

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



KARINCA SİSTEMİNE DAYALI GELİŞTİRİLEN BİR
KONTROL ALGORİTMASININ, STİGMERJİ TABANLI
ÇOKLU ROBOT SİSTEMİ İLE BİRLİKTE ENKAZ ARAMA
PROBLEMİNE UYGULANMASI

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZEYNEP KARABULUT

TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. Mehmet Dinçer ERBAŞ

BOLU, TEMMUZ 2025

KABUL VE ONAY SAYFASI

Zeynep KARABULUT tarafından hazırlanan “**KARINCA SİSTEMİNE DAYALI GELİŞTİRİLEN BİR KONTROL ALGORİTMASININ, STİGMERJİ TABANLI ÇOKLU ROBOT SİSTEMİ İLE BİRLİKTE ENKAZ ARAMA PROBLEMİNE UYGULANMASI**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı Bilgisayar Mühendisliği Programında Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir. 25/07/2025

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Doç. Dr. Mehmet Dinçer ERBAŞ
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Doç. Dr. Ferhat DEMİRAY
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Uras PANAHI
Mudanya Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu ve Şablonuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir
- aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

.....

ZEYNEP KARABULUT

ÖZET

**KARINCA SİSTEMİNE DAYALI GELİŞTİRİLEN BİR KONTROL
ALGORİTMASININ, STİGMERJİ TABANLI ÇOKLU ROBOT SİSTEMİ
İLE BİRLİKTE ENKAZ ARAMA PROBLEMİNE UYGULANMASI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ZEYNEP KARABULUT
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. MEHMET DİNÇER ERBAŞ)**

BOLU, TEMMUZ - 2025

X + 44 sayfa

Bu tez çalışmasında enkaz arama problemi için bir alternatif kontrol algoritması önerilmiştir. Bu kontrol algoritması, klasik karınca sistemi algoritmasına ses yüksekliği ve robot sayısı bilgisinin eklenmesi ile oluşturulmuştur. Klasik karınca sistemi global bilgiyi kullanırken, geliştirilen algoritma sadece yerel feromon bilgisini kullanır. Ayrıca geliştirilen algoritmada robotlar arası direkt haberleşme mevcut değildir. Tezin giriş bölümünde, teleoperasyon mimarisi, stigmerji kavramı, bazı sürü algoritmaları, karınca kolonisi algoritması ve feromon kavramları üzerine geniş bir literatür araştırması ele alınmıştır. İkinci bölüm, karınca sistemine bağlı geliştirilen kontrol algoritmasının genel yapısını ve yalancı kodları içerir. Üçüncü bölümde, geliştirilen algoritmanın ve rastgele hareketin test edildiği bazı senaryolar yer almaktadır. Dördüncü bölüm, bu senaryolar için elde edilen deneysel bulgular ve tartışmaları içerir. Son bölüm ise tezin genel motivasyonu, literatüre sağladığı katkı ve gelecekte yapılması düşünülen problemler çerçevesinde ele alınmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Stigmerji, Sürü robotları, Karınca sistemine dayalı geliştirilen bir kontrol algoritması, Feromon

ABSTRACT

**APPLICATION OF A CONTROL ALGORITHM DEVELOPED BASED
ON THE ANT SYSTEM TO THE DEBRIS SEARCH PROBLEM
TOGETHER WITH STIGMERGY BASED MULTI-ROBOT SYSTEM
MASTER THESIS
ZEYNEP KARABULUT
BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
DEPARTMENT OF COMPUTER ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. MEHMET DİNÇER ERBAŞ)**

BOLU, JULY 2025

X + 44 pages

In this thesis, an alternative control algorithm is proposed for debris search problem. This control algorithm is developed by adding sound intensity and robot count information to classical ant system. Ant system is used global information, but developed algorithm is used only local pheromone information. Furthermore, developed algorithm has not included direct communication between robots. A comprehensive literature review is presented in introduction part which includes teleoperation architecture, stigmergy concept, some swarm algorithms, ant colony algorithm and pheromone. A general structure of developed control algorithm and some pseudocodes are given at second part. The third section presents several scenarios in which the developed algorithm and the random walk are tested. The fourth section includes the experimental findings and discussions obtained from these scenarios. The final section is dealt with general motivation of thesis, its contribution to the literature and problems considered for future works.

KEYWORDS: Stigmergy, Swarm robots, A control algorithm developed based on the ant system, Pheromone

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
TABLO LİSTESİ	viii
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	ix
TEŞEKKÜR	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Genel Literatür Araştırması	2
1.2 Teleoperasyon Yapısı	4
1.3 Bazı Sürü Algoritmaları ve Stigmerji Mekanizması	7
1.3.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Algoritması	8
1.3.2 Stigmerji	11
1.3.3 Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) Algoritması	12
1.3.4 Karınca Sistemi Algoritması	14
1.3.5 Feromon.....	19
2. MATERYAL ve YÖNTEM.....	22
2.1 Geliştirilen Kontrol Algoritması.....	22
3. BULGULAR	28
3.1 Ortalama Hedef Bulma Sayıları Üzerine Bir Karşılaştırma	28
3.2 En İyi Tur Ortalamaları Üzerine Bir Karşılaştırma	30
3.3 Aynı Hedefe Giden Farklı Yolların Bulunması.....	33
4. TARTIŞMA	35
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	38
KAYNAKLAR	40

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Bir arama hücresinin genel yapısı ve doğrultular	23
Şekil 3.1. robotNum=10; targetNum=5; randomStart=0 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak elde edilen hedef bulma sayıları ve %95 güven aralıklarını içerir.	28
Şekil 3.2. robotNum=10; targetNum=5; randomStart=1 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak elde edilen hedef bulma sayıları ve %95 güven aralıklarını içerir.	29
Şekil 3.3. robotNum=20; targetNum=10; randomStart=0 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak elde edilen hedef bulma sayıları ve %95 güven aralıklarını içerir.	29
Şekil 3.4. robotNum=20; targetNum=10; randomStart=1 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak elde edilen hedef bulma sayıları ve %95 güven aralıklarını içerir.	30
Şekil 3.5. robotNum=10; targetNum=5; randomStart=0 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak en kısa yol uzunlukları ve %95 güven aralıklarını içerir.	31
Şekil 3.6. robotNum=10; targetNum=5; randomStart=1 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak en kısa yol uzunlukları ve %95 güven aralıklarını içerir.	31
Şekil 3.7. robotNum=20; targetNum=10; randomStart=0 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak en kısa yol uzunlukları ve %95 güven aralıklarını içerir.	32
Şekil 3.8. robotNum=20; targetNum=10; randomStart=1 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak en kısa yol uzunlukları ve %95 güven aralıklarını içerir.	32
Şekil 3.9. Robotların arenaya dağılma noktası ve hedef noktanın konumu.....	33
Şekil 3.10. Dört numaralı robotun sekiz numaralı hedefe ulaşırken izlediği yol	34
Şekil 3.11. Bir numaralı robotun sekiz numaralı hedefe ulaşırken izlediği yol	34
Şekil 3.12. Dokuz numaralı robotun sekiz numaralı hedefe ulaşırken izlediği yol	34

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Çeşitli afet kavramlarının özet tablosu (Kim ve Sohn, 2018).....	2
Tablo 1.2. Kontrol şemalarını içeren bazı çalışmalar.....	5
Tablo 1.3. Parçacık sürü optimizasyonu tabanlı algoritmaları içeren bazı çalışmalar	8
Tablo 1.4. Karınca kolonisi optimizasyonu tabanlı algoritmaları içeren bazı çalışmalar	15
Tablo 1.5. Feromon kullanımına ait bazı çalışmalar	20
Tablo 2.1. Engel yerleşimi için yalancı kod	24
Tablo 2.2. Hedef yerleşimi için yalancı kod.....	24
Tablo 2.3. Robotların hareketi için yalancı kod	25
Tablo 2.4. Aksiyon seçimi için yalancı kod	25

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

ACO	: Karınca Kolonisi Optimizasyonu
ACS	: Karınca Kolonisi Sistemi
A-RPSO	: Uyarlanabilir Robotik Parçacık Sürü Optimizasyonu
BFO	: Bakteriyel Besin Arama Optimizasyonu
CA	: Hücresel Otomat
CDMACA	: İşbirlikçi oyun ve dinamik yol izlemeye dayalı çoklu karınca koloni algoritması
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CPSO	: Kanonik Parçacık Sürü Optimizasyonu
DAPSO	: Dağıtık Eş Zamansız Parçacık Sürü Optimizasyonu
DFCM	: Dinamik Bulanık Bilişsel Harita
DPSO	: Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu
EPSO	: Genişletilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu
FLC	: Bulanık Mantık Denetleyici
IACO	: Geliştirilmiş Karınca Kolonisi Optimizasyonu
ICMPACO	: Çoklu Popülasyon Birlikte Evrim Karınca Kolonisi Optimizasyonu
INSARAG	: Uluslararası Arama ve Kurtarma Danışma Grubu
İHA	: İnsansız Hava Aracı
MANET	: Mobil Ad-hoc Ağ
MRTA	: Çoklu Robot Görev Dağılımı
OCHA	: Birleşmiş Milletler İnsani Yardım Koordinasyon Ofisi
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
PPSO	: Fiziksel olarak Gömülü Parçacık Sürü Optimizasyonu
PSPLIB	: Proje Çizelgeleme Kütüphanesi
RDPSO	: Robotik Darwinci Parçacık Sürü Optimizasyonu
RFID	: Radyo Frekans ile Tanımlama
RPSO	: Robotik Parçacık Sürü Optimizasyonu
UNISDR	: Birleşmiş Milletler Afet Risk Azaltma Ofisi (UNDRR)
USA	: Amerika Birleşik Devletleri
USAR	: Kentsel Arama ve Kurtarma
WTC	: Dünya Ticaret Merkezi

TEŞEKKÜR

Tez konusunu seçmemde ve çalışmanın her aşamasında akademik bilgisini her zaman paylaşan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Dinçer ERBAŞ' a saygı, teşekkür ve şükranlarımı sunuyorum.

Tez sürecine verdikleri katkılardan dolayı Sayın Doç. Dr. Ferhat DEMİRAY ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Uras PANAHI hocalarımıza teşekkür ederim.

Ayrıca, her zaman yanımda olduklarını hissettiren, varlıklarıyla bana güç veren kıymetli aileme sonsuz minnettarım.



1. GİRİŞ

Afet, “Çeşitli doğa olaylarının sebep olduğu yıkım” olarak tanımlanır (TDK, 2025). Afetler, doğal ve insan kaynaklı olarak oluşabilmektedirler. Doğal veya insan kaynaklı oluşan bu afetler büyük tahribatlara neden olurlar. Deprem, sel, patlamalar gibi durumlardan sonra oluşan alanlar karmaşık bir oluşum gösterirler. Özellikle deprem ve sonrasında oluşan enkaz alanlarında canlı kalan afetzedelere yardım ulaştırmak ve onları kurtarabilmek büyük önem taşır. Bu noktada arama/kurtarma ekiplerinin bölgeye ulaşımı, onların yer aldığı çalışma şartları, afetzedelere ulaşım süresi ve afetzedelere doğru bir şekilde müdahale önem oluşturur. Bu bağlamda arama/kurtarma çalışmalarına robotik ekipman, sistem veya robotların dahil edilmesi, müdahale süresi, çalışma koşulları ve oluşabilecek yıkım ve benzeri durumlar karşısında etkin bir rol oynar. Çalışmalara robotların dahil edilmesinin sağladığı katkılar göz önünde bulundurulduğunda özellikle enkaz altı gibi arama/kurtarma ortamlarında sürü robotiğine olan ihtiyaç artmaktadır. Özellikle otonom sürü robotlarının kullanımı gerek enerji ihtiyacı açısından gerek küçük boyutta ve fazla sayıda olmalarından dolayı eksik kaldıkları noktada yerine getirdikleri görevi diğerlerinin (sistemde kalan robotların) tamamlamaları bakımından sağladıkları katkılardan dolayı pek çok avantaj oluşturur. Bu ise otonom robotların kullanımında sürü algoritmalarını ön plana çıkarır. Otonom sürü robotiğinde kullanılan bir yaklaşım ise stigmerjidir. Bu yaklaşım, doğada sürü davranışı gösteren karınca, termitler gibi canlılarda bulunur. Karıncaların kullandığı stigmerji mekanizmasında feromon maddesi ön plana çıkar. Karıncaların yiyecek arama esnasında yere bıraktıkları feromon maddesi bir tür sürü zekâsı davranışı oluşturur.

Bu bölümün alt başlıklarında verilecek olan literatür göz önüne alındığında enkaz altı gibi arama/kurtarma ortamlarının oluşması durumunda teleoperasyon yöntemi ve doğrudan iletişim kanallarını kullanan sürü optimizasyon tabanlı algoritmalar işlevsel olmayacaktır. Görüntü işlemenin ve robotlar arası veri transferinin zor olduğu bu tür durumlarda kullanılmak üzere tam otonom özgün bir kontrol algoritması bu tez çalışmasında önerilmektedir. Geliştirilen yeni algoritma, klasik karınca sistemi algoritmasına iki yeni terim eklenerek oluşturulmuştur. Bunlar, ses yüksekliği ve komşu hücrelerdeki robot sayısı bilgisi olup, bu terimler

olasılıksal sürece dahil edilmiştir. Enkaz altı arama problemi göz önüne alındığında, tez çalışması literatüre şu açılardan katkı sağlayacaktır:

- Eklenen ses yüksekliği ve komşu arama hücrelerindeki robot sayısı bilgisi ile algoritmanın daha etkin çalışıp çalışmadığı araştırılacaktır.
- Geliştirilen kontrol algoritması ile enkaz alanında yer alan afetzedelere ulaşım için farklı yol haritaları belirlenerek bu noktada arama ve kurtarma ekiplerine farklı haritalama bilgilerinin ulaştırılması amaçlanmaktadır.

1.1 Genel Literatür Araştırması

Afet (İng: Disaster), TDK' ya göre "Çeşitli doğa olaylarının sebep olduğu yıkım" olarak verilmektedir (TDK, 2025). Çeşitli afet kavramlarının yer aldığı bir özet tablosu Kim ve Sohn (2018)'de aşağıdaki gibi verilmiştir (Tablo 1.1.).

Tablo 1.1. Çeşitli afet kavramlarının özet tablosu (Kim ve Sohn, 2018)

Özellik	Afet, doğal olaylar, teknoloji eksiklikleri, terör gibi dış faktörler tarafından tetiklenir.	
	Afet, zarar görmüş toplum veya yerel/eyalet yönetimlerinin kapasite veya kaynak eksiklikleri nedeni ile zararın ulusal veya dış bir yardım olmadan üstesinden gelinemeyen bir durum anlamına gelir.	
Benzersizlik (Özgülük)	Kore	Cumhurbaşkanlığı kararnamesi, ulusal hükümet tarafından mali olarak desteklenebilecek afet büyüklüğünü düzenler.
	USA	Afet, hasarın büyüklüğüne bağlı olarak acil durum ve büyük afet ilanı olarak sınıflandırılır.
	Japonya	Doğal afetlerin neden olduğu felaketler tarihsel olarak kanunda vurgulanmıştır.
	UNISDR	İnsani, fiziksel, ekonomik veya çevresel kayıplar ve etkilerini dikkate alan kapsamlı bir yaklaşım vurgulanır.
	Fritz	Afeti, sosyal sistemin temel fonksiyonlarının bozulması olarak değerlendirir.
	Quarantelli	Afeti, modern toplumun bilgisi dışında olan doğal veya teknolojik tehlikenin neden olduğu şey olarak görür.

Genel olarak afetler iki ana sınıfa ayrılır. Bu sınıflardan birincisi, doğal afetler olup, depremler, volkanlar, kasırgalar, seller ve yangınlar örnek verilebilir.

İkincisi ise insan kaynaklı olanlardır. Savaş, kirlilik, nükleer patlamalar, yangınlar, tehlikeli maddelere maruz kalma, patlamalar ve ulaşım kazaları bu sınıfın örnekleridir. Doğal yollarla veya insan kaynaklı olan afetler büyük tahribatlara neden olabilmektedirler (Zibulewsky, 2001). Oluşan bu afetlerden sonra can kaybını azaltmak için arama/kurtarma çalışmaları gerçekleştirilir. Birleşmiş Milletler İnsani Yardım Koordinasyon Ofisi (OCHA) tarafından 2020 yılında, Uluslararası Arama ve Kurtarma Danışma Grubu (INSARAG) yönergeler kılavuzunda, olası operasyonel arama/kurtarma ortamları ve bu çevrelerde gerçekleştirilecek aktivite türleri tanımlanmıştır (INSARAG, 2020). Tanımlanan önemli operasyonel ortamlardan biri, deprem ve sel gibi doğal afet oluşumları ve patlamalar gibi insan hatası sonucu oluşan binaların yapısal olarak çökmesi durumudur. Bu tür alanlarda canlı kalan afetzedelere ulaşım için ilk 24 saat kritik önem taşır (Stormont, 2005). Bu amaçla enkaz alanında yapılan arama/kurtarma çalışmalarında çoğunlukla insanlardan oluşan arama kurtarma ekipleri ile arama köpekleri kullanılır. Ancak yapısal çöküş sonucu oluşabilecek enkaz alanları, arama çalışanlarının ilgili bölgeye ulaşmasını ve hareketini oldukça zorlaştırır. Yani, enkaz alanı, insanların afetzedelere erişimini engelleyecek karmaşıklıkta olabilir (Ventura ve Lima, 2012). Yine, afet alanlarında, asbest, toz, zehirli gazlar, tehlikeli maddeler, radyasyon ve aşırı sıcaklıkların varlığından dolayı kurtarma görevlilerinin bu alanlara erişimi ve çalışmaları yürütmeleri güçleşir (Casper ve Murphy, 2003; Liu ve Nejat, 2013). Bu tür sebeplerden dolayı koşulların tehlikeli olduğu, insan ve köpeklerin, afetzedeleri aramaya başlayamayacağı kadar karmaşık bir ortamın olduğu bir afetten sonra, arama/kurtarma çalışmalarında robotlara açık bir gereksinim doğar (Ventura ve Lima, 2012). Afetlerden etkilenen insanlara yardım etmek için insan-robot arama/kurtarma çalışmalarını birlikte yürütür. Bundan dolayı, insan hayatını kurtarmak için, çağdaş teknolojiyi (robotlar ve bilişsel sistemleri) arama/kurtarma çalışmalarına dahil etmek büyük önem taşır (Chitikena vd., 2023). Arama/kurtarma çalışmalarına robotları dahil etmenin sağladığı bazı avantajlar mevcuttur. Robotlar, stabil olmayan yapılara girerek, arama/kurtarma görevlileri üzerindeki riski azaltabilirler, erişilemeyen boşluklara ulaşarak müdahale hızını arttırırlar, birden fazla kamera ve sensör birleşimi kullanarak kurtarma ekiplerinin erişiminin olmadığı bölgelere ulaşmalarına yardımcı olurlar. Ayrıca kurtarma görevlilerinin karşılaşılabileceği fiziksel yaralanmalar (kesikler, sıyrıklar, yanıklar ve benzeri), solunum yaralanmaları

(tehlikeli maddeler, duman, toz, karbon monoksit nedeniyle) ve enkaz altı gibi ortamlarda içinde bulundukları durumda oluşabilecek travmatik ve psikolojik durumlar nedeniyle arama/kurtarma çalışmalarına robotların dahil edilmesi önem kazanmaktadır (Liu ve Nejat, 2013). Teknik anlamda arama/kurtarma çalışmalarında ilk robot kullanımı, 11 Eylül 2001'de Dünya Ticaret Merkezi (WTC) kulelerine yapılan saldırılar sonrasında olmuştur (Casper ve Murphy, 2003; Ko ve Lau, 2009). Yaşanan bu olaydan günümüze kadar, farklı boyut, fonksiyon ve iletişim çeşitlerine sahip robot türleri dünya çapında pek çok afette ve arama/kurtarma çalışmalarında kullanılmıştır (Ko ve Lau, 2009). Bu çalışmalardan birinde, afet sonrası ortamlarda (kısmi olarak yıkılmış çevrelerde) afetzede tanımlanması için geliştirilen bir robotik sistem yer alır (Cruz Ulloa vd., 2021). Bu çalışmada, gerçek zamanlı termal görüntüleri yakalamak ve iletmek üzere bir araç olarak dört ayaklı bir robot kullanan bir robotik sisteme yer verilmiştir (Cruz Ulloa vd., 2021). Bir diğer çalışmada ise afetzedelere hızlı müdahale esnasında, etkili ve geniş bir alan araştırması yapmak için, havadan atılan küçük bir sürü arama robotundan oluşan sistem yer almaktadır (Shimizu vd., 2019).

1.2 Teleoperasyon Yapısı

Teleoperasyon, yapısal çökmeler sonucu oluşan enkaz alanlarında arama/kurtarma için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, enkaz altının araştırılması için kullanılan robot, uzaktan bir operatör tarafından kontrol edilir. Robotun üzerinde yer alan kamera ve diğer sensörlerden gelen veriler, operatör tarafından incelenir ve gerekli komutlar, kablosuz bağlantı yolu ile robota iletilir. Teleoperasyon mimarisini, sistemin etkin bir şekilde çalışmasını sağlayan bileşenler ve kontrol algoritmaları oluşturur (Opiyo vd., 2021). Bu mimaride, işletim altyapısı, iletişim altyapısı, operatör bileşenleri, hız, görüş, konum gibi çeşitli sensörler, farklı algoritma türleri ve aktüatörler vardır (Opiyo vd., 2021). Bu bileşenler, robot, iletişim kanalı ve operatör/kullanıcı istasyonu olarak üç ana başlıkta toplanabilir (Opiyo vd., 2021). Robot sistemi, kontrolör/işlemci sistemi, aktüatörler, sensörler, kodlayıcılar ve diğer birçok bileşene sahiptir (Opiyo vd., 2021). İletişim kanalı, operatör ile robot ortamını birbirine bağlayan birincil ortam olduğu için çok önemlidir. Teleoperasyon için internet, fiber optik, radyo dalgaları, kızılötesi ve kablosuz olmak üzere birçok iletişim kanalı kullanılır (Opiyo vd.,

2021). Kullanıcı istasyonu ise, robotun uzaktan çalıştırıldığı alan/arayüzdür (Opiyo vd., 2021).

Enkaz alanı gibi karmaşık ortamlarda, robot teleoperasyon sisteminin sağladığı bazı katkılar vardır. Kaliteli çevre bilgisi edinilmesi bunlardan biridir (Opiyo vd., 2021). Yapısal çökme sonrası enkaz alanlarında arama aktivitesini yöneten operatörler üç boyutlu ortamda görsel geri bildirim yolu ile çalıştıklarında önemli algısal zorluklar yaşarlar (Doroodgar vd., 2014). Bu durumdan dolayı operatörler, toz ve gaz yoğunluğunun yüksek olduğu enkaz alanlarında yönlerini ve dolayısıyla ortam farkındalıklarını kaybederler. Bu sebeple, gerekli komutları alamayan robotlar ise enkaz alanında fiziksel olarak sıkışırlar. Bu durumu çözmek için teleoperasyon ile üretilen özgün yöntemlerde operatör kontrol döngüsünde tutulur ve robotların otonom özellikleri artırılır (Finzi ve Orlandini, 2005). Teleoperasyon ile kontrol amacıyla geliştirilmiş robotlar, insan kontrolüne izin verecek karmaşık yapıda kontrol ve sensör sistemlerini içerir. Ve buna bağlı olarak da bu tür robotların boyutları oldukça büyüktür (De Cubber vd., 2013). Oluşan bu durumdan dolayı ilgili robotların enkaz altındaki hareketleri kısıtlanır. Ayrıca, her biri operatörler tarafından kontrol edilen robotların enkaz altında donanımsal bir zarar görmeleri sonucunda ise arama operasyonları gecikmeye uğrayabilmektedir (Liu ve Nejat, 2013).

Tablo 1.2. Kontrol şemalarını içeren bazı çalışmalar

Referans	Kontrol Türü	Görevi	Simülasyon/Deneysel Ortamlar
(Finzi ve Orlandini, 2005)	Teleoperasyon mod ile otonom mod arasında konumlanan hibrit bir sistem	Harita oluşturma, afetzedenin varlığını tespit etme, görsel gözlem ve görüş sürecini yürütme	Test ortamı NIST sarı arenadır
(Mano vd., 2009)	Teleoperasyon mod ile otonom mod arasında geçiş yapan bir sistem (İng: Treaded control)	Afetzede tespiti	Atlanta, 2007 RoboCupRescue ligi turuncu bölge, Suzhou, 2008
(Tang vd., 2009)	Yarı otonom bir sistem	Nükleer radyasyon veya zararlı kimyasal maddeleri incelemek, ortadan kaldırmak, keşif	Simülasyon ortamı, zeminde dağınık halde bulunan üçgen ve dikdörtgen bloklardan oluşan engeller
(Doroodgar vd., 2014)	Yarı otonom (öğrenme tabanlı) bir sistem	Afetzede tespiti, keşif	Simülasyon ve test için USAR (Kentsel arama ve

Tablo 1.2. (devam). Kontrol şemalarını içeren bazı çalışmalar

			kurtarma) benzeri ortamlar
(Rafael vd., 2022)	Teleoperasyon	Afet sonrası oluşan durumları keşfetmek, kurtarma	Simülasyon ortamı bir afet senaryosu ve temiz bir ortam Test ortamı moloz (İng: rubble) ve hafif dik bir eğim ile engebeli bir arazi
(Wang vd., 2023)	Otonom mod+ Teleoperasyon modu	Birinci robot, çevreyi geniş bir aralıkta keşfetmek, nesneleri tanımak, zor engelleri aşmak, İkinci robot, nesneleri taşımak, tutmak, engelleri temizlemek, Yeraltı bina ortamında arama/kurtarma	Test ortamı laboratuvar ve yeraltı park alanı

Tablo 1.2.'de kontrol şemalarını içeren bazı çalışmalara yer verilmiştir. Sadece teleoperasyon mimarisi kullanılan Rafael ve arkadaşlarının (2022) de yer alan çalışmalarında, TXRob robotu kullanılmıştır (Rafael vd., 2022). Bu robot, afet sonrası oluşan durumların keşfinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır ve düşük maliyetlidir (Rafael vd., 2022). Ayrıca bu robotta, uzaktan kumanda edilebilen, yapay görüş, çevresel gaz tanıma sensörü, gerçek zamanlı veri görüntüleme paneli mevcuttur. Binalara girebilecek boyutta, ray sistemi sayesinde enkaz ve çatlak gibi düzgün olmayan yüzeylerde hareket edebilen bir robottur (Rafael vd., 2022). Yarı otonom mimarinin kullanıldığı Wang ve arkadaşlarının (2023) de yer alan çalışmalarında, yer altı bina ortamında arama/kurtarma için ikili bir robot sistemi önerilmiştir (Wang vd., 2023). Birinci robot, geniş bir aralıkta çevreyi hızlıca keşfetmek, nesneleri tanımak, zor engelleri aşmak ve benzeri görevler için kullanılır. İkinci robot ise, nesneleri taşımak, tutmak, engelleri temizlemek ve benzeri görevleri yerine getirir (Wang vd., 2023). Arama görevinin yerine getirildiği otonom mod ile teleoperasyon mod arasında geçiş yapılan ve her bir modun zayıf noktalarını telafi eden bir çalışma Mano ve arkadaşlarının (2009) da yer alan çalışmalarıdır (Mano vd., 2009). Bu çalışmada afetzedede aramasında kullanılan bir robotik sistem olan KAMUI yer alır. KAMUI, kablosuz iletişimin uygun olmadığı, robotun uzaktan çalışmasının zor olduğu veya görünürlüğün azaldığı durumlarda otonom mod tabanlı arama yapar. Merdiven gibi karmaşık

evrelerde veya kızılötesi kamera bilgilerinin afetzedeyi tespit etmede güvenilir olmadığı durumlarda, operatörün kararı önemli olacağı için teleoperasyon mod tabanlı arama yapması için tasarlanan bir robottur (Mano vd., 2009).

Teleoperasyon yöntemi kullanılarak yönlendirilen robot topluluklarından kaynaklı sorunlara alternatif bir çözüm yöntemi, tam otonom robotların oluşturduğu robot sürüleri kullanılarak arama/kurtarma sistemleri geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmasıdır (Drew, 2021). Yapılan çalışmalarda henüz, enkaz altında kalmış afetzedelerin belirlenmesi konusunda aktif kullanımı belgelenmiş bir çoklu robot sistemi bulunmamakla birlikte, otonom çoklu robot sistemlerinin, teleoperasyonla kontrol edilen tekil robot sistemlerine göre avantajları olduğu gösterilmiştir. Çoklu robot sistemleri, tekil robotlarda oluşabilecek arızalara karşı dayanıklıdır. Bu özellik, arama operasyonunda bazı robotların çalışmayı durdurması durumunda, geriye kalan robotların görevi sürdürmelerini sağlar. Bu durum, enkaz altında çalışan robotların çarpma/düşme/takılma gibi durumları göz önüne alındığında avantaj sağlar. Çoklu robotların kontrol döngüsünde insanın yer almaması, insan hatası/yorulması gibi durumların oluşmasını engeller. İstenildiği anda sisteme yeni robotlar ilave edilebildiği için, geniş enkaz altı alanlarında ölçeklenebilmeleri bir diğer yararlı özelliktir. Ölçeklenebilirlik, etmen sayısının artmasının güvenilirlik, otonomi (özerklik) ve hareket kabiliyeti (mobilité) ile karakterize edilen işlevsellik üzerindeki etkisidir (Drew, 2021). Bu tür sistemlerde, sistemden beklenen kümülatif fayda, sistemde yer alan tekil robotların aksiyonları toplamı ile bulunur. Bu özellik ise, çoklu robot sistemini oluşturan robotların boyut ve enerji gereksinimlerinin düşürülmesine yardım eder. Yukarıdaki açıklamalardan dolayı, çoklu robot sistemlerinin, enkaz altı arama/kurtarma çalışmalarına yüksek katkı sağlayacağı söylenebilir.

1.3 Bazı Sürü Algoritmaları ve Stigmerji Mekanizması

Enkaz altı gibi arama ortamları için geliştirilen çoklu robot sistemleri sürü zekâsı algoritmalarından faydalanır. Sürü zekâsı algoritmalarının güçlü yönleri vardır. Bunlar sırasıyla, daha yüksek ölçeklenebilirliğe olanak tanıyan esnek birey sayısına sahip olmaları, nispeten büyük ölçekli bir arama gerçekleştirme ve çözümleri tek bir arama sürecinde iyileştirmeye olanak tanımaları, kendi aralarında yerel olarak etkileşime giren birkaç bireyin, sonuç olarak karmaşık bir global davranışa yol açmaları, sürünün esas olarak, merkezi kontrol olmadan çalışması ve

işleyişini sürdürebilmesi için hiçbir belirli bireyin vazgeçilmez olmaması şeklindedir (Tang vd., 2021). Buna karşın, sürü zekâsı algoritmalarının sınırlılıkları da vardır. Bunlar ise sırasıyla, popülasyon büyüklüğü, yinleme sıklığı ve şekli gibi faktörlerden etkilenen zaman alıcı süreçler olmaları, merkezi koordinasyon eksikliğinden ötürü durgunluk ve yerel optimuma düşmenin zamanından önce gerçekleşme sorunu ve koordinasyon mekanizmalarının bloke edilmesinin hesaplama sürelerini arttırması şeklindedir (Tang vd., 2021). Son yıllarda yapılan araştırmalarda, sürü zekâsı algoritmaları kullanımı içerisinde birinci sırada parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve ikinci sırada ise karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) yer almaktadır (Tang vd., 2021). Enkaz altı arama için geliştirilen çoklu robot sistemleri konusunda öncül araştırmalarda Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması ve farklı versiyonları kullanılmıştır (Couceiro vd., 2014).

1.3.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Algoritması

Parçacık sürü optimizasyonunun kökenleri, kuş sürüsü, balık sürüsü ve sürü teorisi ile bağlarından dolayı yapay yaşam ve evrimsel hesaplama dayandır (Kennedy ve Eberhart, 1995). Parçacık sürü optimizasyonu, sürü zekâsı fikrinin literatürde temeli olan beş ilkesini sağlar. Bunlar, yakınlık, kalite, çeşitli tepki, istikrar (kararlılık) ve adaptasyon (uyum sağlama) ilkeleridir (Kennedy ve Eberhart, 1995). Bu algoritmaya göre her robot bir parçacığı gösterir. Robotlar, uygunluk değerlerini (İng: fitness function), robot topluluğunun uygunluk değeri ile karşılaştırır ve kendi yer değiştirmelerini, grubun en yüksek uygunluk değerine sahip robota yaklaşacak şekilde güncelleştirir.

Tablo 1.3. Parçacık sürü optimizasyonu tabanlı algoritmaları içeren bazı çalışmalar

Referans	Algoritma	Görev	Simülasyon/Deneysel ortam
(Doctor vd., 2004)	Optimize edilmiş parçacık sürü optimizasyon algoritması	Tek hedef ve çoklu hedef arama	Program ortamında elde edilen, parçacık sürü optimizasyonu için gerekli optimum parametre değerleri yer alır
(Couceiro vd., 2014)	Robotik Darwinci Parçacık Sürü Optimizasyonu (RDPSO)	Arama	MRSim (Multi Robot Simulator) simülatörü kullanılmıştır 14 e-puck robot ve 2 kazazedenin bulunduğu

Tablo 1.3. (devam). Parçacık sürü optimizasyonu tabanlı algoritmaları içeren bazı çalışmalar

	Genişletilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu (EPSO) Fiziksel olarak gömülü Parçacık Sürü Optimizasyonu (PPSO)		bir arenada deney gerçekleştirilmiştir.
(Dadgar vd., 2016)	Parçacık sürü optimizasyon algoritmasının bir genişlemesi- Uyarlanabilir Robotik Parçacık Sürü Optimizasyon (A-RPSO)	Bilinmeyen ortamlarda hedef arama	Simülasyonlar, Robotik Hedef Arama Simülatörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.
(Kumar vd., 2017)	Robotik Parçacık Sürü Optimizasyonu (RPSO) Robotik Darwinci Parçacık Sürü Optimizasyonu (RDPSO)	Arama ve Kurtarma	Simülasyon için Gazebo kullanılmıştır. Görselleştirme için Rviz kullanılmıştır. İki ve dört kazazedinin olduğu iki farklı kurtarma senaryosu için algoritmalar test edilmiştir.
(Cardona ve Calderon, 2019)	Parçacık sürü optimizasyonuna dayalı bir fikir birliği algoritması	Kazazede tespiti ve navigasyon	Simülasyon ortamı Matlab ve VRep' dir.
(Feng vd., 2019)	Parçacık sürü optimizasyonu algoritmasına bir rüzgâr yönü (İng: upwind) terimi eklenerek elde edilen algoritma	İç mekân partikül kaynağının yerini tespit etmek	Bir deney odasının laboratuvar ölçümleri, parçacık konsantrasyonu ve hava ölçümleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak (CFD) simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Matlab ortamına aktarılmıştır.
(Paez vd., 2021)	Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu (DPSO)	Arama kurtarma ortamında afetzede tespiti Çok robotlu bir sistemin navigasyonu	Tüm deneyler Python ile VRep kombinasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1.3., parçacık sürü optimizasyonu ve ona bağlı geliştirilen bazı algoritmaları içerir. Tablo 1.3.'de ifade edilen algoritma ve değiştirilmiş/geliştirilmiş versiyonları, arama ve kurtarma görevleri için kullanılmıştır. Hedef arama görevini içeren araştırmalardan biri olan Doctor ve arkadaşlarının (2004)'de yer alan çalışmalarında, ikinci bir parçacık sürü optimizasyonu için uygun parametrelerin belirlenmesine yönelik bir algoritma geliştirilmiştir (Doctor vd., 2004). Arama görevini içeren çalışmalardan biri olan Couceiro ve arkadaşları (2014)' de, son teknolojiye sahip beş algoritmanın karşılaştırıldığı deneyler yer alır (Couceiro vd., 2014). Ayrıca, bu çalışma parçacık sürü optimizasyon tabanlı geliştirilen üç algoritmayı da kapsar (Couceiro vd., 2014). Arama ve kurtarma görevinin simülasyonunun yer aldığı Kumar ve arkadaşlarının (2017)'de yer alan çalışmalarında, Rviz de bir görselleştirme yapılmıştır (Kumar vd., 2017). Bu ortam, ses/ses yoğunluğu ile afettede tespiti, sıcaklık yoğunluğu haritalaması ile yangın kaynağı tespiti, radyoaktif yoğunluk haritası ile radyoaktif sızıntı kaynaklarının tanımlandığı gerçek dünya problemlerini taklit eden yoğunluk haritaları kullanır (Kumar vd., 2017). Afettede tespiti ve navigasyon görevlerini içeren çalışma ise fikir birliği algoritmasını kullanır (Cardona ve Calderon, 2019). Bu çalışmada, afetzedeler her bir etmen tarafından ayrı ayrı tespit edilir. Ardından, etmenler olası bir afettede varlığı konusunda bir fikir birliği sağladıklarında, bu etmenler bir alt sürü oluşturur ve genel sürüden ayrılırlar. Sürüdeki diğer etmenler, daha fazla afettede tespiti için gezinmeye devam ederler (Cardona ve Calderon, 2019). İç mekân partikül kaynağının yerini tespit etme görevinin yer aldığı Feng ve arkadaşlarının (2019)'da yer alan çalışmalarında, çok robotlu bir koku arama yöntemi önerilmiştir (Feng vd., 2019). Bu çalışmada önerilen algoritma, standart parçacık sürü optimizasyonuna bir rüzgâr yönü (İng: upwind) terimi eklenmesiyle oluşturulmuştur (Feng vd., 2019). Arama kurtarma ortamlarında afettede tespiti ve statik ya da dinamik engellerden çarpışmaktan kaçınılmasında navigasyon için geliştirilen bir algoritma, Paez ve arkadaşlarının (2021)'de yer alan çalışmalarında verilen dağıtık parçacık sürü optimizasyonudur (Paez vd., 2021). Bu algoritmada her bir parçacık sürüsü tek bir robotu temsil eder (Paez vd., 2021). Bu çalışmalardan yola çıkarak, parçacık sürü optimizasyonunun değiştirilmiş/geliştirilmiş versiyonlarının arama/kurtarma amacıyla çoklu robot sistemlerinde kullanılabileceği görülür.

Parçacık sürü optimizasyon algoritması ethernet, radyo ve kablosuz gibi bazı ortamları gerektiren direkt iletişim kanallarına ihtiyaç duyar (Tang vd., 2019). Yöntemin direkt iletişime sahip olması olumsuzluklarından biridir. Bir diğer olumsuzluk ise, global topluluk içerisinde global bilgi alışverişini kullanmasıdır. Bu yöntem ve türevleri, enkaz altı araştırmaları için ele alındığında, ortamda yüksek oranda metal ve benzeri alaşımlar ile beton kütleleri yer alabileceği için kablosuz iletişime dayalı direkt mesajlaşma yöntemleri yeterli dayanıklılığa sahip olmaz. Bu problemi çözmek ve robotlar arası direkt iletişimin neden olduğu yüksek karmaşıklığı azaltmak için, robot topluluğunun alt bölümlere ayrılması ve global bilginin her toplulukta ayrı hesaplanması gibi yöntemler mevcuttur (Kumar vd., 2017). Bu yöntemlerden simülasyon ortamında verimli sonuçlar alındığı ancak direkt iletişim ve global bilgiye olan ihtiyacın hala devam ettiği söylenebilir. Bu ise, parçacık sürü optimizasyon yönteminin gerçek hayatta yer alan fiziksel robot topluluklarının üzerinde, enkaz altı arama/kurtarma çalışmalarında kullanımını güçleştirdiğini gösterir.

1.3.2 Stigmerji

İletişim, robotların, konum bilgilerini, ortam durumlarını ve sensör verilerini diğer robotlar ile paylaşabildiği bir etkileşim şeklidir. Bu sayede, bir tek robot, diğer robotların hedef, niyet ve eylemleri ile ilgili bilgi alabilir (Yan vd., 2013). Açık iletişim, robotlar arasında tek noktaya yayın veya yayın amacı taşıyan mesajlar ile doğrudan bilgi alışverişi kullanımını temsil eden araçlardır. Kapalı iletişim ise, robotun, sistemdeki diğer robotlar hakkında çevre aracılığı ile bilgi alma biçimidir (Yan vd., 2013). Kapalı iletişim, genel olarak karınca ve arıların kolektif davranışlarından esinlenilen yani robotların, ortamdaki diğer robotların kalan bilgilerini toplayarak çevre yolu ile iletişim kurduğu aktif kapalı ve robotların sensörleri aracılığı ile ortam değişikliğini algıladığı pasif kapalı iletişim olmak üzere iki alt sınıfa ayrılır (Yan vd., 2013). Açık iletişim kullanımının sonucunda, robotlar arasında bilgi alışverişinin doğruluğu sağlanabilir ancak robot sayısındaki artış, sistemdeki iletişim yükünü arttırdığı için, sistem performansında düşüşe veya sistemde genel arızalanmaya yol açabilir. Buna karşın, kapalı iletişim kullanımının sonucunda ise, bir robot tarafından elde edilen bilgiler tamamen güvenilir olmamakla birlikte, tüm çoklu robot sistemindeki kararlılık, güvenilirlik ve hata toleransı, açık iletişim kullanımına göre avantaj sağlar (Yan vd., 2013). Robotlar

arasında bilgi alışverişinin sınıflandırılmasında kullanılan bir başka ayrım ise, doğrudan ve dolaylı iletişimidir (Farinelli vd., 2004). Doğrudan iletişim, bazı yerleşik donanım aygıtlarını kullanırken, dolaylı iletişim stigmerjiyi kullanır (Farinelli vd., 2004). Belirtildiği üzere, yapılan sınıflandırmaya göre isimlendirmesi farklılaşmış olsa da, kapalı iletişim veya dolaylı iletişimin, sürü robotları arasında sağladığı avantajlardan dolayı enkaz altı arama/kurtarma sistemlerindeki kullanımı tercih sebebidir.

Dolaylı iletişim mekanizması olan stigmerji (İng: Stigmergy), bazı bireylerin gerçekleştirdiği eylemlerin sonucunda çevrenin aracılık ettiği ve bir başkasının davranışını dolaylı olarak etkileyen bir iletişim şeklidir (Trianni vd., 2004). Buradaki temel prensip, bireylerin çevrelerinde yaptıkları değişikliklerin ve bıraktıkları izlerin, onlara geri bildirimde bulunabilmesidir (Theraulaz ve Bonabeau, 1999). Bu iletişim yöntemini kullanan bireyler, çevrelerinde, topluluğa ait diğer bireylerin algılayabilecekleri değişiklikler yaparlar. Bu değişiklikleri algılayabilen topluluk bireyleri de davranışlarını bu algının etkisiyle şekillendirirler. Yaban arıları, termitler ve karıncalar gibi bazı sosyal canlılar, ilkel kurallardan yararlanarak karmaşık yapılar inşa ederler (Tang vd., 2020). Bu inşa fikrinin arkasında yatan temel fikir de stigmerjidir. Bu dolaylı iletişim modelinde çevre, mesajların iletilmesinde bir aracı görevindedir. Karıncalar ve termitlerin çevreye bıraktıkları mesajlar, bir kimyasal madde olan feromon (İng: Pheromone) izleri biçimindedir (Salman vd., 2020). Toplulukta yer alan diğer bireylerin davranışları, feromonun yükselen ve alçalan yoğunluk değerine bağlı olarak şekillenir. Bu sayede, oldukça basit canlılar olan termitler ve karıncalar, besin alanına üşüşme (İng: foraging), belli bir noktada toplanma (İng: aggregation) ve toplu taşıma (İng: collective transport) gibi kümülatif ve karmaşık davranışlarda bulunurlar.

Stigmerji tabanlı iletişim sistemi, sürü zekâsı alanında geliştirilen algoritmalarından biri olan ve birçok farklı problemde verimli sonuçlar üreten Karınca kolonisi optimizasyonu algoritmasının (İng: ACO) temelini oluşturur (Dorigo vd., 2006).

1.3.3 Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) Algoritması

Karıncalar kolonilerinde stigmerji örnekleri gözlemlenir. Birçok karınca türü, bir besin kaynağına gidip gelme sırasında yere feromon adı verilen bir madde

bırakır (feromon için, bkz. Bölüm 1.3.5, s.19). Diğer karıncalar yere bırakılan bu feromonu algılar ve konsantrasyonun yüksek olduğu yolu tercih eder. Bu yöntem, karıncaların, yiyecekleri yuvalarına etkin bir şekilde taşımalarını sağlar. Karıncaların yiyecek arama davranışını açıklamak için önerilen modelden ilham alarak geliştirilen Karınca kolonisi optimizasyonu, bir dizi yapay karınca kullanarak, ele alınan optimizasyon problemine çözümler üretir. Bu metasezgisel algoritma üç aşamalı olarak tekrarlanır. Her yinelemede, karıncalar tarafından bir dizi çözüm oluşturulur. Daha sonra bu çözümler yerel arama ile iyileştirilir (bu adım isteğe bağlı gerçekleştirilir) ve son olarak feromon güncellenir. Feromon konsantrasyonu algoritmanın olasılıksal olarak yürütülmesine olanak tanır. Çözüm bileşenleri için olasılıksal seçim kuralı farklı karınca kolonisi algoritmaları için değişiklik gösterse de hepsi, gerçek karıncaların davranış modelini temel alan bir bağıntıdan (Dorigo vd., 2006, s.29; bkz. Denklem (1)) faydalanır (Dorigo vd., 2006).

Bir metasezgisel, farklı türdeki problemlere uygulanabilen sezgisel yöntemleri tanımlamak için kullanılan algoritmik kavramlar kümesidir. Bazı metasezgisel algoritma örnekleri olarak, benzetilmiş tavlama, tabu arama, evrimsel hesaplama, yinelemeli yerel arama ve karınca kolonisi optimizasyonu verilebilir (Dorigo ve Stützle, 2004).

Karınca kolonisi optimizasyonu iteratif (yinelemeli) bir algoritmadır. Her yinelemede belirli sayıda yapay karınca sistemde yer alır. Her karınca graf üzerinde, düğümden düğüme hareket ederek bir çözüm oluşturur ve bu esnada ziyaret ettiği bir düğümü bir kere daha ziyaret etmez. Çözüm oluşturma sürecinin her adımında karınca, ziyaret edeceği bir sonraki düğümü, feromon miktarına göre belirlenen olasılıksal bir mekanizmayla seçer. Düğüm i de yer alan karınca, sonraki düğümü, daha önce ziyaret etmedikleri içerisinden olasılıksal olarak seçer. Özel olarak, karınca j düğümünü daha önce ziyaret etmemişse, (i,j) kenarına ait olan feromon miktarı ile orantılı bir olasılıkla seçebilir. Bir iterasyonun sonunda, karıncalar tarafından oluşturulan çözüm kaliteleri göz önüne alınarak feromon güncelleme işlemi gerçekleşir ve sonraki tekrarlar da karıncaların, daha önce oluşturmuş oldukları en iyi çözümlere benzer çözümler üretmeleri sağlanır (Dorigo vd., 2006).

1.3.4 Karınca Sistemi Algoritması

Bu alt bölümde Dorigo ve arkadaşları (1991, 1996, 2006)' da yer alan karınca sistemi algoritmasından kısaca bahsedilecektir (Dorigo vd., 1991, 1996, 2006).

Karınca sistemi algoritması, her iterasyonda sistemdeki tüm karıncaların çözülmesi istenen graf üzerindeki sanal feromon değerlerinin yenilenmesini ve bu sayede aşamalı olarak çözümün oluşturulmasını içerir. Bu mekanizmaya göre, graf üzerinde yer alan i ve j köşeleri arasındaki kenara ait olan feromon τ_{ij} aşağıdaki şekilde sistemdeki tüm karıncalar tarafından yenilenir:

$$\tau_{i,j} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{i,j} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{i,j}^k \quad (1.1)$$

Burada ρ buharlaşma oranı (İng: evaporation rate), m , sistemde bulunan karınca sayısı, $\Delta\tau_{i,j}^k$, k karıncası tarafından (i,j) kenarına salgılanacak feromon miktarı olmak üzere aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\Delta\tau_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & k \text{ karıncası } (i,j) \text{ kenarını ziyaret ettiyse} \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (1.2)$$

Denklem (1.2) de yer alan Q sabit bir değer, L_k ise k karıncası tarafından oluşturulan çözümün uzunluğudur. Denklem (1.2) den görüldüğü üzere, belirtilen algorithmada, grafa ait kenarlar üzerindeki feromon yoğunluğu global olarak hesaplanır. Global olarak hesaplanmasının nedeni denklem (1.2) de yer alan çözüm uzunluğu bilgisidir. Her iterasyonda karıncaların ilerleyeceği yeni kenarlar olasılıksal olarak,

$$P_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{i,j}^\alpha \cdot \eta_{i,j}^\beta}{\sum_{l \in S_k^i} \tau_{i,l}^\alpha \cdot \eta_{i,l}^\beta} & j \in S_k^i \text{ ise} \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (1.3)$$

ile verilir. Denklem (1.3) de yer alan S_k^i , i arama hücresinde geçiş yapılabilecek, henüz k robotu tarafından ziyaret edilmemiş komşu arama hücrelerinin kümesini, $\tau_{i,j}^\alpha$ algılanan feromon miktarını verir. α ve β ise sırasıyla, feromon miktarı ve

buluşsal (İng: heuristic) bilginin görece ağırlıklarını kontrol ederler. Denklem (1.3) de yer alan $\eta_{i,j}$ buluşsal bilgi (İng: heuristic information)

$$\eta_{i,j} = \frac{1}{d_{i,j}} \quad (1.4)$$

ile hesaplanır. Burada $d_{i,j}$, i ve j kenarları arasındaki uzaklık bilgisidir.

Tablo 1.4. Karınca kolonisi optimizasyonu tabanlı algoritmaları içeren bazı çalışmalar

Referans	Algoritma	Görev/Problem/Amaç	Test tipi
(Merkle vd., 2002)	Karınca kolonisi optimizasyonu algoritması (ACO)	Kaynak kısıtlı çizelgeleme problemi	Karşılaştırma problemleri olarak, Proje Çizelgeleme Kütüphanesi'nde (PSPLIB) bulunan bir dizi test örneği kullanılmıştır.
(Yingying vd., 2003)	Karınca algoritması	Bilinmeyen ortamlarda çoklu robot sisteminin iş birliğini dinamik olarak programlamak	Simülasyon ortamında 4 robot kullanılmıştır.
(Ioannidis vd., 2011)	Hücrel otomatlar (Cellular Automata-CA) ve Karınca kolonisi optimizasyonu algoritmasının (ACO) birleşimi: Hücrel Karıncalar	İşbirlikçi bir robot topluluğunda yer alan her bir robot için çarpışmasız yörüngeler oluşturmak	Simülasyon ortamı C# programlama dili ve bir kullanıcı grafik arayüzünden oluşur. Önerilen yöntem için, Webots 3 boyutlu simülatörü kullanılmıştır.
(Turduev vd., 2014)	Karınca kolonisi optimizasyonu algoritması (ACO)	Kimyasal gaz konsantrasyonu haritasını oluşturmak ve yüksek gaz konsantrasyonuna sahip alanları belirlemek	Deneysel laboratuvar ortamında Khepera III ve MiniQ mobil robotları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.
(Krentz vd., 2015)	Değiştirilmiş karınca kolonisi algoritması	Küçük otonom robotlardan oluşan bir robot sürüsü kullanarak ACO' nun küçük ölçekli bir uygulamasına yer vermektedir	Deneysel, SimpleIDE yazılımı ile C dilinde programlanabilen Propeller Activity Bot robotları ile gerçekleştirilmiştir.
(Deng vd., 2019)	Çoklu popülasyon birlikte evrim karınca kolonisi optimizasyonu algoritması (ICMPACO)	Gezgin Satıcı ve Kapı Atama Problemleri	Deneysel Matlab simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1.4. (devam). Karınca kolonisi optimizasyonu tabanlı algoritmaları içeren bazı çalışmalar

(Mendonça vd., 2020)	Robot hareketi ve yönelimi için: bir bulanık mantık denetleyici -FLC- (İng:Fuzzy logic controller), bir dinamik bulanık bilişsel harita -DFCM- (İng: Dynamic fuzzy cognitive map), karınca koloni optimizasyonu metasezgiselinden esinlenilen bir dinamik bulanık bilişsel harita -DFCM-ACO (İng:Dynamic fuzzy cognitive map- Ant colony optimization) kullanılmıştır.	Simüle edilmiş ortamlarda arama görevlerini yerine getirebilen otonom bir çoklu robot sistemi geliştirmektir. Çoklu robot sisteminin üstlendiği üç görev şu şekildedir: statik ve dinamik (diğer robotlar) engelleri tespit etmek ve bunlardan kaçınmak, tüm afetzedeleri bulmak ve kurtarmak, ortamları haritalamaktır	Simülasyon için Matlab kullanılmıştır.
(Zitouni vd., 2020)	Fikir birliği tabanlı demet algoritması ve Karınca koloni sistemini birleştiren dağıtık bir yaklaşım kullanılmıştır. Kullanılan yaklaşım ACS (İng: Ant colony system)-MRTA (İng: Multi robot task allocation) dır	Çoklu görev tahsisi problemi. Maksimum sayıda hayatta kalanı kurtarmak, ilk ve son hayatta kalanları kurtarma arasında geçen süre ve seyahat mesafesini en aza indirmektir	Simülasyon için bir arama ve kurtarma senaryosu kullanılarak, Java programlama dili ve JADE çoklu etmen çerçevesinden yararlanılmıştır.
(Husain vd., 2022)	Karınca algoritmasının üç farklı biçimi kullanılmıştır. Ters karınca algoritması -iAA (İng: inverted Ant Algorithm), işaret başlatmalı ters karınca algoritması -iAA-B (İng: inverted-AA with beacon initialization), algılama aralığı artırılmış ters karınca algoritması -iAA-R (İng: inverted-AA with an increased sensing range) dir.	Karınca algoritmalarının -AA (İng: Ant algorithms), sıkışmış bir afetzedeye giden bir yol için arama süresini optimize etmede uygulanabilirliğini ve kurtarma aşamasında Dijkstra algoritmasının uygulamasını araştırmaktır.	Simülasyon için Matlab kullanılmıştır.
(Wu vd., 2023)	İşbirlikçi oyun ve dinamik yol izlemeye dayalı çoklu karınca koloni algoritması (CDMACA)	Gezgin Satıcı Problemi	Deneyler Matlab simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir.
(Pu vd., 2024)	Geliştirilmiş Karınca kolonisi optimizasyonu algoritması (IACO)	Yol planlama problemi	Deneyler simülasyon ortamında bir ve dört robot ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1.4.' de Karınca kolonisi optimizasyonu tabanlı algoritmaları içeren bazı çalışmalar mevcuttur. Karınca kolonisi optimizasyonu algoritmasının ele

alındığı ilk çalışma, NP-zor¹ problem sınıfında yer alan kaynak kısıtlı çizelgeleme problemidir (Merkle vd., 2002). Burada ana algoritmaya bazı yeni özellikler eklenmiştir. Eklenen ilk özellik, deterministik bir buluşsalın karıncaların kararları üzerindeki etkisidir. İkincisi ise, elitist karınca kullanımıdır. Yeni çözümlerin bulunmasında ise iki feromon değerlendirme- doğrudan (veya yerel) ve toplama (veya global)- yönteminin bir kombinasyonu kullanılmıştır (Merkle vd., 2002). Robotlar, bilinmeyen bir ortama girdiklerinde, görevlerinin ne olduğunu ve hangi görevlerin zor olduğunu bilemezler. Bu ise iş birliği yapmalarını gerektirir. İkinci çalışma ise bu duruma bir çözüm üretilmesine yardımcı olur ve çoklu robot iş birliği yöntemi için geliştirilen karınca algoritmasını kullanır (Yingying vd., 2003). Bu algoritma, bilinmeyen ortamlarda iş birliğini dinamik olarak programlamak için çoklu robot sistemine yardımcı olur. Ayrıca çalışmada, görev kilitlenmesinin önüne geçmek için de algoritmaya bir zayıflatma faktörü eklenmiştir (Yingying vd., 2003). Üçüncü çalışma ise bir arama görevini içerir (Turduev vd., 2014). Amaç, bilinmeyen bir ortamda çoklu robotlarla, yüksek gaz konsantrasyonuna sahip alanların belirlenmesi ve gaz dağılımının gerçek zamanlı bir haritasının oluşturulmasıdır. Çalışmada, gerçek bir kimyasal gaz olan etanolün bulunduğu bir ortamda gerçek bir robotik sistem kullanır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen ilk deney ortamı Khepera III, ikinci deney ortamı ise MiniQ robotlarının kullanımını içerir. Ayrıca çalışma, karınca kolonisi algoritmasının yanı sıra, dağıtık eş zamansız parçacık sürü optimizasyonu (İng: Decentralized and asynchronous particle swarm optimization-DAPSO), kanonik parçacık sürü optimizasyonu (İng: Canonical particle swarm optimization-CPSO) ve bakteriyel besin arama optimizasyon (İng: Bacterial foraging optimization -BFO) algoritmalarını da içerir (Turduev vd., 2014). Bir diğer çalışmada ise karınca koloni algoritmasının değiştirilmiş bir şekli yer alır (Krentz vd., 2015). Değiştirilmiş olan bu algoritma, karınca davranışını taklit ederken olasılık ölçütlerini kullanır. Temel farklılıkları, bir karıncanın feromon salgılayarak yol takibi yapması, robotların ise belirlenen bir baz istasyonu ile bir yolun tamamlandığını kaydetmek üzere programlanmış olmalarıdır. Algoritmanın robot sürüsüne uygulanması, iki nokta arasındaki en kısa yolun belirlenmesini sağlar. Buradan yola çıkarak robotlar, bir afet bölgesinde güvenli en kısa yolu belirleyip tahliye işlemini gerçekleştirebilir (Krentz vd., 2015).

¹ NP-zor: Polinomsal zamanda bir çözümü olduğu ispatlanamayan karar problemlerinin karmaşıklık sınıfını temsil eder.

Geliştirilmiş karınca kolonisi algoritmasını içeren bir diğer çalışma ise tekli ve çoklu robotlar için yol planlamasını ele alır (Pu vd., 2024). Geliştirilen bu algoritma bazı katkılar içerir. İlk katkı, feromonun başlangıç dağılımı ile karınca kolonisinin yöneliminin seçilmesidir. İkincisi, daha kısa yolların bilgi yoğunluğunu artırmak için bir ödül ve ceza mekanizmasının eklenmiş olmasıdır. Sonuncusu ise, birden fazla robotun çarpışmasının önlenmesi için yeni bir engelden kaçınma algoritmasının tanımlanmasıdır (Pu vd., 2024). Karınca algoritmasının doğasında bulunan keşif özelliği, bilinmeyen arama uzayının hızlı haritalanması ve kapsanmasını sağlar. Bu özelliğin kullanımını içeren bir çalışma bu algoritmanın dört farklı şeklini içerir (Husain vd., 2022). Bu çalışmada, arama ve kurtarma senaryosunda arama aşaması, bir afetzedenin labirent benzeri bir ortamda sıkışıp SOS sinyali vermesi ile başlar. Faz I aşamasında, arama etmenleri afetzedeyi tespit etmek için iAA algoritması ile çevreyi araştırır. Afettede tespit edilirse Faz II ye geçilir ve Dijkstra algoritmasının özel bir uygulaması ve Faz I den elde edilen arama sonuçlarına bağlı olarak afetzedeye ait konum bilgilerini baz istasyonuna iletmek için en kısa yönlendirme yolu bulunur (Hussain vd., 2022). Tablo 1.4.' de yer alan son çalışma grubu ise karınca kolonisi ve bazı diğer algoritmaların birleşimini içerir. Bu çalışmalardan ilki, belirli bir oluşumda hareket eden dağıtılmış işbirlikçi bir ekibin her robotu için çarpışmasız yörüngeler oluşturmak üzere tasarlanmış yeni bir algoritma içerir (Ioannidis vd., 2011). Bu algoritma CA' lar ve ACO algoritmalarının birleşimidir. Webots, 3 boyutlu simülatörü ile test edilen yöntemdeki robot ekibi, her biri beş robottan oluşan iki alt gruptan oluşur (Ioannidis vd., 2011). İkinci çalışma ise, gezgin satıcı (İng: Traveling salesmen problem-TSP) ve kapı atama (İng: Gate assignment problem) problemlerine hibrit algoritmanın uygulanmasını içerir (Deng vd., 2019). Bu algoritma, ACO' ya çoklu popülasyon stratejisi, birlikte evrim mekanizması, feromon güncelleme stratejisi ve feromon difüzyon mekanizması eklenmesi ile oluşturulur. Bu eklemelerin ACO' ya sağladığı katkılardan ilki, yakınsama oranını artırması ve yerel optimum değere düşmeyi önlemesidir. İkincisi ise, optimizasyon performansını iyileştirmesidir (Deng vd., 2019). Üçüncü çalışma, simüle edilmiş ortamlarda arama görevlerini yerine getiren otonom bir çoklu robot sistemi geliştirilmesini içerir (Mendonça vd., 2020). Bu çalışmada, robot hareketi ve yönelim kontrolü, bir bulanık mantık denetleyici (FLC), bir dinamik bulanık bilişsel harita (DFCM) ve denetleyici ve karınca kolonisi optimizasyonu metasezgiselinden yola çıkılarak oluşturulan bir

bulanık dinamik buluşsal harita (DFCM-ACO) kullanır. Ayrıca bu çalışma, bulanık mantığın ana yönlerini miras alan üç yaklaşımdan biri olan DFCM-ACO' nun, yarı bilinmeyen ortamların keşfedilmesi, afetzedelerin kurtarılması, sağlamlığının doğrulanması için bir navigasyon sistemine uygulanmasını içerir. DFCM kullanımının sağladığı katkı, bilgi edinme ve temsil süreçlerinin basitleştirilmesidir. ACO kullanımının sağladığı katkı ise, robotların yollarının diğer yaklaşımlara göre daha fazla dağıtılmış (optimize edilmiş) olmasıdır (Mendonça vd., 2020).

1.3.5 Feromon

Stigmerji stratejisi robotlar arasında bilgi aktarımını sağlamak amacıyla ortama bırakılan iz olarak belirtilebilen feromonu kullanır. Feromon kullanımı, robotların iletişim gereksinimini azaltıp sürüyü daha ölçeklenebilir kılar (Tang vd., 2019). Bu mekanizma sayesinde sürü robotları hedefi daha kısa sürede bulur ve farklı sayıda robot ile mekanizmanın uygulanabilirliği devam eder (Tang vd., 2019). Sistemin uygulanabilirliğinin devam etmesi ise ölçeklenebilirliğinin bir sonucudur. Oluşan bu durum, stratejiyi farklı karmaşık senaryolar için kullanışlı hale getirir (Tang vd., 2019). Bu senaryolardan biri enkaz altı arama/kurtarma çalışmalarıdır. Stigmerji stratejisini kullanan robot toplulukları, direkt mesajlaşma protokollerinin kesintiye uğrayarak kullanım dışı kaldığı, enkaz altı gibi arama ortamlarında avantaj sağlar. Böylece, direkt olarak kablosuz iletişime ihtiyaç duymayan robot topluluklarının boyut ve enerji tüketimi de azaltılabilmektedir. Buradan sağlanan katkı şudur: daha fazla sayıda, küçük boyutlu robot topluluklarının kullanımı, enkaz altı arama/kurtarma operasyonlarında yüksek öneme sahip olan robot topluluklarının bireysel hata ve bozulmalarına karşı dayanıklılıklarını artırır. Bu önemli teorik ve pratik avantajların etkisiyle, son dönemde arama/kurtarma amaçlı oluşturulan robot topluluklarında stigmerji kullanımına yönelik araştırmalar yapılmıştır. Yapılan son araştırmalar (Fossum vd., 2014), feromon izlerinin ziyaret edilen alanlara ilişkin bir tür sürü zekâsı sağladığı yönündedir.

Tablo 1.5. Feromon kullanımına ait bazı çalışmalar

Referans	Feromon Türü (varsa modeli)	Görev/Amaç	Test Tipi
(Payton vd., 2001)	Sanal feromon	Gözetleme, keşif, tehlike tespiti ve yol bulma gibi konularda büyük ölçekli sonuçlar elde etmek için çok sayıda küçük ölçekli robotun eylemlerini koordine etmeye yönelik teknikleri araştırmak.	Kontrol sistemi, başlangıç aşamasında Teambots simülasyon ortamı ve Java programlama dili, daha sonra ise C++ kullanılarak yazılmıştır.
(Kuiper ve Nadjm-Tehrani, 2006)	Dağıtık feromon itme modeli	İHA alanında MANET (mobil ad hoc networks) araştırmaları için bir hareketlilik modeli üretmek.	Test işlemi simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir.
(Hamann ve Wörn, 2007)	Sanal feromon	Yiyecek arama senaryosunu büyük robot gruplarında test etmek.	Simülasyon için Breve simülatörü kullanılmıştır.
(Fossum vd., 2014)	İtici feromon	Bilinmeyen ortamlarda kolektif keşfin geliştirilmesi	Roborobo! simülatörü kullanılmıştır.
(Fujisawa vd., 2014)	Feromon görevi yapan bir kimyasal olarak etanol kullanılmıştır.	Robot sürülerinde grup arama davranışını gerçekleştirmek. Feromon görevi yapan bir kimyasal tarafından koordine edilen bir robot sürüsünün işbirlikçi davranışını hem simülasyonlarda hem de gerçek robot deneylerinde test etmek.	Simülasyon sonuçlarını doğrulamak için ARGOS-01 robotu geliştirilmiştir.
(Khaliq ve Saffiotti, 2015)	RFID etiketleri	Stigmerjik yaklaşımların gerçek bir ortamda tam ölçekli bir robotik sistemin navigasyonu için kullanımını araştırmak.	Deneysel e-puck robotu, Turtlebot2 robotu ve Scitos G5 platformuna dayalı özel bir robot kullanılmıştır.
(Hunt vd., 2019)	İtici feromon	Stigmerjik etkileşim kuralının işleyişi ve stigmerjik alan kapsama algoritmasının kolektif performansını araştırmaktır.	Simülatör olarak Kilobox kullanılmıştır. Kilobot robotları ile de deneyler gerçekleştirilmiştir.
(Tang vd., 2019)	Dijital feromon (vektörel feromon modeli)	Dinamik hedef arama ve takibi	Simülasyon ortamında test işlemi gerçekleştirilmiştir ve

Tablo 1.5. (devam). Feromon kullanımına ait bazı çalışmalar

			fiziksel robotlar üzerinde deneyler yapılmıştır.
(Salman vd., 2020)	Yapay feromon (fotokromik bir malzeme ile kaplanmış olan zemine UV ışığı yansıtılarak feromon tabanlı stigmerjiyi taklit eden sistem: Phormica)	Yapay feromon tabanlı stigmerjiyi taklit eden bir sistem olan Phormica'nın, stigmerjik koordinasyona dayalı kolektif davranışların tasarımında araştırma yapmak için kullanılması. Kapsama, arama ve görev atama.	Deneylerde 5 e-puck robot kullanılmıştır.
(Tang vd., 2020)	Vektör feromon modeli	Sürü robotlarında hedef aramak.	Simülasyon ortamında test işlemi gerçekleştirilmiştir.
(Na vd., 2021)	Işık tabanlı yapay feromon COS ϕ	Buharlaşma, difüzyon ve rüzgâr gibi çevresel faktörlerin yapay feromon üzerindeki etkisi ile bir robot sürüsünün kolektif davranışlarını araştırmak.	Colias robotları kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1.5. feromon kullanımını içeren bazı çalışmaları içermektedir. Brenes-Torres ve arkadaşlarının (2022) de yer alan çalışmalarında, bu alanda kullanımlarını içeren bir tablo (Brenes-Torres vd., 2022, s. 5) yer almaktadır. Bu tablo, robot stigmerjisinin gerçek uygulamalarıyla ilgili yayın ve araştırma gruplarının zaman çizelgesini oluşturur. Ayrıca feromonların gerçek zamanlı uygulamalarını içeren bazı çalışmalara da yine bu tabloda yer verilmiştir (Brenes-Torres vd., 2022). Tablo 1.5. de yer alan çalışmalar incelendiği kadarı ile feromonun fiziksel olarak kullanımı ve enkaz altı sürü robotiğinde gerçek zamanlı uygulanmasına rastlanmamıştır. Fiziksel feromon benzeri bir kimyasal madde salınımını içeren stigmerji temelli çalışan ender çalışmalardan biri olan Russell (1999) çalışması, karıncaların feromon izi takip yeteneklerinin robotik sistemlere aktarılmasını içeren bir proje araştırmasıdır. Bu çalışmada, bir çift koku algılayıcı anten ile donatılan robotik bir karınca inşa edilerek, *Lasius fuliginosus* karıncasında gözlenen iz takip algoritması ile sistem programlanarak deneysel sonuçlara yer verilmiştir (Russell, 1999).

2. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde geliştirilen karınca kolonisi algoritmasına yer verilecektir.

2.1 Geliştirilen Kontrol Algoritması

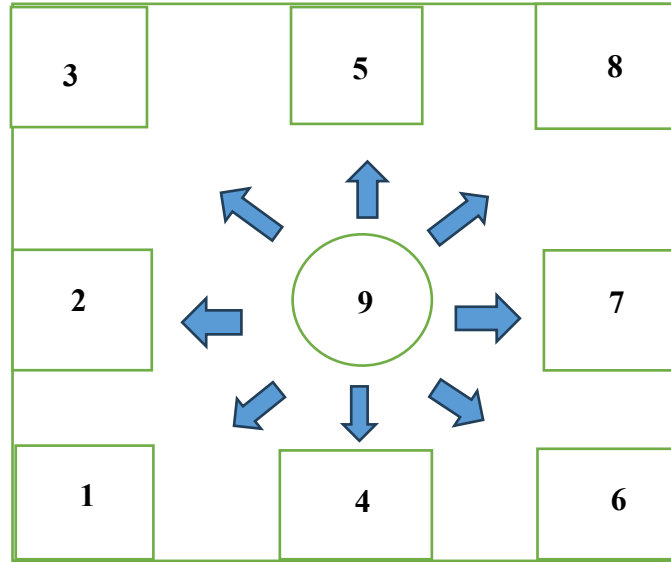
Bölüm 1.3.4. de açıklandığı üzere, Karınca sistemi algoritmasına göre etmenler, tam bağlantılı (İng: fully connected) bir graf olarak modellenmiş öğrenme probleminin çözümü sırasında ziyaret edilmesi mümkün olan tüm köşe ve kenarlara ait sanal feromon yoğunluğunu global bilgiyi kullanarak matematiksel olarak hesaplayabilmektedir.

Enkaz alanı arama probleminin önemli özelliklerinden bazıları şu şekildedir:

- Tespit edilmesi istenen afetzedeler, enkaz alanında belli bir bölgede hareketsiz veya sıkışmış durumdadırlar.
- Afetzedeler bulundukları lokasyonda ses çıkarabilirler. Enkaz alanında tespit edilen ses yüksekliği, afetzedelerin olası lokasyonlarına robotların olasılıksal olarak yönelmesinde kullanılacaktır.
- Bireysel robotlardan elde edilen haritalama bilgisi birleştirilmesiyle, arama/kurtarma ekibine enkaz alanındaki afetzedelerin lokasyonları ile bu lokasyonlara alternatif ulaşım güzergahları belirlenebilir.

Enkaz alanı arama probleminde, tespit edilen afetzedeye olası farklı uzunlukta tüm ulaşım güzergahlarının bulunması amaçlanmaktadır. Bundan dolayı, enkaz alanında arama yapacak çoklu robot sisteminin kontrolü için Karınca sistemi algoritması şu şekilde yenilenmiştir:

İlgili hücrenin taranması sırasında afetzedelerin tespit edilememesi durumunda robotun hareket edeceği bir sonraki arama hücresi, mevcut hücrenin 8 komşusundan henüz taranmamış olan arama hücreleri içerisinde olasılıksal olarak seçilecektir. Belirli bir arama hücresinin taranması sırasında, ilgili olan bölge için Şekil 2.1. de gösterilen 9 numaralı bölge ziyaret edilmiş olacak ve verilen sekiz doğrultu için feromon yoğunluğu, ses yüksekliği ve komşu hücrelerdeki robot sayısı bilgisi dikkate alınacaktır.



Şekil 2.1. Bir arama hücresinin genel yapısı ve doğrultular

Robotlar tarafından feromon salınımı, taranmış olan arama hücresinde afetzedenin tespiti sonrası başlar. Afetzedeyi tespit eden robot, mevcut durumda taramış olduğu arama hücrelerinden oluşan bir kısmi graf elde eder. Ve komşu hücreler üzerinden robotun harekete başladığı ilk noktaya en kısa yolu tespit eder. Robotların harekete başlama noktaları arenanın bir noktasından arenaya dağılarak veya arenanın kenarlarından dağılarak konumlandırılmış noktalar şeklinde iki alternatif yaklaşım olarak düşünülecektir. Tespit edilen yol üzerinden başlangıç noktasına hareket eden robot, üzerinden geçtiği her arama hücresi için, hücreler arası geçiş yönünü belirleyecek şekilde feromon salınımını gerçekleştirir. Algoritmanın temel işleyişi yukarı açıklandığı şekilde sistemde yer alan tüm robotların dahil olduğu bir mekanizma ile devam eder.

Denklem (1.3) de belirtilen karınca sistemine ait formül enkaz arama problemine uyarlandığında, k numaralı robotun i arama hücresinden j arama hücresine geçme ihtimali aşağıda verildiği şekilde hesaplanır:

$$P_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{i,j}^\alpha \cdot \pi_{i,j}^\delta \eta_{i,j}^\beta}{\sum_{l \in S_k^i} \tau_{i,l}^\alpha \pi_{i,l}^\delta \eta_{i,l}^\beta} & j \in S_k^i \text{ ise} \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (2.1)$$

Denklem (2.1) de yer alan S_k^i , i arama hücresinde geçiş yapılabilecek, henüz k robotu tarafından ziyaret edilmemiş komşu arama hücrelerinin kümesini, $\tau_{i,j}^\alpha$ algılanan feromon miktarı, $\pi_{i,j}^\delta$ ise algılanan ses yüksekliğini temsil etmektedir. Diğer değişkenler olarak yer alan α , δ ve β ise sırasıyla, feromon miktarı, ses

yüksekliği ve sayım bilgisinin görece ağırlıklarını kontrol eder. $\eta_{i,j}$ sayım bilgisi aşağıda belirtildiği şekilde hesaplanır:

$$\eta_{i,j} = \frac{1}{1+r_{i,j}} \quad (2.2)$$

Denklem (2.2) de yer alan $r_{i,j}$, i arama hücresinden j arama hücresine geçiş yapacağını belirten robot sayısı olup, karınca sistemi algoritmasının olasılıksal seçim yöntemine ses yüksekliği bilgisi eklenmiş ve lokal etkileşimler sonucu elde edilen sayım bilgisi ile de robotların arama uzayının farklı alanlarına yayılımları desteklenmiştir. Bu sayede ilgili yöntem enkaz alanı arama problemine uyarlanmıştır.

Tablo 2.1. Engel yerleşimi için yalancı kod

<i>Yeni_Arena_Olustur</i>
Engel konumlarını arena üzerine rastgele yerleştir for i=1: engel sayısı kadar engelleri dik ve yatay olacak şekilde konumlandır

Tablo 2.1. de engel yerleşimi için yalancı kod yer almaktadır. Engeller arena dışında olmayacak şekilde rastgele olarak dik ve yatay bir şekilde yerleştirilir. Önce engellerin yerleştirileceği koordinatlar belirlenir. Sonrasında ise dik veya yatay engel oluşumu için, engelin yerleştirileceği koordinat ve bir sonraki koordinat için uygun doğrultulara işaretleme yapılır. Bunun için sekiz yön atanmıştır. Bu doğrultular, bulunduğu konumdan itibaren [0,1], [1,1], [1,0], [1,-1], [0,-1], [-1,-1], [-1,0], [-1,1] olarak düşünülmelidir. Engeller, enkaz arama alanı içerisinde karşılaşılabilecek engel bilgisinin varlığı için tasarlanmıştır.

Engel yerleşiminden sonra ele alınacak bir diğer yalancı kod ise Tablo 2.2. de verilen hedef yerleşimi içindir.

Tablo 2.2. Hedef yerleşimi için yalancı kod

<i>Hedefleri_Rastgele_Yerlestir</i>
for i=1: hedef sayısı kadar hedef konum bilgisi için x ve y bileşenlerini rastgele oluştur ses yüksekliği için verilen aralıkta rastgele bir değer üret hedef konum bilgisine ses yüksekliğini aktar

Burada yapılan işlemde önce hedeflerin konum bilgisi için arena sınırları içerisinde rastgele konum bilgisi üretilir. Belirlenen minimum ve maksimum ses yüksekliği sınırları içerisinde bir sayı belirlenerek hedef konumlarda bu bilginin tutulması sağlanır. Bununla sağlanan, ilgili ses yüksekliğinin bulunduğu konumda bir afetde mevcudiyeti olduğudur.

Tablo 2.3. Robotların hareketi için yalancı kod

<i>Robotları_Algoritma_Dahilinde_Hareket_Ettir</i>
for i=1: robot sayısı kadar aksiyon seç robotu ilerlet her robot için yeni konumu ziyaret edilmiş olarak işaretle her robot için geri dönüş grafi oluştur

Bir diğer yalancı kod ise robotların hareket etmesi için planlanan algoritma için geliştirilmiştir ve Tablo 2.3. de yer almaktadır. Arena büyüklüğü, robot sayısı, robot haritası, robota ait graf bilgisi, feromon haritası, engel haritası, robotların konum bilgisi, hedef haritası, hedeflerin konum bilgisi ve geliştirilen kontrol algoritmasında kullanılan feromon bilgisi katsayısı, ses yüksekliği katsayısı ve robot sayısı katsayısı bilgisi girdi olarak kullanılır. Engelin olmaması ve komşu hücrelerin ulaşılabilir olması gibi bilgiler göz önüne alınarak aksiyon seçilir ve robot bir sonraki doğrultu için hareket ettirilir yani ilerletilir. Her robot bu algoritma dahilinde ilerletilir ve yeni konum bilgisi robot haritasında ziyaret edilmiş olarak işaretlenir. Geri dönüş için kullanılacak olan robot grafi için de işaretleme ve geri dönüş doğrultu bilgisi tutulur. Robotları ilerletmek için kullanılan aksiyon seçiminin yer aldığı yalancı kod ise Tablo 2.4. ile verilmiştir.

Tablo 2.4. Aksiyon seçimi için yalancı kod

<i>Aksiyon_Sec</i>
sigma=feromon katsayısı, gama=ses katsayısı, beta=robot sayısı katsayısı parametrelerini gir for i=1:8 pozisyonları seç % (kuzey, güney, doğu, batı, kuzeybatı, kuzeydoğu, güneybatı, güneydoğu) doğrultularını

Tablo 2.4. (devam). Aksiyon seçimi için yalancı kod

```
for i=1:8
    yeni pozisyonu oluştur
    komşu ulaşılabilirse
        feromon yoğunluğunu hesapla
        ses yoğunluğunu hesapla
        robot yoğunluğunu hesapla
        komşu hücre daha önce ziyaret edilmemişse
             $s1(i) = \text{feromon yoğunluğu} * \sigma + \text{ses yoğunluğu} * \gamma$ 
             $+ \text{robot yoğunluğu} * \beta$ 
             $s2(i) = \text{feromon yoğunluğu} * \sigma + \text{ses yoğunluğu} * \gamma$ 
             $+ \text{robot yoğunluğu} * \beta$ 
        komşunun daha önce ziyaret edilmemiş olduğu durumdaki tüm hücrelerin
        toplamı (toplam1)
        tüm komşuların ziyaret edilmiş olduğu durumdaki tüm hücrelerin toplamı
        (toplam2)
        toplam1 > 0 ise %ziyaret edilmemiş komşular var
            seçilme şansı en yüksek doğrultuyu hesapla ve bu değeri tut
            break
        değilse %tüm komşular ziyaret edilmiş
            seçilme şansı en yüksek doğrultuyu hesapla ve bu değeri tut
            break
```

Belirlenen sekiz doğrultu için kontrol yapılır. Kontrol edilen komşu hücrede engel var olup olmadığı bilgisi engel haritasına bakılarak kontrol edilir. Engel yoksa o hücre ulaşılabilir demektir ve geliştirilen algoritma dahilinde feromon, ses ve robot yoğunluğu bilgisinin yer aldığı toplam hesaplanır. Bu toplam komşu hücrenin olasılıksal seçiminde belirleyici olacaktır. Benzer olarak ayrıca bir toplam da tüm komşuların ziyaret edildiği durum için hesaplanır. Belirlenen sekiz doğrultu için toplamsal süreçler tamamlanır. Ardından, ziyaret edilmemiş komşu hücrelerin olduğu değerlendirme sürecinde yani birinci toplamın sıfırdan büyük olması durumunda, her bir yön için belirlenen yoğunluk değeri, toplama bölünür ve sıfır ile bir arasında bir sayı elde edilir. Başka bir değişken ile de 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı üretilir. Sekiz yön için toplamsal ilerleyen hücresel yoğunluk bilgisinin,

rastgele üretilen sayıdan büyük olduğu doğrultu seçilen yön olarak atanır. Benzer işlem tüm komşu hücrelerin ziyaret edilmiş olduğu ikinci toplam içinde yürütülür.

İlgili doğrultuda aksiyon seçimi yapılarak robot hareket ettirilir. Sonraki aşamada ise ulaşılan hedefler doğrultusunda en kısa yol bilgisi için Dijkstra algoritması kullanılır (Dijkstra, 1959).



3. BULGULAR

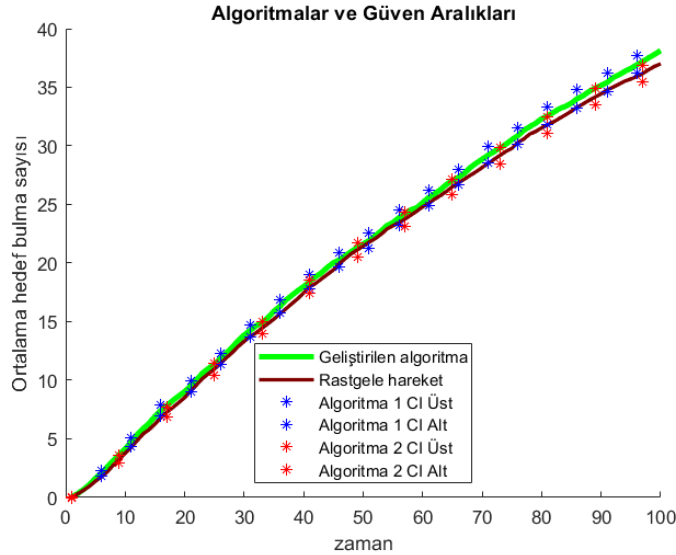
Bu bölümde Matlab ortamı kullanılarak hazırlanmış olan bir arenada geliştirilen kontrol algoritmasının test işlemi gerçekleştirilecektir. Bu çerçevede ilk iki alt başlıkta yer alan senaryolar için, sabitlenmiş bir arena, engeller, hedefler ve hedef haritası, geliştirilen algoritma ve rastgele hareket için karşılaştırmak amacıyla kullanılacaktır.

3.1 Ortalama Hedef Bulma Sayıları Üzerine Bir Karşılaştırma

İlk senaryo için 100 çalıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Burada ele alınan parametre değerleri şu şekildedir:

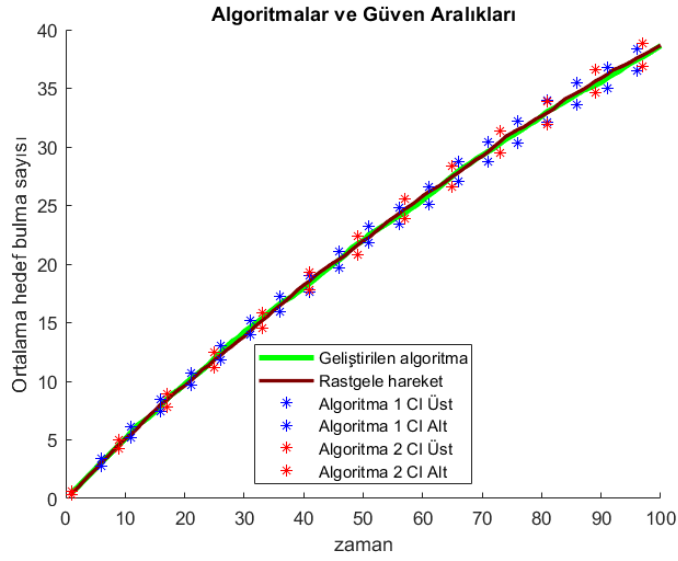
arenaSize=100, simTime=10000, obstacleNum=500, feromonDep=10, sigm=1, gamm=1, bet=1 olarak alınmıştır. Farklı robot sayıları, hedef sayıları ve randomStart=0/1 durumları için elde edilen dört farklı grafik bilgisi sırasıyla aşağıdaki şekillerde yer almaktadır. randomStart=0 durumu, robotların [1 1] noktasından, randomStart=1 durumu ise, robotların arenada rastgele kenarlardan başlamasını temsil eder. Bulunan hedef sayılarının her t=100 zaman dilimi için hesaplanan ortalamaları üzerine elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir.

- robotNum=10; targetNum=5; randomStart=0 için Şekil 3.1. elde edilmiştir.



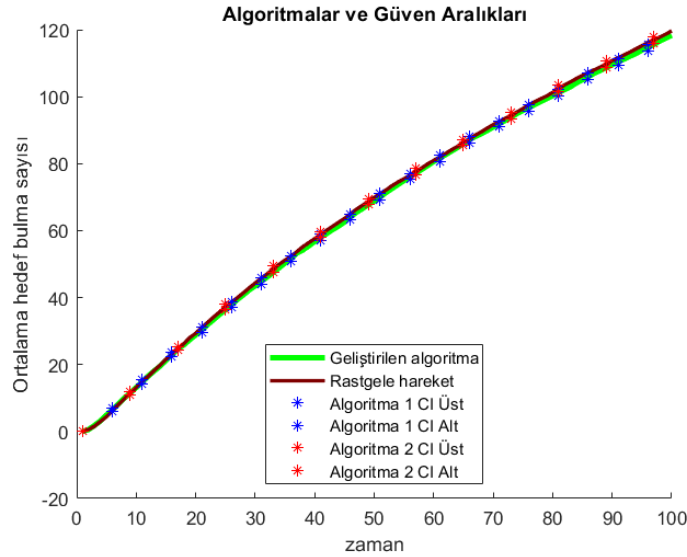
Şekil 3.1. robotNum=10; targetNum=5; randomStart=0 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak elde edilen hedef bulma sayıları ve %95 güven aralıklarını içerir.

- robotNum=10; targetNum=5; randomStart=1 için Şekil 3.2. elde edilmiştir.



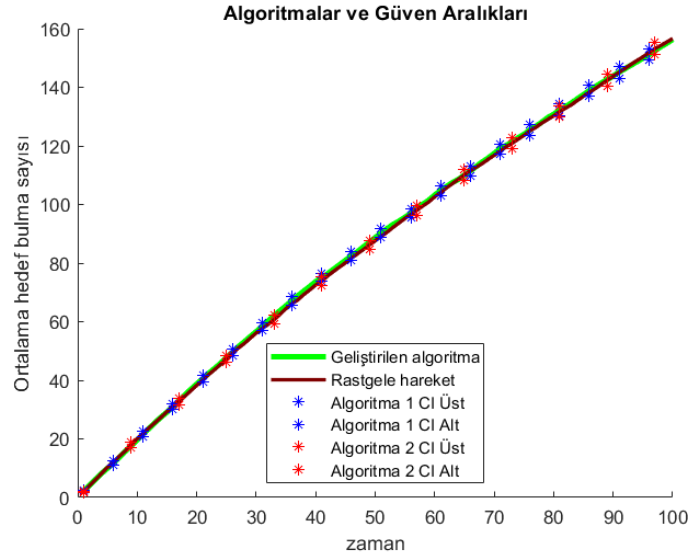
Şekil 3.2. robotNum=10; targetNum=5; randomStart=1 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak elde edilen hedef bulma sayıları ve %95 güven aralıklarını içerir.

- robotNum=20; targetNum=10; randomStart=0 için Şekil 3.3. elde edilmiştir.



Şekil 3.3. robotNum=20; targetNum=10; randomStart=0 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak elde edilen hedef bulma sayıları ve %95 güven aralıklarını içerir.

- robotNum=20; targetNum=10; randomStart=1 için Şekil 3.4. elde edilmiştir.

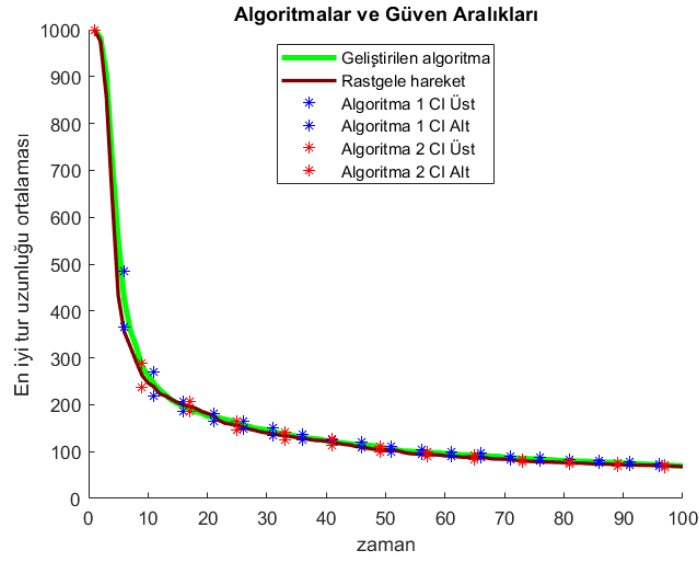


Şekil 3.4. robotNum=20; targetNum=10; randomStart=1 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak elde edilen hedef bulma sayıları ve %95 güven aralıklarını içerir.

3.2 En İyi Tur Ortalamaları Üzerine Bir Karşılaştırma

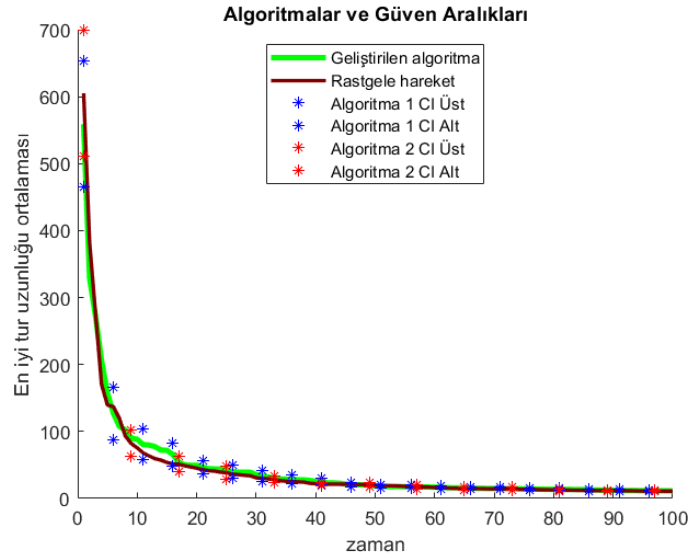
Bu alt bölümde alınan parametre değerleri ve çalıştırma sayısı, Bölüm 3.1. de verilen değerler ile aynıdır. En iyi tur uzunluklarının her t=100 zaman dilimi için hesaplanan ortalamaları üzerine elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir. Burada yapılan işlem şu şekilde ilerler: bir zaman döngüsü sırasında robot eğer hedef bulursa o hedefe giden uzaklık bilgisi kaydedilir, eğer bulamazsa uzaklık bilgisi 1000 kabul edilir ve bir döngüdeki her t=100 zaman diliminde, aralarındaki en küçük değer alınır (minimum değer alınır) ve en kısa mesafe ataması yapılır.

- robotNum=10; targetNum=5; randomStart=0 için Şekil 3.5. elde edilmiştir.



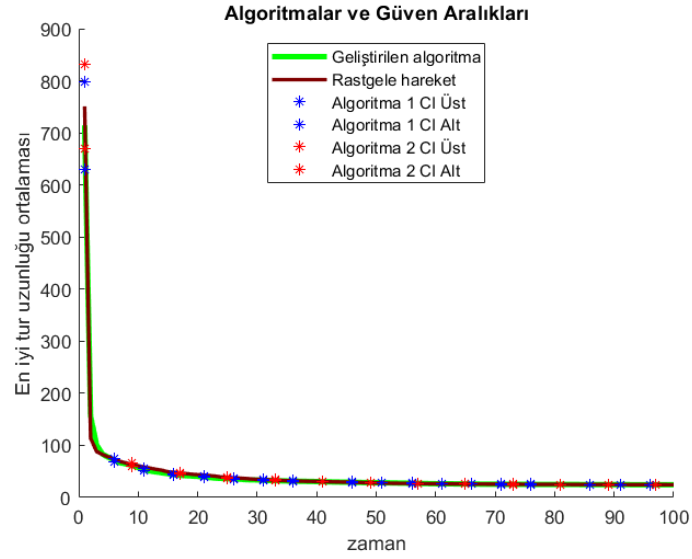
Şekil 3.5. robotNum=10; targetNum=5; randomStart=0 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak en kısa yol uzunlukları ve %95 güven aralıklarını içerir.

- robotNum=10; targetNum=5; randomStart=1 için Şekil 3.6. elde edilmiştir.



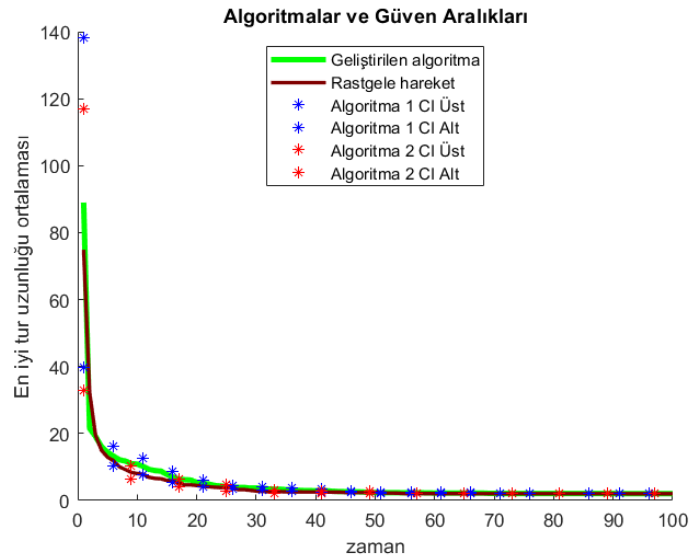
Şekil 3.6. robotNum=10; targetNum=5; randomStart=1 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak en kısa yol uzunlukları ve %95 güven aralıklarını içerir.

- robotNum=20; targetNum=10; randomStart=0 için elde edilen en iyi tur ortalamaları için Şekil 3.7. elde edilmiştir.



Şekil 3.7. robotNum=20; targetNum=10; randomStart=0 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak en kısa yol uzunlukları ve %95 güven aralıklarını içerir.

- robotNum=20; targetNum=10; randomStart=1 için Şekil 3.8. elde edilmiştir.

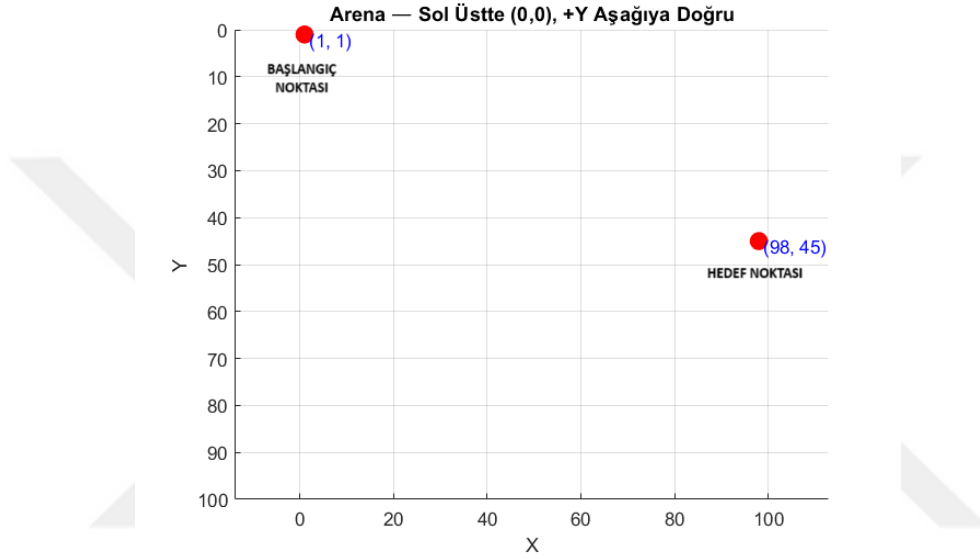


Şekil 3.8. robotNum=20; targetNum=10; randomStart=1 için 100 deneme çalışmasının ortalaması olarak en kısa yol uzunlukları ve %95 güven aralıklarını içerir.

3.3 Aynı Hedefe Giden Farklı Yolların Bulunması

arenaSize=100, simTime=10000, robotNum=20, targetNum=10, obstacleNum=500, feromonDep=10, sigm=10, gamm=1, bet=1 olarak alınan değerler için bir kere çalıştırma işlemi sonucunda üç farklı robotun aynı hedefe ulaşırken izlediği yollar için şekillere yer verilecektir. Robotların arenaya dağılması [1 1] noktasından alınacaktır (yani randomStart=0 alınmıştır).

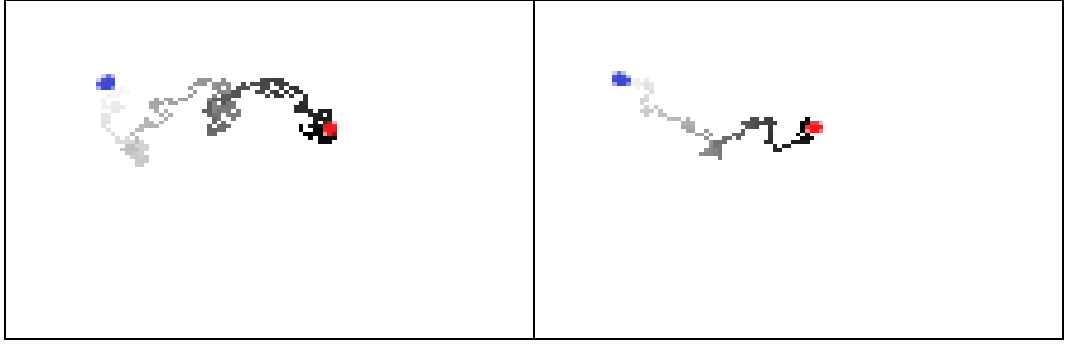
Şekil 3.9. da robotların yuvası ve 10 hedef konumdan bir tanesi olan sekiz numaralı hedefin konum görünümü yer almaktadır.



Şekil 3.9. Robotların arenaya dağılma noktası ve hedef noktanın konumu

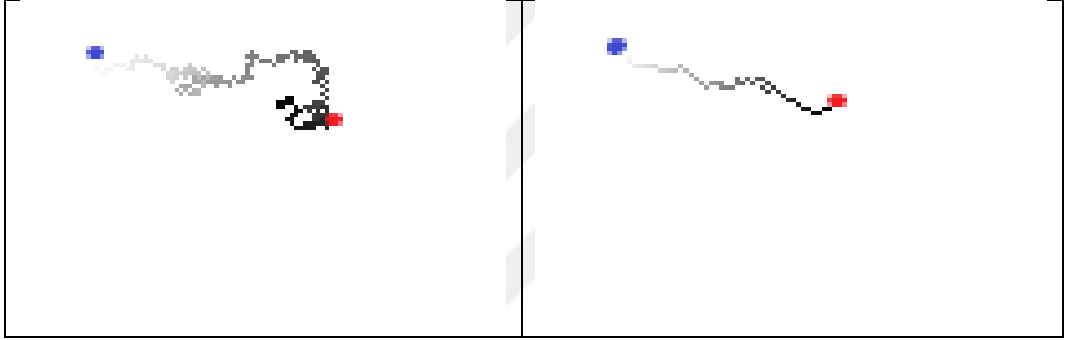
(Aşağıda belirtilen şekillerde kırmızı çizgi hedef nokta, mavi çizgi ise robotların başlangıç noktasını temsil etmektedir.)

Şekil 3.10. da dört numaralı robot için sekiz numaralı hedefe giderken izlediği yol bilgisi yer alır. Şekil 3.10 da sol tarafta kaynağa uzaklık 243 iken, sağ tarafta ise uzaklık 109 dur.



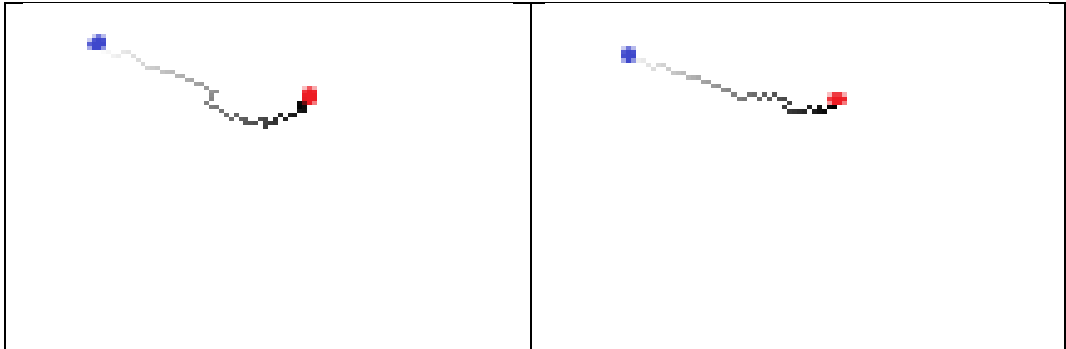
Şekil 3.10. Dört numaralı robotun sekiz numaralı hedefe ulaşırken izlediği yol

Şekil 3.11. de bir numaralı robot için sekiz numaralı hedefe giderken izlediği yol bilgisi yer alır. Şekil 3.11 de sol tarafta kaynağa uzaklık 180 iken, sağ tarafta ise uzaklık 46 dır.



Şekil 3.11. Bir numaralı robotun sekiz numaralı hedefe ulaşırken izlediği yol

Şekil 3.12. de dokuz numaralı robot için sekiz numaralı hedefe giderken izlediği yol bilgisi yer alır. Şekil 3.12 de sol tarafta kaynağa uzaklık 55 iken, sağ tarafta ise uzaklık 45 dir.



Şekil 3.12. Dokuz numaralı robotun sekiz numaralı hedefe ulaşırken izlediği yol

4. TARTIŞMA

Bölüm 3. de yer alan bulgular kısmında iki senaryo durumu incelenmiştir. Sabitlenmiş bir arena, engeller, hedefler ve hedef haritası üzerinde rastgele hareket ve geliştirilen kontrol algoritması için ortalama hedef bulma sayıları ve algoritmaların en iyi tur ortalamaları grafik üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca belirtilen iki senaryoya ek olarak, bir hedefe giden farklı robotların bulduğu yollara şekilsel olarak yer verilmiştir.

Burada ana motivasyon şudur: geliştirilen algoritma, rastgele harekete göre daha avantajlı mıdır? Yoksa en az onun kadar tutarlı mıdır?

Bu fıkirden yola çıkarak, grafikler farklı çalıştırma sayıları üzerinden ortalamalar hesaplanarak incelendiğinde, karınca sistemi algoritmasının uyarlanması ile elde edilen yeni algoritmanın en az rastgele hareket kadar tutarlı olduğu söylenebilir. Çünkü ister ortalama hedef bulma sayıları incelensin, ister en iyi tur ortalamaları incelensin her iki durumda da algoritma en az onun kadar iyi çalışır. Bunu söyleyebilmenin bir diğer yolu olarak da t-test sonuçları aşağıda yer almaktadır.

▪ 1. Senaryo için

- Robot sayısının 10, hedef sayısının 5 olduğu robotların [1 1] pozisyonundan başlayarak arenaya dağıldığı durum için ikili karşılaştırma için kullanılan t-test sonucunda her $t=100$ zaman dilimi için belirlenen veriler arasında, 700 ile 800 zaman dilimi, 1500 ile 2000 zaman dilimi arasında, 9600 ile 10000 zaman dilimi arasında anlamlı bir farklılık görülmüştür. Bu aralıklar için t-testi sonucu 1 gelir. Belirtilen zaman dilimlerinde geliştirilen algoritma daha çok hedef bulmuştur.
- Robot sayısının 10, hedef sayısının 5 olduğu robotların rastgele kenarlardan arenaya dağılarak başladığı durum için ikili karşılaştırma için kullanılan t-test sonucunda her $t=100$ zaman dilimi için belirlenen veriler arasında anlamlı bir fark görülmemiştir.
- Robot sayısının 20, hedef sayısının 10 olduğu robotların [1 1] pozisyonundan başlayarak arenaya dağıldığı durum için ikili karşılaştırma için kullanılan t-test sonucunda her $t=100$ zaman dilimi için belirlenen veriler arasında, 8200 ile 8600 zaman dilimi arasında, 9400 ile 9500 ve 9600 ile 9700 zaman dilimleri arasında anlamlı bir farklılık görülmüştür. Bu

aralıklar için t-testi sonucu 1 gelir. Belirtilen zaman dilimlerinde rastgele hareket algoritması daha çok hedef bulmuştur.

- Robot sayısının 20, hedef sayısının 10 olduğu robotların rastgele kenarlardan arenaya dağılarak başladığı durum için ikili karşılaştırma için kullanılan t-test sonucunda her $t=100$ zaman dilimi için belirlenen veriler arasında anlamlı bir fark görülmemiştir.

▪ 2. Senaryo için

- Robot sayısının 10, hedef sayısının 5 olduğu robotların [1 1] pozisyonundan başlayarak arenaya dağıldığı durum için ikili karşılaştırma için kullanılan t-test sonucunda her $t=100$ zaman dilimi için 100 ile 200 aralığının istatistiksel bir önemi olmamakla beraber, 500 ile 600 zaman dilimleri, 7400 ile 7900 zaman dilimleri, 8000 ile 9000 arasında ve 9100 ile 9200 zaman dilimleri arasında anlamlı bir farklılık görülmüştür. Bu zaman dilimlerinde ikili t-test karşılaştırma testi sonucu 1 gelir. Belirtilen zaman dilimlerinde rastgele hareket algoritması daha kısa ortalama tur uzunluğuna sahiptir. (Yani rastgele hareket algoritması, daha düşük ortalamalı minimum uzaklıklar elde ederek, daha kısa yollar bulma açısından daha iyi performans gösterir).
- Robot sayısının 10, hedef sayısının 5 olduğu robotların rastgele kenarlardan arenaya dağılarak başladığı durum için ikili karşılaştırma için kullanılan t-test sonucunda her $t=100$ zaman dilimi için belirlenen veriler arasında anlamlı bir fark görülmemiştir.
- Robot sayısının 20, hedef sayısının 10 olduğu robotların [1 1] pozisyonundan başlayarak arenaya dağıldığı durum için ikili karşılaştırma için kullanılan t-test sonucunda her $t=100$ zaman dilimi için 1100 ile 3000 zaman dilimleri arasında anlamlı bir farklılık görülmüştür. Bu zaman dilimlerinde ikili t-test karşılaştırma testi sonucu 1 gelir. Belirtilen zaman dilimlerinde geliştirilen algoritma daha kısa ortalama tur uzunluğuna sahiptir. (Yani geliştirilen algoritma, daha düşük ortalamalı minimum uzaklıklar elde ederek, daha kısa yollar bulma açısından daha iyi performans gösterir)
- Robot sayısının 20, hedef sayısının 10 olduğu robotların rastgele kenarlardan arenaya dağılarak başladığı durum için 3000 ile 3600 ve 5500 ile 6000 zaman dilimleri arasında iki algoritma arasında t-test sonucu 1

gelir. Bu ise ilgili zaman dilimleri içerisinde anlamlı bir farklılık olduğunu söyler. Belirtilen zaman dilimlerinde rastgele hareket algoritması daha kısa ortalama tur uzunluğuna sahiptir. (Yani rastgele hareket algoritması, daha düşük ortalama minimum uzaklıklar elde ederek, daha kısa yollar bulma açısından daha iyi performans gösterir).

Bu bölüm ile ilgili genel çıkarımlar aşağıda yer almaktadır.

- (1. Senaryo) Robot sayısının ve hedef sayısının sabit bırakılarak incelenen dört durumdan birincisinde, geliştirilen algoritma, üçüncüsünde ise rastgele hareket algoritması belli bazı zaman dilimlerinde daha fazla sayıda hedef bulmuşlardır. Ancak, ikinci ve dördüncü durumlar için algoritmalar arasında anlamlı bir farklılık oluşmamıştır.
- (2. Senaryo) Robot sayısı ve hedef sayısının arttırılması sonucu incelenen dört durumdan birinci ve dördüncüsünde belli zaman dilimlerinde rastgele hareket algoritması daha kısa tur uzunluğuna sahipken, üçüncü durumda geliştirilen algoritma belli zaman dilimlerinde daha kısa ortalama tur uzunluğuna sahip olmuştur. Bu senaryoda incelenen ikinci durum için, iki algoritma arasında anlamlı bir fark oluşmamıştır.
- 3. senaryoda ise bir çalıştırma sonrası bir yuvadan arenaya dağılan yirmi robotun, on farklı hedefe ulaşma senaryosu ele alınmıştır. Burada geliştirilen algoritma kullanılarak, üç farklı robotun, aynı hedef konuma giderken elde ettikleri yollar yer almaktadır. Bu yolların her bir robot için mesafe olarak giderek kısaltıldığı gözlenmiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Tartışma kısmında ele alınan bulgulara göre, geliştirilen kontrol algoritması, rastgele hareket ile benzer performans gösterir. Yani tutarlıdır. Bu çıkarım şuradan yapılabilir: karşılaştırılan özellikler ele alındığında bazı zaman dilimlerinde her iki algoritmanın da üstünlük gösterdiği durumlar değişse de genel olarak, ikisi de benzer sonuçlar üretir.

Farklı ve/veya aynı robotların, aynı hedefe giderken oluşturdukları yol bilgileri, gerçek bir enkaz arama alanı probleminde arama/kurtarma çalışanlarına, afetzedelere ulaşım için alternatif yol bilgilerini oluşturur. Bu açıdan geliştirilen algoritma ele alındığında, enkaz arama alanı problemi düşünüldüğünde algoritmanın farklı haritalama opsiyonlarını arama kurtarma ekiplerine ulaştıracak olması literatüre ve gerçek hayat uygulamasına önemli derece katkı sağlayacaktır. Benzer şekilde afetzedelere ulaşım için elde edilecek en kısa yol bilgisi (robotların aynı hedefe giderken buldukları yolların kısalması), afetzedelere en kısa zamanda müdahale edilmesi açısından kritik bir öneme sahip olup, geliştirilen algoritma bu açıdan değerlendirildiği takdirde de literatür ve gerçek hayat uygulamalarına önemli derecede katkı sağlaması beklenmektedir.

Tezde geliştirilen algoritma, bir çoklu geçiş algoritması olup, bu tür algoritmalar, yol bulma problemlerinde özellikle birden fazla alternatif yolun olduğu durumlarda kritik bir öneme sahiptir. Aynı arena üzerinde yapılan art arda çalıştırmalar, farklı kriterlerle birden çok yol alternatifi üretir. Bundan dolayı, uygulama alanına bağlı olarak farklılık gösterse de bazı kısıtlar altında optimum çözümler elde edilebilir.

Geliştirilen algortmada kullanılan ses yüksekliği bilgisinde, uzaklık fonksiyonu Öklid metriği kullanılarak hesaplanmıştır. Alternatif olarak farklı uzaklık metriklerinin algoritma üzerindeki etkisi inceleyebiliriz. Yani, olası ses yüksekliğinin katkısı daha fazla şekilde, uzaklık fonksiyonu değiştirilerek gözlemlenebilir.

İki algoritmanın karşılaştırılmasında kullanılan parametreler, özellikler veya öznitelikler değiştirilerek, etkinliklerinin tartışıldığı başlıklar genişletilebilir.

Engel sayısının değiştirilmesi, optimum parametre ayarlarının hangi aralıkta olması gerektiği gibi başlıklar incelenebilir.

Literatürde yer alan farklı sürü algoritmaları ile geliştirilen algoritmanın karşılaştırması yapılabilir.

Literatürde yer alan standart test fonksiyonları kullanılarak, geliştirilen algoritmanın işlevselliği test edilebilir.

Bazı derin öğrenme veya pekiştirmeli yinelemeli öğrenme gibi yöntemler kullanılarak algoritmanın öğrenme süreci geliştirilerek daha etkin bir şekilde çalışıp çalışmadığı incelenebilir.



KAYNAKLAR

- Brenes-Torres, J. C., Blanes, F. & Simo, J. (2022). Magnetic trails: A novel artificial pheromone for swarm robotics in outdoor environments. *Computation*, 10(6), 98. <https://doi.org/10.3390/computation10060098>
- Cardona, G. A. & Calderon, J. M. (2019). Robot swarm navigation and victim detection using rendezvous consensus in search and rescue operations. *Applied Sciences*, 9(8), 1702. <https://doi.org/10.3390/app9081702>
- Casper, J. & Murphy, R. R. (2003). Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the World Trade Center. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 33(3), 367-385. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2003.811794>
- Chitikena, H., Sanfilippo, F. & Ma, S. (2023). Robotics in search and rescue (sar) operations: An ethical and design perspective framework for response phase. *Applied Sciences*, 13(3), 1800. <https://doi.org/10.3390/app13031800>
- Couceiro, M. S., Vargas, P. A., Rocha, R. P. & Ferreira, N. M. (2014). Benchmark of swarm robotics distributed techniques in a search task. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(2), 200-213. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.10.004>
- Cruz Ulloa, C., Prieto Sánchez, G., Barrientos, A. & Del Cerro, J. (2021). Autonomous thermal vision robotic system for victims recognition in search and rescue missions. *Sensors*, 21(21), 7346. <https://doi.org/10.3390/s21217346>
- Dadgar, M., Jafari, S. & Hamzeh, A. (2016). A PSO-based multi-robot cooperation method for target searching in unknown environments. *Neurocomputing*, 177, 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.11.007>
- De Cubber, G., Serrano, D., Berns, K., Chintamani, K., Sabino, R., Ourevitch, S., Doroftei, D., Armbrust, C., Flamma, T. & Baudoin, Y. (2013, October). Search and rescue robots developed by the European ICARUS project. In *7th Int. Workshop on Robotics for Risky Environments*.
- Deng, W., Xu, J. & Zhao, H. (2019). An improved ant colony optimization algorithm based on hybrid strategies for scheduling problem. *IEEE access*, 7, 20281-20292. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2897580>
- Dijkstra, E. W. (1959). A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269-271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- Doctor, S., Venayagamoorthy, G. K. & Gudise, V. G. (2004, June). Optimal PSO for collective robotic search applications. In *Proceedings of the 2004 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 04TH8753)* (Vol. 2, pp. 1390-1395). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CEC.2004.1331059>
- Dorigo, M., Maniezzo, V. & Coloni, A. (1991). Positive feedback as a search strategy. *Technical report*, 91-016, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Milano, Italy.
- Dorigo, M., Maniezzo, V. & Coloni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part b (cybernetics)*, 26(1), 29-41. <https://doi.org/10.1109/3477.484436>
- Dorigo, M. and Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. The MIT Press, Cambridge, 305 p.
- Dorigo, M., Birattari, M. & Stützle, T. (2006). Ant colony optimization artificial ants as a computational intelligence technique. *IEEE computational intelligence magazine*, 1(4), 28-39. <https://doi.org/10.1109/MCI.2006.329691>

- Doroodgar, B., Liu, Y. & Nejat, G. (2014). A learning-based semi-autonomous controller for robotic exploration of unknown disaster scenes while searching for victims. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 44(12), 2719-2732. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2014.2314294>
- Drew, D. S. (2021). Multi-agent systems for search and rescue applications. *Current Robotics Reports*, 2, 189-200. <https://doi.org/10.1007/s43154-021-00048-3>
- Farinelli, A., Iocchi, L. & Nardi, D. (2004). Multirobot systems: a classification focused on coordination. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 34(5), 2015-2028. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2004.832155>
- Feng, Q., Cai, H., Li, F., Liu, X., Liu, S. & Xu, J. (2019). An improved particle swarm optimization method for locating time-varying indoor particle sources. *Building and environment*, 147, 146-157. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.008>
- Finzi, A. & Orlandini, A. (2005, September). Human-robot interaction through mixed-initiative planning for rescue and search rovers. In *Congress of the Italian Association for Artificial Intelligence* (pp. 483-494). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11558590_49
- Fossum, F., Montanier, J. M. & Haddow, P. C. (2014, December). Repellent pheromones for effective swarm robot search in unknown environments. In *2014 IEEE Symposium on Swarm Intelligence* (pp. 1-8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SIS.2014.7011802>
- Fujisawa, R., Dobata, S., Sugawara, K. & Matsuno, F. (2014). Designing pheromone communication in swarm robotics: Group foraging behavior mediated by chemical substance. *Swarm Intelligence*, 8, 227-246. <https://doi.org/10.1007/s11721-014-0097-z>
- Hamann, H. & Wörn, H. (2007). An analytical and spatial model of foraging in a swarm of robots. In *Swarm Robotics: Second International Workshop, SAB 2006, Rome, Italy, September 30-October 1, 2006, Revised Selected Papers 2* (pp. 43-55). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71541-2_4
- Hunt, E. R., Jones, S. & Hauert, S. (2019). Testing the limits of pheromone stigmergy in high-density robot swarms. *Royal Society open science*, 6(11), 190225. <https://doi.org/10.1098/rsos.190225>
- Husain, Z., Al Zaabi, A., Hildmann, H., Saffre, F., Ruta, D. & Isakovic, A. F. (2022). Search and rescue in a maze-like environment with Ant and Dijkstra algorithms. *Drones*, 6(10), 273. <https://doi.org/10.3390/drones6100273>
- INSARAG Guidelines, Volume II Preparedness and Response, Manual A Capacity Building (2020), <https://insarag.org/wp-content/uploads/2021/09/INSARAG20Guidelines20Vol20II2C20Man20A.pdf> adresinden 28 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.
- Ioannidis, K., Sirakoulis, G. C. & Andreadis, I. (2011). Cellular ants: A method to create collision free trajectories for a cooperative robot team. *Robotics and Autonomous Systems*, 59(2), 113-127. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2010.10.004>
- Kennedy, J. & Eberhart, R. (1995, November). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Khaliq, A. A. & Saffiotti, A. (2015, May). Stigmergy at work: Planning and navigation for a service robot on an RFID floor. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 1085-1092). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139311>
- Kim, Y. K. & Sohn, H. G. (2018). Disaster theory. *Disaster risk management in the Republic of Korea*, 23-76. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4789-3_2

- Ko, A. W. & Lau, H. Y. (2009). Intelligent robot-assisted humanitarian search and rescue system. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 6(2), 121-128. <https://doi.org/10.5772/6792>
- Krentz, T., Greenhagen, C., Roggow, A., Desmond, D. & Khorbotly, S. (2015, September). A modified ant colony optimization algorithm for implementation on multi-core robots. In *2015 Swarm/Human Blended Intelligence Workshop (SHBI)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SHBI.2015.7321683>
- Kuiper, E. & Nadjm-Tehrani, S. (2006, July). Mobility models for UAV group reconnaissance applications. In *2006 International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'06)* (pp. 33-33). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICWMC.2006.63>
- Kumar, A. S., Manikutty, G., Bhavani, R. R. & Couceiro, M. S. (2017, September). Search and rescue operations using robotic darwinian particle swarm optimization. In *2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)* (pp. 1839-1843). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2017.8126112>
- Liu, Y. & Nejat, G. (2013). Robotic urban search and rescue: A survey from the control perspective. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 72, 147-165. <https://doi.org/10.1007/s10846-013-9822-x>
- Mano, H., Kon, K., Sato, N., Ito, M., Mizumoto, H., Goto, K., Chatterjee, R. & Matsuno, F. (2009, February). Treaded control system for rescue robots in indoor environment. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* (pp. 1836-1843). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2009.4913281>
- Mendonça, M., Palácios, R. H., Papageorgiou, E. I. & de Souza, L. B. (2020, July). Multi-robot exploration using dynamic fuzzy cognitive maps and ant colony optimization. In *2020 IEEE international conference on fuzzy systems (FUZZ-IEEE)* (pp. 1-8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FUZZ48607.2020.9177814>
- Merkle, D., Middendorf, M. & Schmeck, H. (2002). Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(4), 333-346. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2002.802450>
- Na, S., Qiu, Y., Turgut, A. E., Ulrich, J., Krajník, T., Yue, S., Lennox, B. & Arvin, F. (2021). Bio-inspired artificial pheromone system for swarm robotics applications. *Adaptive Behavior*, 29(4), 395-415. <https://doi.org/10.1177/1059712320918936>
- Opiyo, S., Zhou, J., Mwangi, E., Kai, W. & Sunusi, I. (2021). A review on teleoperation of mobile ground robots: Architecture and situation awareness. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 19, 1384-1407. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0999-z>
- Paez, D., Romero, J. P., Noriega, B., Cardona, G. A. & Calderon, J. M. (2021). Distributed particle swarm optimization for multi-robot system in search and rescue operations. *IFAC-PapersOnLine*, 54(4), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.001>
- Payton, D., Daily, M., Estowski, R., Howard, M. & Lee, C. (2001). Pheromone robotics. *Autonomous Robots*, 11, 319-324. <https://doi.org/10.1023/A:1012411712038>
- Pu, X., Song, X., Tan, L. & Zhang, Y. (2024). Improved ant colony algorithm in path planning of a single robot and multi-robots with multi-objective. *Evolutionary Intelligence*, 17(3), 1313-1326. <https://doi.org/10.1007/s12065-023-00821-7>
- Rafael, V. M., Caceres, J., Abel, A. H., Montoya, A., Guevara, J., Jarelh, G. B. & Talavera, J. (2022). Development of a low-cost teleoperated explorer robot (TXRob). *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(7), 897-903. <https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2022.01307104>

- Russell, R. A. (1999, May). Ant trails-an example for robots to follow?. In *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 99CH36288C)* (Vol. 4, pp. 2698-2703). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1999.774005>
- Salman, M., Garzón Ramos, D., Hasselmann, K. & Birattari, M. (2020). Phormica: Photochromic pheromone release and detection system for stigmergic coordination in robot swarms. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 591402. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.591402>
- Shimizu, T., Hayashi, S., Midorikawa, T., Fujikawa, T., Takane, E., Watanabe, M., Tadakuma, K., Konyo, M. & Tadokoro, S. (2019, September). Small swarm search robot system with rigid-bone parachute rapidly deployable from aerial vehicles. In *2019 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)* (pp. 88-93). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2019.8848955>
- Stormont, D. P. (2005, March). Autonomous rescue robot swarms for first responders. In *CIHSPS 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Homeland Security and Personal Safety, 2005.* (pp. 151-157). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CIHSPS.2005.1500631>
- Tang, H., Cao, X., Song, A., Guo, Y. & Bao, J. (2009, August). Human-robot collaborative teleoperation system for semi-autonomous reconnaissance robot. In *2009 International Conference on Mechatronics and Automation* (pp. 1934-1939). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2009.5246589>
- Tang, Q., Xu, Z., Yu, F., Zhang, Z. & Zhang, J. (2019). Dynamic target searching and tracking with swarm robots based on stigmergy mechanism. *Robotics and Autonomous Systems*, 120, 103251. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103251>
- Tang, Q., Yu, F., Zhang, Y. & Zhang, J. (2020). A stigmergetic method based on vector pheromone for target search with swarm robots. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 32(3), 533-555. <https://doi.org/10.1080/0952813X.2019.1653384>
- Tang, J., Liu, G. & Pan, Q. (2021). A review on representative swarm intelligence algorithms for solving optimization problems: Applications and trends. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8(10), 1627-1643. <https://doi.org/10.1109/JAS.2021.1004129>
- Theraulaz, G. & Bonabeau, E. (1999). A brief history of stigmergy. *Artificial life*, 5(2), 97-116. <https://doi.org/10.1162/106454699568700>
- Trianni, V., Labella, T. H. & Dorigo, M. (2004). Evolution of direct communication for a swarm-bot performing hole avoidance. In *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence: 4th International Workshop, ANTS 2004, Brussels, Belgium, September 5-8, 2004. Proceedings 4* (pp. 130-141). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-28646-2_12
- Turduev, M., Cabrita, G., Kirtay, M., Gazi, V. & Marques, L. (2014). Experimental studies on chemical concentration map building by a multi-robot system using bio-inspired algorithms. *Autonomous agents and multi-agent systems*, 28, 72-100. <https://doi.org/10.1007/s10458-012-9213-x>
- Türk Dil Kurumu (TDK) (2025). <https://sozluk.gov.tr/> adresinden 28 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.
- Ventura, R. & Lima, P. U. (2012, September). Search and rescue robots: The civil protection teams of the future. In *2012 Third International Conference on Emerging Security Technologies* (pp. 12-19). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EST.2012.40>
- Wang, G., Wang, W., Ding, P., Liu, Y., Wang, H., Fan, Z., Bai, H., Hangbiao, Z. & Du, Z. (2023). Development of a search and rescue robot system for the underground building environment. *Journal of field robotics*, 40(3), 655-683. <https://doi.org/10.1002/rob.22152>

- Wu, L., You, X. & Liu, S. (2023). Multi-ant colony algorithm based on cooperative game and dynamic path tracking. *Computer Networks*, 237, 110077. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.110077>
- Yan, Z., Jouandeau, N. & Cherif, A. A. (2013). A survey and analysis of multi-robot coordination. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(12), 399. <https://doi.org/10.5772/57313>
- Yingying, D., Yan, H. & Jingping, J. (2003, April). Multi-robot cooperation method based on the ant algorithm. In *Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium. SIS'03 (Cat. No. 03EX706)* (pp. 14-18). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SIS.2003.1202241>
- Zibulewsky, J. (2001, April). Defining disaster: The emergency department perspective. In *Baylor University Medical Center Proceedings* (Vol. 14, No. 2, pp. 144-149). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/08998280.2001.11927751>
- Zitouni, F., Harous, S. & Maamri, R. (2020). A distributed approach to the multi-robot task allocation problem using the consensus-based bundle algorithm and ant colony system. *IEEE Access*, 8, 27479-27494. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971585>

