Communications in Computer and Information Science*, 519, 124–140, DOI:10.1007/978-3-319-18084-7_10
- Campion, M., Ranganathan, P., ve Faruque, S., 2019, Uav swarm communication and control architectures: A review, *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 7:2, 93–106, DOI:10.1139/juvs-2018-0009
- Carli, R., Cavone, G., Epicoco, N., Di Ferdinando, M., Scarabaggio, P., ve Dotoli, M., 2020, Consensus-Based Algorithms for Controlling Swarms of Unmanned Aerial Vehicles, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 12338 LNCS:826610, 84–99, DOI:10.1007/978-3-030-61746-2_7
- Carpin, S., Burch, D., ve Chung, T. H., 2011, Searching for multiple targets using Probabilistic Quadrees, *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4536–4543, DOI:10.1109/iros.2011.6094958
- Cekmez, U., Ozsiginan, M., ve Sahingoz, O. K., 2018, Multi-UAV Path Planning with Multi Colony Ant Optimization, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 736, 407–417, Springer Verlag, DOI:10.1007/978-3-319-76348-4_40
- Chen, H., Gao, Q., Lei, B., ve Zeng, L., 2015, Second-order consensus algorithm with input constraints for swarm robots formation control, *Proceedings of the 2015 IEEE 19th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in*

- Design, CSCWD 2015*, 66–72, DOI:10.1109/CSCWD.2015.7230935
- Cheng, J., Chen, W., Chen, L., ve Ma, Y., 2002, The improvement of genetic algorithm searching performance, *Proceedings of 2002 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2, 947–951, DOI:10.1109/ICMLC.2002.1174523
- Choudhary, S., Carlone, L., Nieto, C., Rogers, J., Christensen, H. I., ve Dellaert, F., 2017, Distributed mapping with privacy and communication constraints: Lightweight algorithms and object-based models, *The International Journal of Robotics Research*, 36:12, 1286–1311, DOI:10.1177/0278364917732640
- Chung, S. J., Paranjape, A. A., Dames, P., Shen, S., ve Kumar, V., 2018, A Survey on Aerial Swarm Robotics, *IEEE Transactions on Robotics*, 34:4, 837–855, DOI:10.1109/TRO.2018.2857475
- Cieslewski, T., Choudhary, S., ve Scaramuzza, D., 2018, Data-Efficient Decentralized Visual SLAM, *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2466–2473, IEEE, DOI:10.1109/ICRA.2018.8461155
- Cimino, M. G. C. A., Lazzeri, A., ve Vaglini, G., 2016, Using differential evolution to improve pheromone-based coordination of swarms of drones for collaborative target detection, *ICPRAM 2016 - Proceedings of the 5th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods*, 605–610, DOI:10.5220/0005732606050610
- Cimino, M. G. C. A., Lega, M., Monaco, M., ve Vaglini, G., 2019, Adaptive Exploration of a UAVs Swarm for Distributed Targets Detection and Tracking, *International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods*, 1, 837–844, DOI:10.5220/0007581708370844
- Cruz, N. B., Nedjah, N., ve de Macedo Mourelle, L., 2015, Efficient spacial clustering in swarm robotics, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9156, 14–27, DOI:10.1007/978-3-319-21407-8_2
- Dames, P., 2020, Distributed multi-target search and tracking using the PHD filter, *Autonomous Robots*, 44:3–4, 673–689, DOI:10.1007/s10514-019-09840-9
- Dames, P., Schwager, M., Kumar, V., ve Rus, D., 2012, A decentralized control policy for adaptive information gathering in hazardous environments, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2807–2813, DOI:10.1109/CDC.2012.6426239
- Dames, P., Thakur, D., Schwager, M., ve Kumar, V., 2014, Playing fetch with your Robot: The ability of Robots to locate and interact with objects, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 21:2, 46–52, DOI:10.1109/MRA.2013.2295947
- Dames, P., Tokekar, P., ve Kumar, V., 2017, Detecting, localizing, and tracking an unknown number of moving targets using a team of mobile robots, *International Journal of Robotics Research*, 36:13–14, 1540–1553,

DOI:10.1177/0278364917709507

- Dames, P. M., Schwager, M., Rus, D., ve Kumar, V., 2016, Active Magnetic Anomaly Detection Using Multiple Micro Aerial Vehicles, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1:1, 153–160, DOI:10.1109/LRA.2015.2511444
- Danilchenko, K., Nutov, Z., ve Segal, M., 2023, Covering Users With QoS by a Connected Swarm of Drones: Graph Theoretical Approach and Experiments, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 31:6, 2483–2498, DOI:10.1109/TNET.2022.3231184
- Davis, D. T., Chung, T. H., Clement, M. R., ve Day, M. A., 2016, Consensus-based data sharing for large-scale aerial swarm coordination in lossy communications environments, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2016-Novem, 3801–3808, DOI:10.1109/IROS.2016.7759559
- de Mendonça, R. M., Nedjah, N., ve de Macedo Mourelle, L., 2016, Efficient distributed algorithm of dynamic task assignment for swarm robotics, *Neurocomputing*, 172, 345–355, DOI:10.1016/J.NEUCOM.2015.05.117
- Dean-Leon, E., Ramirez-Amaro, K., Bergner, F., Dianov, I., Lanillos, P., ve Cheng, G., 2016, Robotic technologies for fast deployment of industrial robot systems, *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 6900–6907, DOI:10.1109/IECON.2016.7793823
- Deshpande, A., Kumar, M., ve Ramakrishnan, S., 2017, Robot Swarm for Efficient Area Coverage Inspired by Ant Foraging: The Case of Adaptive Switching Between Brownian Motion and Lévy Flight, *ASME 2017 Dynamic Systems and Control Conference, DSCC 2017*, 2, DOI:10.1115/DSCC2017-5229
- Donald, E., 2002, The Forward Euler Method, *Practical Analysis in One Variable*, 583–604, DOI:10.1007/0-387-22644-3_43
- Dong, J., Nelson, E., Indelman, V., Michael, N., ve Dellaert, F., 2015, Distributed real-time cooperative localization and mapping using an uncertainty-aware expectation maximization approach, *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 5807–5814, DOI:10.1109/ICRA.2015.7140012
- Eberhart, R. C., ve Shi, Y., 1998, Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1447, 611–616, DOI:10.1007/BFB0040812
- Enemark, C., 2013, Armed drones and the ethics of war: Military virtue in a post-heroic age, *Armed Drones and the Ethics of War: Military Virtue in a Post-Heroic Age*, 1–150, DOI:10.4324/9780203107218
- Estrada, M. A. R., ve Ndoma, A., 2019, The uses of unmanned aerial vehicles –UAV’s- (or drones) in social logistic: Natural disasters response and humanitarian relief aid, *Procedia Computer Science*, 149, 375–383, DOI:10.1016/J.PROCS.2019.01.151

- Fahimi, F., 2009, *Autonomous Robots*, Springer US, Boston-MA, DOI:10.1007/978-0-387-09538-7
- Fan, J., Chen, X., ve Liang, X., 2023, UAV trajectory planning based on bi-directional APF-RRT * algorithm with, *Expert Systems With Applications*, 213, 119137, DOI:10.1016/j.eswa.2022.119137
- Fathian, K., Summers, T. H., ve Gans, N. R., 2018, Distributed Formation Control and Navigation of Fixed-wing UAVs at Constant Altitude, *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2018*, 300–307, DOI:10.1109/ICUAS.2018.8453462
- Finn, A., ve Scheduling, S., 2010, Developments and Challenges for Autonomous Unmanned Vehicles: A Compendium, *Intelligent Systems Reference Library*, 3, DOI:10.1007/978-3-642-10704-7/COVER
- Flores-caballero, G., Rodríguez-molina, A., Aldape-pérez, M., ve Villarreal-cervantes, M. G., 2020, Optimized Path-Planning in Continuous Spaces for Unmanned Aerial Vehicles Using Meta-Heuristics, *IEEE Access* 8, 176774–176788 DOI:10.1109/ACCESS.2020.3026666
- Forster, C., Lynen, S., Kneip, L., ve Scaramuzza, D., 2013, Collaborative Monocular SLAM with Multiple Micro Aerial Vehicles CSfM, *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 143607:200021, 3962–3970, DOI:10.1109/IROS.2013.6696923
- Gafurov, S. A., ve Klochkov, E. V., 2015, Autonomous Unmanned Underwater Vehicles Development Tendencies, *Procedia Engineering*, 106, 141–148, DOI:10.1016/J.PROENG.2015.06.017
- Gaing, Z. L., 2003, Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints, *IEEE Transactions on Power Systems*, 18:3, 1187–1195, DOI:10.1109/TPWRS.2003.814889
- Gammell, J. D., Srinivasa, S. S., ve Barfoot, T. D., 2014, Informed RRT*: Optimal sampling-based path planning focused via direct sampling of an admissible ellipsoidal heuristic, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2997–3004, DOI:10.1109/IROS.2014.6942976
- Garcia-Aunon, P., ve Barrientos Cruz, A., 2018, Control optimization of an aerial robotic swarm in a search task and its adaptation to different scenarios, *Journal of Computational Science*, 29, 107–118, DOI:10.1016/j.jocs.2018.10.004
- Garcia-Aunon, P., Del Cerro, J., ve Barrientos, A., 2019, Behavior-based control for an aerial robotic swarm in surveillance missions, *Sensors (Switzerland)*, 19:20, DOI:10.3390/s19204584
- Garnier, S., Gautrais, J., Asadpour, M., Jost, C., ve Theraulaz, G., 2009, Self-organized aggregation triggers collective decision making in a group of cockroach-like robots,

- Adaptive Behavior*, 17:2, 109–133, DOI:10.1177/1059712309103430
- Geuther, B., Johnsrud, E., ve Wang, Y., 2012, A dual agent algorithm for foraging, 2012 *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2012*, 279–284, DOI:10.1109/ICMA.2012.6282855
- Goel, R., ve Gupta, P., 2020, Robotics and Industry 4.0, *Advances in Science, Technology and Innovation*, 157–169, DOI:10.1007/978-3-030-14544-6_9
- Gross, J. L., Yellen, J., ve Anderson, M., 2018, *Graph Theory and Its Applications*. Chapman and Hall/CRC, DOI:10.1201/9780429425134
- Gupta, A., Virmani, A., Mahajan, P., ve Nallanthigal, R., 2021, A Particle Swarm Optimization-Based Cooperation Method for Multiple-Target Search by Swarm UAVs in Unknown Environments, 2021 *7th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, 95–100, IEEE, DOI:10.1109/ICARA51699.2021.9376529
- Ha, Q. P., Yen, L., ve Balaguer, C., 2019, Robotic autonomous systems for earthmoving in military applications, *Automation in Construction*, 107, 102934, DOI:10.1016/J.AUTCON.2019.102934
- Han, T., Chi, M., Guan, Z., Hu, B., Xiao, J., ve Huang, Y., 2017, Distributed Three-Dimensional Formation Containment Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicle Systems, *Asian Journal of Control*, 19:3, 1103–1113, DOI:10.1002/asjc.1445
- Harik, E. H. C., Guerin, F., Guinand, F., Brethe, J. F., ve Pelvillain, H., 2017, Towards An Autonomous Warehouse Inventory Scheme, 2016 *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2016*, 1–8, DOI:10.1109/SSCI.2016.7850056
- Hoff, N., Wood, R., ve Nagpal, R., 2013, Distributed Colony-Level Algorithm Switching for Robot Swarm Foraging, *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 83, 417–430, DOI:10.1007/978-3-642-32723-0_30
- Howard, A., Matarić, M. J., ve Sukhatme, G. S., 2002, Mobile Sensor Network Deployment using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to the Area Coverage Problem, *Distributed Autonomous Robotic Systems 5*, 299–308, DOI:10.1007/978-4-431-65941-9_30
- Hu, J., Xie, L., Lum, K. Y., ve Xu, J., 2013, Multiagent information fusion and cooperative control in target search, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 21:4, 1223–1235, DOI:10.1109/TCST.2012.2198650
- Huang, Y., Du, J., Yang, Z., Zhou, Z., Zhang, L., ve Chen, H., 2022, A Survey on Trajectory-Prediction Methods for Autonomous Driving, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 7:3, 652–674, DOI:10.1109/TIV.2022.3167103
- Hughes, T., 1971, *Elmer Sperry*, Johns Hopkins University Press, DOI:10.56021/9780801811333
- Islam, F., Nasir, J., Malik, U., Ayaz, Y., ve Hasan, O., 2012, RRT * -Smart : Rapid

- convergence implementation of RRT * towards optimal solution, *2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 1651–1656, DOI:10.1109/ICMA.2012.6284384
- Jacobs, H., ve Whitney, E. E., 1962, *Missile and Space Projects Guide 1962*, Springer US, Boston, MA, DOI:10.1007/978-1-4899-6427-4
- Jia, S., Hada, Y., Gakuhari, H., Takase, K., Ohnishi, T., ve Nakamoto, H., 2006, Intelligent home service robotic system based on robot technology middleware, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4478–4483, DOI:10.1109/IROS.2006.282084
- Jones, C., ve Matarić, M. J., 2003, Adaptive Division of Labor in Large-Scale Minimalist Multi-Robot Systems, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2, 1969–1974, DOI:10.1109/IROS.2003.1248936
- Jung, S., ve Ariyur, K. B., 2011, Robustness for large scale UAV autonomous operations, *2011 IEEE International Systems Conference, SysCon 2011 - Proceedings*, 309–314, DOI:10.1109/SYSCON.2011.5929115
- Karaman, S., ve Frazzoli, E., 2011, Sampling-based algorithms for optimal motion planning, *International Journal of Robotics Research*, 30:7, 846–894, DOI:10.1177/0278364911406761
- Keller, J., Thakur, D., Dobrokhodov, V., Jones, K., Pivtoraiko, M., Gallier, J., ... Kumar, V., 2013, A Computationally Efficient Approach to Trajectory Management for Coordinated Aerial Surveillance, *Unmanned Systems*, 01:01, 59–74, DOI:10.1142/S2301385013500040
- Keller, J., Thakur, D., Likhachev, M., Gallier, J., ve Kumar, V., 2017, Coordinated path planning for fixed-wing UAS conducting persistent surveillance missions, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 14:1, 17–24, DOI:10.1109/TASE.2016.2623642
- Kennedy, J., ve Eberhart, R., 2011, Particle swarm optimization, *Proceedings of ICNN'95 -International Conference on Neural Networks*, 4, 1942–1948, IEEE, DOI:10.1109/ICNN.1995.488968
- Khelifi, M., ve Butun, I., 2022, Swarm Unmanned Aerial Vehicles (SUAVs): A Comprehensive Analysis of Localization, Recent Aspects, and Future Trends, *Journal of Sensors*, 2022, DOI:10.1155/2022/8600674
- Khurshid, J., ve Bing-Rong, H., 2004, Military robots - A glimpse from today and tomorrow, *2004 8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, 1, 771–777, DOI:10.1109/ICARCV.2004.1468925
- Kim, D., Lee, J., ve Yoon, S., 2014, Cloud RRT * : Sampling Cloud based RRT *, *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2519–2526, DOI:10.1109/ICRA.2014.6907211

- Kim, H. C., Kim, J. S., Ji, Y. K., ve Park, J. H., 2013, Path planning of swarm mobile robots using firefly algorithm, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 19:5, 435–441, DOI:10.5302/J.ICROS.2013.13.9008
- Kim, J., Kim, S., Ju, C., ve Son, H. Il, 2019, Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications, *IEEE Access*, 7, 105100–105115, DOI:10.1109/ACCESS.2019.2932119
- Krieger, M. J. B., ve Billeter, J. B., 2000, Call of duty: Self-organized task allocation in a population of up to twelve mobile robots, *Robotics and Autonomous Systems*, 30:1, 65–84, DOI:10.1016/S0921-8890(99)00065-2
- Kuriki, Y., ve Namerikawa, T., 2014, Consensus-based cooperative formation control with collision avoidance for a multi-UAV system, *Proceedings of the American Control Conference*, 2077–2082, DOI:10.1109/ACC.2014.6858777
- Lanillos, P., Yañez-Zuluaga, J., Ruz, J. J., ve Besada-Portas, E., 2013, A Bayesian approach for constrained multi-agent minimum time search in uncertain dynamic domains, *GECCO 2013 - Proceedings of the 2013 Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 391–398, DOI:10.1145/2463372.2463417
- Lee, J. H., Ahn, C. W., ve An, J., 2013, A honey bee swarm-inspired cooperation algorithm for foraging swarm robots: An empirical analysis, *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: Mechatronics for Human Wellbeing, AIM 2013*, 489–493, DOI:10.1109/AIM.2013.6584139
- Lei, B., Chen, H., Zeng, L., ve Gao, Q., 2015, Consensus algorithm with input constraints for swarm robots formation control, *ICNSC 2015 - 2015 IEEE 12th International Conference on Networking, Sensing and Control*, 157–162, DOI:10.1109/ICNSC.2015.7116027
- Lei, B., ve Zeng, L. C., 2011, Consensus algorithm for swarm robotics cooperative control, *Advanced Materials Research*, 201–203, 1854–1857, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.201-203.1854
- Leutenegger, S., Hürzeler, C., Stowers, A. K., Alexis, K., Achtelik, M. W., Lentink, D., ... Siegwart, R., 2016, Flying Robots, *Springer Handbooks*, 623–670, DOI:10.1007/978-3-319-32552-1_26
- Li, J., Ye, D. H., Chung, T., Kolsch, M., Wachs, J., ve Bouman, C., 2016, Multi-target detection and tracking from a single camera in unmanned aerial vehicles (UAVs), *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4992–4997, DOI:10.1109/IROS.2016.7759733
- Li, N., Ho, C. P., Xue, J., Lim, L. W., Chen, G., Fu, Y. H., ve Lee, L. Y. T., 2022, A Progress Review on Solid-State LiDAR and Nanophotonics-Based LiDAR Sensors, *Laser and Photonics Reviews*, 16:11, 1–24, DOI:10.1002/lpor.202100511
- Li, X., Zhao, Y., Zhang, J., ve Dong, Y., 2016, A Hybrid PSO Algorithm Based Flight Path Optimization for Multiple Agricultural UAVs, *2016 IEEE 28th International*

- Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, 691–697, IEEE, DOI:10.1109/ICTAI.2016.0110
- Li, Y., Wei, W., Gao, Y., Wang, D., ve Fan, Z., 2020, PQ-RRT *: An improved path planning algorithm for mobile robots, *Expert Systems With Applications*, 152, 113425, DOI:10.1016/j.eswa.2020.113425
- Li, Z., Wen, G., Duan, Z., ve Ren, W., 2015, Designing Fully Distributed Consensus Protocols for Linear Multi-Agent Systems with Directed Graphs, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 60:4, 1152–1157, DOI:10.1109/TAC.2014.2350391
- Lin, S., Liu, A., Wang, J., ve Kong, X., 2022, A Review of Path-Planning Approaches for Multiple Mobile Robots, *Machines*, 10:9, 1–27, DOI:10.3390/machines10090773
- Lionis, G., ve Kyriakopoulos, K. J., 2009, Decentralized lattice formation control for micro robotic swarms, *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009*, 3756–3761, DOI:10.1109/IROS.2009.5354453
- Liu, C., Xie, W., Zhang, P., Guo, Q., ve Ding, D., 2019, Multi-UAVs cooperative coverage reconnaissance with neural network and genetic algorithm, *ACM International Conference Proceeding Series*, 81–86, DOI:10.1145/3341069.3342968
- Liu, Haishi, Chen, Q., Pan, N., Sun, Y., An, Y., ve Pan, D., 2022, UAV Stocktaking Task-Planning for Industrial Warehouses Based on the Improved Hybrid Differential Evolution Algorithm, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18:1, 582–591, DOI:10.1109/TII.2021.3054172
- Liu, Huahua, Liu, H. H. T., Chi, C., Zhai, Y., ve Zhan, X., 2020, Navigation information augmented artificial potential field algorithm for collision avoidance in UAV formation flight, *Aerospace Systems*, 3:3, 229–241, DOI:10.1007/s42401-020-00059-6
- Liu, L., Liang, X., Zhu, C., ve He, L., 2018, Distributed cooperative control for UAV swarm formation reconfiguration based on consensus theory, *2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering, ICRAE 2017*, 264–268, DOI:10.1109/ICRAE.2017.8291392
- Liu, Yang, ve Lee, K., 2020, Probabilistic consensus decision making algorithm for artificial swarm of primitive robots, *SN Applied Sciences*, 2:1, DOI:10.1007/S42452-019-1845-X
- Liu, Yuyi, Montenbruck, J. M., Zelazo, D., Odelga, M., Rajappa, S., Bulthoff, H. H., ... Zell, A., 2018, A Distributed Control Approach to Formation Balancing and Maneuvering of Multiple Multirotor UAVs, *IEEE Transactions on Robotics*, 34:4, 870–882, DOI:10.1109/TRO.2018.2853606
- Lizzio, F. F., Capello, E., ve Guglieri, G., 2021, A Review of Consensus-based Multi-agent UAV Applications, *2021 International Conference on Unmanned Aircraft*

- Systems, ICUAS 2021*, 1548–1557, DOI:10.1109/ICUAS51884.2021.9476858
- Lizzio, F. F., Capello, E., ve Guglieri, G., 2022a, A Review of Consensus-based Multi-agent UAV Implementations, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 106:2, DOI:10.1007/s10846-022-01743-9
- Lizzio, F. F., Capello, E., ve Guglieri, G., 2022b, Implementation and Performance Evaluation of a Consensus Protocol for Multi-UAV Formation with Communication Delay, *2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2022*, 1592–1600, DOI:10.1109/ICUAS54217.2022.9836201
- Loianno, G., Thomas, J., ve Kumar, V., 2015, Cooperative localization and mapping of MAVs using RGB-D sensors, *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 4021–4028, IEEE, DOI:10.1109/ICRA.2015.7139761
- Lu, Q., Hecker, J. P., ve Moses, M. E., 2018, Multiple-place swarm foraging with dynamic depots, *Autonomous Robots*, 42:4, 909–926, DOI:10.1007/s10514-017-9693-2
- Ludwig, L., ve Gini, M., 2006, Robotic swarm dispersion using wireless intensity signals, *Distributed Autonomous Robotic Systems 7*, 135–144, DOI:10.1007/4-431-35881-1_14
- Ma'Sum, M. A., Jati, G., Arrofi, M. K., Wibowo, A., Mursanto, P., ve Jatmiko, W., 2013, Autonomous quadcopter swarm robots for object localization and tracking, *2013 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, MHS 2013*, 1–6, DOI:10.1109/MHS.2013.6710447
- Maruyama, S., ve Tatsukawa, T., 2017, A parametric study of crossover operators in Pareto-based multiobjective evolutionary algorithm, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10386 LNCS, 3–14, DOI:10.1007/978-3-319-61833-3_1
- Math, M., ve Bayır, R., 2020, Dört Mekanum Tekerli Mobil Robot Platformunun Geliştirilmesi ve Güvenlik Amacıyla Kullanımı, *European Journal of Science and Technology*, 416–425, DOI:10.31590/ejosat.780670
- Meng, Z., Zou, B., ve Zeng, Y., 2012, Considering direct interaction of artificial ant colony foraging simulation and animation, *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 24:1, 95–107, DOI:10.1080/0952813X.2010.545999
- Michael, N., Stump, E., ve Mohta, K., 2011, Persistent Surveillance with a Team of MAVs, *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2708–2714, DOI:10.1109/IROS.2011.6095174
- Milde, M., 2008, *International air law and ICAO*, Eleven International Publishing, Utrecht, Netherlands
- Ming, R., Jiang, R., Luo, H., Lai, T., Guo, E., ve Zhou, Z., 2023, Comparative Analysis of Different UAV Swarm Control Methods on Unmanned Farms, *Agronomy*, 13:10,

DOI:10.3390/agronomy13102499

- Mohan, Y., ve Ponnambalam, S. G., 2009, An extensive review of research in swarm robotics, *2009 World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, NABIC 2009 - Proceedings*, 140–145, DOI:10.1109/NABIC.2009.5393617
- Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Li, Y., Alsharif, M. H., ve Khan, M. A., 2023, Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends, *Intelligent Service Robotics*, 16:1, 109–137, DOI:10.1007/S11370-022-00452-4
- Moon, J., Papaioannou, S., Laoudias, C., Kolios, P., ve Kim, S., 2021, Deep Reinforcement Learning Multi-UAV Trajectory Control for Target Tracking, *IEEE Internet of Things Journal*, 8:20, 15441–15455, DOI:10.1109/JIOT.2021.3073973
- Mukherjee, S., ve Namuduri, K., 2019, Formation Control of UAVs for Connectivity Maintenance and Collision Avoidance, *Proceedings of the IEEE National Aerospace Electronics Conference, NAECON*, 126–130, DOI:10.1109/NAECON46414.2019.9058089
- Muslimov, T. Z., ve Munasypov, R. A., 2021, Consensus-based cooperative control of parallel fixed-wing UAV formations via adaptive backstepping, *Aerospace Science and Technology*, 109, 106416, DOI:10.1016/j.ast.2020.106416
- Najarian, S., Fallahnezhad, M., ve Afshari, E., 2011, Advances in medical robotic systems with specific applications in surgery—a review, *Journal of Medical Engineering & Technology*, 35:1, 19–33, DOI:10.3109/03091902.2010.535593
- Nedjah, N., De Mendonça, R. M., ve De Macedo Mourelle, L., 2015, Pso-based distributed algorithm for dynamic task allocation in a robotic swarm, *Procedia Computer Science*, 51:1, 326–335, DOI:10.1016/j.procs.2015.05.250
- Nedjah, N., ve Junior, L. S., 2019, Review of methodologies and tasks in swarm robotics towards standardization, *Swarm and Evolutionary Computation*, 50, 100565, DOI:10.1016/j.swevo.2019.100565
- Nguyen, H. T., Nguyen, T. D., Garratt, M., Kasmarik, K., Anavatti, S., Barlow, M., ve Abbass, H. A., 2019, A deep hierarchical reinforcement learner for aerial herding of ground swarms, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11953 LNCS, 658–669, DOI:10.1007/978-3-030-36708-4_54
- Nguyen, T., Nguyen, H., Debie, E., Kasmarik, K., Garratt, M., ve Abbass, H., 2018, Swarm Q-Learning with Knowledge Sharing Within Environments for Formation Control, *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, DOI:10.1109/IJCNN.2018.8489674
- Nieto-Granda, C., Rogers, J. G., ve Christensen, H. I., 2014, Coordination strategies for multi-robot exploration and mapping, *The International Journal of Robotics Research*, 33:4, 519–533, DOI:10.1177/0278364913515309

- Nigam, N., Bieniawski, S., Kroo, I., ve Vian, J., 2012, Control of multiple UAVs for persistent surveillance: Algorithm and flight test results, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20:5, 1236–1251, DOI:10.1109/TCST.2011.2167331
- Nigam, N., ve Kroo, I., 2008, Persistent surveillance using multiple unmanned air vehicles, *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 1–14), IEEE, DOI:10.1109/AERO.2008.4526242
- Ouyang, Q., Wu, Z., Cong, Y., ve Wang, Z., 2023, Formation control of unmanned aerial vehicle swarms: A comprehensive review, *Asian Journal of Control*, 25:1, 570–593, DOI:10.1002/asjc.2806
- Pan, Z., Xia, Y., Sun, Z., ve Yu, T., 2023, Multilayer self-organized aggregation control for large-scale unmanned aerial vehicle swarms, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 33:10, 5420–5436, DOI:10.1002/RNC.6654
- Peccoud, S., Xing, S., Yang, T., ve Stansbury, R. S., 2024, Behavior-Based Communication-Aware Formation Control in Dynamic Multi-Agent Systems for Jamming Detection and Avoidance, *Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON*, 552–558, DOI:10.1109/SOUTHEASTCON52093.2024.10500200
- Pedersen, S. M., Fountas, S., Have, H., ve Blackmore, B. S., 2006, Agricultural robots - System analysis and economic feasibility, *Precision Agriculture*, 7:4, 295–308, DOI:10.1007/S11119-006-9014-9/TABLES/3
- Perez-Carabaza, S., Besada-Portas, E., Lopez-Orozco, J. A., ve de la Cruz, J. M., 2018, Ant colony optimization for multi-UAV minimum time search in uncertain domains, *Applied Soft Computing Journal*, 62, 789–806, DOI:10.1016/j.asoc.2017.09.009
- Petit, J., 2016, Distributed Consensus-based Formation Control of Quadrotors with Formation Feedback, Bachelor thesis
- Phung, M. D., ve Ha, Q. P., 2020, Motion-encoded particle swarm optimization for moving target search using UAVs, *Applied Soft Computing*, 97, 106705, DOI:10.1016/j.asoc.2020.106705
- Prisacariu, V., 2017, The History And The Evolution Of Uavs From The Beginning Till The 70s, *Journal of Defense Resources Management (JoDRM)*, 8:1, 181–189,
- Qi, J., ve Guan, Y., 2023, Practical Byzantine fault tolerance consensus based on comprehensive reputation, *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 16:1, 420–430, DOI:10.1007/S12083-022-01408-2/TABLES/1
- Qin, T., Li, P., ve Shen, S., 2018, Relocalization , Global Optimization and Map Merging for Monocular Visual-Inertial SLAM, *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1197–1204, DOI:10.1109/ICRA.2018.8460780
- Rahman, M. S., 2017, Basic Graph Terminologies, *Springer, Cham*, 11–29,

DOI:10.1007/978-3-319-49475-3_2

- Ren, W., 2006, Consensus based formation control strategies for multi-vehicle systems, *Proceedings of the American Control Conference*, 2006, 4237–4242, DOI:10.1109/ACC.2006.1657384
- Ren, W., ve Beard, R. W., 2008, Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control, *Springer London*, London, DOI:10.1007/978-1-84800-015-5
- Rojó-Rodríguez, E. G., García, O., Ollervides, E. J., Zambrano-Robledo, P., ve Espinoza-Quesada, E. S., 2019, Robust Consensus-Based Formation Flight for Multiple Quadrotors, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 93:1–2, 213–226, DOI:10.1007/s10846-018-0843-3
- Roldán-Gómez, J. J., García-Aunon, P., Mazariegos, P., ve Barrientos, A., 2022, SwarmCity project: monitoring traffic, pedestrians, climate, and pollution with an aerial robotic swarm: Data collection and fusion in a smart city, and its representation using virtual reality, *Personal and Ubiquitous Computing*, 26:4, 1151–1167, DOI:10.1007/s00779-020-01379-2
- Rubio, F., Valero, F., ve Llopis-Albert, C., 2019, A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16:2, 1–22, DOI:10.1177/1729881419839596
- Sabancı, K., ve Balci, S., 2020, Development of an expression for the output voltage ripple of the DC-DC boost converter circuits by using particle swarm optimization algorithm, *Measurement*, 158, 107694, DOI:10.1016/J.MEASUREMENT.2020.107694
- Saeedi, S., Trentini, M., Seto, M., ve Li, H., 2016, Multiple-Robot Simultaneous Localization and Mapping: A Review, *Journal of Field Robotics*, 33:1, 3–46, DOI:10.1002/ROB.21620
- Sallam, G., ve Baroudi, U., 2015, COVER: A Cooperative Virtual Force Robot Deployment Technique, *2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing* içinde (ss. 1308–1315). IEEE, DOI:10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.194
- Sallam, G., Baroudi, U., ve Al-Shaboti, M., 2016, Multi-Robot Deployment Using a Virtual Force Approach: Challenges and Guidelines, *Electronics*, 5:3, 34, DOI:10.3390/ELECTRONICS5030034
- Sampedro, C., Bavle, H., Sanchez-Lopez, J. L., Fernandez, R. A. S., Rodriguez-Ramos, A., Molina, M., ve Campoy, P., 2016, A flexible and dynamic mission planning architecture for UAV swarm coordination, *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2016*, 355–363, DOI:10.1109/ICUAS.2016.7502669

- Sang, H., You, Y., Sun, X., Zhou, Y., ve Liu, F., 2021, The hybrid path planning algorithm based on improved A* and artificial potential field for unmanned surface vehicle formations, *Ocean Engineering*, 223, 108709, DOI:10.1016/j.oceaneng.2021.108709
- Sathyan, A., Ernest, N. D., ve Cohen, K., 2016, An Efficient Genetic Fuzzy Approach to UAV Swarm Routing, *Unmanned Systems*, 4:2, 117–127, DOI:10.1142/S2301385016500011
- Schmuck, P., 2017, Multi-UAV collaborative monocular SLAM, *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3863–3870, IEEE, DOI:10.1109/ICRA.2017.7989445
- Schwager, M., Dames, P., Rus, D., ve Kumar, V., 2017, A multi-robot control policy for information gathering in the presence of unknown hazards, *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 100, 455–472, DOI:10.1007/978-3-319-29363-9_26
- Seiler, P., Pant, A., ve Hedrick, J. K., 2003, A Systems Interpretation for Observations of Bird V-formations, *Journal of Theoretical Biology*, 221:2, 279–287, DOI:10.1006/JTBI.2003.3191
- Sharma, Y., ve Sisodia, S., 2014, Temperature Prediction Based on Fuzzy Time Series and MTPSO with Automatic Clustering Algorithm, *Proceedings - 2014 2nd International Symposium on Computational and Business Intelligence, ISCBI 2014*, 101–105, DOI:10.1109/ISCBI.2014.29
- Silva, L., ve Nedjah, N., 2015, Wave algorithm for recruitment in swarm robotics, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9156, 3–13, DOI:10.1007/978-3-319-21407-8_1
- Song, Y., Fang, X., Liu, B., Li, C., Li, Y., ve Yang, S. X., 2020, A novel foraging algorithm for swarm robotics based on virtual pheromones and neural network, *Applied Soft Computing Journal*, 90, 106156, DOI:10.1016/j.asoc.2020.106156
- Soysal, O., ve Şahin, E., 2005, Probabilistic aggregation strategies in swarm robotic systems, *Proceedings - 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium, SIS 2005*, 325–332, DOI:10.1109/SIS.2005.1501639
- Sriman, B., Ganesh Kumar, S., ve Shamili, P., 2021, Blockchain Technology: Consensus Protocol Proof of Work and Proof of Stake, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1172, 395–406, DOI:10.1007/978-981-15-5566-4_34
- Sujit, P., George, J., ve Beard, R., 2008, Multiple UAV Task Allocation Using Particle Swarm Optimization, *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, DOI:10.2514/6.2008-6837
- Tahir, A., Böling, J., Haghbayan, M. H., Toivonen, H. T., ve Plosila, J., 2019, Swarms of Unmanned Aerial Vehicles — A Survey, *Journal of Industrial Information*

- Integration*, 16, 100106, DOI:10.1016/j.jii.2019.100106
- Taylor, J. W. R., ve Munson, K., 1977, *Jane's pocket book of remotely piloted vehicles: robot aircraft today*. Collier Books
- Tokekar, P., Hook, J. Vander,Mulla, D., ve Isler, V., 2016, Sensor Planning for a Symbiotic UAV and UGV System for Precision Agriculture, *IEEE Transactions on Robotics*, 32:6, 1498–1511, DOI:10.1109/TRO.2016.2603528
- Ugur, E., Turgut, A. E., ve Şahin, E., 2007, Dispersion of a swarm of robots based on realistic wireless intensity signals, *22nd International Symposium on Computer and Information Sciences, ISCIS 2007 - Proceedings*, 419–424, DOI:10.1109/ISCIS.2007.4456899
- Vergouw, B., Nagel, H., Bondt, G., ve Custers, B., 2016, Drone Technology: Types, Payloads, Applications, Frequency Spectrum Issues and Future Developments, *The future of drone use: Opportunities and threats from ethical and legal perspectives*, 21–45, DOI:10.1007/978-94-6265-132-6_2
- Wang, J., Chi, W., Li, C., Wang, C., ve Meng, M. Q., 2020, Neural RRT *: Learning-Based Optimal Path Planning, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17:4, 1748–1758, DOI:10.1109/TASE.2020.2976560
- Wang, T., Zhao, S., Xia, Y., Pan, Z., ve Tian, H., 2022, Consensus Control of Large-Scale UAV Swarm Based on Multi-Layer Graph, *Drones*, 6:12, 1–11, DOI:10.3390/drones6120402
- Wang, X., Quan, A., Hu, C., ve Bi, Y., 2023, Research on azimuth-only passive location technology of UAV carrying formation based on Newton iterative algorithm, *2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms, EEBDA 2023*, 1514–1517, DOI:10.1109/EEBDA56825.2023.10090532
- Wang, Y., Liang, A., ve Guan, H., 2011, Frontier-based multi-robot map exploration using Particle Swarm Optimization, *2011 IEEE Symposium on Swarm Intelligence*, 1–6), IEEE, DOI:10.1109/SIS.2011.5952584
- Wong, C., Yang, E., Yan, X. T., ve Gu, D., 2017, An overview of robotics and autonomous systems for harsh environments, *ICAC 2017 - 2017 23rd IEEE International Conference on Automation and Computing: Addressing Global Challenges through Automation and Computing*, 1–6, IEEE, DOI:10.23919/IConAC.2017.8082020
- Wu, Y., Gou, J., Hu, X., ve Huang, Y., 2020, A new consensus theory-based method for formation control and obstacle avoidance of UAVs, *Aerospace Science and Technology*, 107, DOI:10.1016/j.ast.2020.106332
- Xiaoning, Z., 2020, Analysis of military application of UAV swarm technology, *Proceedings of 2020 3rd International Conference on Unmanned Systems, ICUS 2020*, 1200–1204, DOI:10.1109/ICUS50048.2020.9274974

- Xu, Z., Deng, D., ve Shimada, K., 2021, Autonomous UAV Exploration of Dynamic Environments via Incremental Sampling and Probabilistic Roadmap, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6:2, 2729–2736, DOI:10.1109/LRA.2021.3062008
- Yamashita, M., ve Suzuki, I., 2010, Characterizing geometric patterns formable by oblivious anonymous mobile robots, *Theoretical Computer Science*, 411:26–28, 2433–2453, DOI:10.1016/J.TCS.2010.01.037
- Yan, Z., Han, L., Li, X., Dong, X., Li, Q., ve Ren, Z., 2023, Event-Triggered formation control for time-delayed discrete-Time multi-Agent system applied to multi-UAV formation flying, *Journal of the Franklin Institute*, 360:5, 3677–3699, DOI:10.1016/J.JFRANKLIN.2023.01.036
- Yang, T., Wan, Y., Wang, H., ve Lin, Z., 2018, Global optimal consensus for discrete-time multi-agent systems with bounded controls, *Automatica*, 97, 182–185, DOI:10.1016/j.automatica.2018.08.017
- Yardımcı, G., 2019, İnsansız Hava Araçlarına Türk Mevzuatından Bir Bakış, *Journal of Aviation*, 3:1, 61–80, DOI:10.30518/jav.555568
- Yildiz, B., Durdu, A., ve Kayabaşı, A., 2024, Consensus-based virtual leader tracking algorithm for flight formation control of swarm UAVs, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 32:2, 251–267, DOI:10.55730/1300-0632.4067
- Yildiz, B., Durdu, A., Kayabasi, A., ve Duramaz, M., 2022, CNN based sensor fusion method for real-time autonomous robotics systems, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 30:1, 79–93, DOI:10.3906/elk-2008-147
- Yogeswaran, M., ve Ponnambalam, S., 2010, Swarm robotics: An extensive research review, *Advanced Knowledge Application in Practice*, Petaling Jaya, Selangor, Malaysia
- Yusup, N., Zain, A. M., ve Hashim, S. Z. M., 2012, Overview of PSO for Optimizing Process Parameters of Machining, *Procedia Engineering*, 29, 914–923, DOI:10.1016/J.PROENG.2012.01.064
- Zavlanos, M. M., Spesivtsev, L., ve Pappas, G. J., 2008, A distributed auction algorithm for the assignment problem, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 1212–1217, DOI:10.1109/CDC.2008.4739098
- Zedadra, O., Jouandeau, N., Seridi, H., ve Fortino, G., 2017, Multi-Agent Foraging: state-of-the-art and research challenges, *Complex Adaptive Systems Modeling*, 5:1, 3, DOI:10.1186/s40294-016-0041-8
- Zhang, J., ve Xing, J., 2020, Cooperative task assignment of multi-UAV system, *Chinese Journal of Aeronautics*, 33:11, 2825–2827, DOI:10.1016/j.cja.2020.02.009
- Zhang, Y., Zhang, B., Yi, X., ve Zhang, J., 2019, Transmitter-Selection Aided Adaptive

- Consensus-Based Data Sharing for UAV Swarms, *IEEE Access*, 7, 182217–182224, DOI:10.1109/ACCESS.2019.2959397
- Zhou, L., Leng, S., Liu, Q., ve Wang, Q., 2022, Intelligent UAV Swarm Cooperation for Multiple Targets Tracking, *IEEE Internet of Things Journal*, 9:1, 743–754, DOI:10.1109/JIOT.2021.3085673
- Zhou, Z., Luo, D., Shao, J., Xu, Y., ve You, Y., 2020, Immune genetic algorithm based multi-UAV cooperative target search with event-triggered mechanism, *Physical Communication*, 41, 101103, DOI:10.1016/j.phycom.2020.101103
- Zohdi, T. I., 2018, Multiple UAVs for Mapping: A review of basic modeling, simulation, and applications, *Annual Review of Environment and Resources*, 43, 523–543, DOI:10.1146/annurev-environ-102017-025912

