



**SÜRÜ ROBOTİĞİNDE ÖZ ÖRGÜTLENEBİLİR
BİR ARAYA GELME DAVRANIŞI İÇİN
YENİ YAKLAŞIMLAR
OĞUZ MISIR**

**DOKTORA TEZİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
Dr. Öğr. Üyesi LEVENT GÖKREM
Nisan - 2021
Her hakkı saklıdır**

**T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**SÜRÜ ROBOTİĞİNDE ÖZ ÖRGÜTLENEBİLİR
BİR ARAYA GELME DAVRANIŞI İÇİN
YENİ YAKLAŞIMLAR
OĞUZ MISIR**

OĞUZ MISIR

TOKAT
Nisan - 2021

Her hakkı saklıdır

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Oğuz MISIR

21 NİSAN 2021

ÖZET
DOKTORA TEZİ
SÜRÜ ROBOTİĞİNDE ÖZ ÖRGÜTLENEBİLİR BİR ARAYA GELME
DAVRANIŞI İÇİN YENİ YAKLAŞIMLAR

OĞUZ MISIR
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ LEVENT GÖKREM

Bu tez çalışmasında sürü robotiğinde öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı için bir algoritma ve iki farklı metot geliştirilmiştir. Geliştirilen bir araya gelme algoritması sürü robotlarının esnek ve ölçeklenebilir bir şekilde toplanma davranışının sergilemesini sağlamaktadır. Bir araya gelme algoritmasının, esnek ve ölçeklenebilirliğini değerlendirmek için farklı arena boyutlarında, farklı robot sayısında ve farklı algılama yarıçaplarında sistematik simülasyonlar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, robot sayısı, arena boyutu ve algılama yarıçaplarına göre istatistiksel olarak incelenmiştir. Geliştirilen metotlardan biri bulanık mantık tabanlı öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışıdır. Metot sürü robotlarının az sayıda sensör girdilerini bulanık mantık kurallarıyla değerlendirir ve bir araya gelme davranışını sergilemesini sağlar. Bulanık mantık tabanlı metodun performansını değerlendirmek için gürültülü ve gürültüsüz sistematik simülasyonlar uygulanmıştır. Bu simülasyonlar farklı arena boyutlarında, farklı sayıda robotlarla ve farklı algılama alanı boyutlarında uygulanmıştır. Geliştirilen metotlardan ikincisi, dinamik etkileşimli öz örgütlenebilir bir araya gelme metodudur. Bu metot sürü robotlarının sahip olduğu, engel ve robot algılama sensörlerini kullanarak bir durum seçici yardımıyla bir araya gelme davranışını sergilemeyi amaçlar. Durum seçici, sürü robotlarının bir araya gelme davranışını sergilemeleri için üç farklı kontrolcüden hangisinin çalıştırılacağına karar verir. Bu kontrolcüler sürü robotlarının yaklaşma ve hizalama, engelden kaçma ve rastgele hareket etmelerini sağlamaktadır. Metotta kullanılan kontrol birimleri sürü robotlarının komşu robotlarla aralarında dinamik etkileşim yapısı sunar. Dinamik etkileşimli bir araya gelme davranışını performansını değerlendirmek için arena boyutuna, robot sayısına ve algılama yarıçapına göre sistematik simülasyonlar uygulanmıştır. Bir araya gelme metodunun performansını ölçmek için literatürde kullanılan üç farklı toplanma ölçütü kullanılmıştır. Geliştirilen bir araya gelme davranışı metodunun toplanma ölçütleri literatürdeki diğer iki metotlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda, dinamik etkileşimli bir araya gelme davranışı metodunun performansının, diğer metotlara göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

2021, 122 Sayfa

ANAHTAR KELİMELER: Bir Araya Gelme, Bulanık Mantık, Engelden Kaçma, Mobil Robotlar, Öz Örgütlenebilir, Sürü robotiği, Toplanma.

ABSTRACT
PhD THESIS
NEW APPROACHES FOR SELF-ORGANIZING AGGREGATION BEHAVIOR
IN SWARM ROBOTICS
OĞUZ MISİR
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
DEPARTMENT OF MECHATRONICS ENGINEERING
SUPERVISOR: Asst. Prof. Dr. LEVENT GÖKREM

In this thesis, an algorithm and two different methods have developed for self-organizing aggregation behavior in swarm robotics. The algorithm developed enables swarm robots to exhibit a flexible and scalable aggregation behavior. To evaluate the flexibility and scalability of the aggregation algorithm, systematic simulations have carried out in different arena sizes, different numbers of robots and different sensing radii. The obtained results have statistically analyzed according to the number of robots, arena size and sensing radii. One of the developed methods is fuzzy logic-based self-organizing aggregation behavior. The method allows swarm robots to evaluate a small number of sensor inputs with fuzzy logic rules and to exhibit aggregation behavior. Noisy and noiseless systematic simulations have applied to evaluate the performance of the fuzzy logic-based method. These simulations have applied with different arena sizes, different numbers of robots and different sensing area sizes. The second method is dynamically interactive self-organizing aggregation method. This method aims to exhibit the aggregation behavior with the help of a state selector by using the obstacle and robot detection sensors that swarm robots have. The status selector decides which of the three different controllers to operate for the swarm robots to exhibit the aggregation behavior. These controllers allow swarm robots to approach and alignment, avoid obstacle, and move randomly. The control units used in the method offer a dynamic interaction structure between swarm robots and neighboring robots. Systematic simulations have applied according to arena size, number of robots and sensing radius to evaluate the performance of dynamic interactive aggregation behavior. Three different aggregation metrics used in the literature have used to measure the performance of the aggregation method. The aggregation metrics of a developed method have compared with the other two methods in the literature. As a result of the comparisons, it has observed that the performance of the dynamic interacting aggregation behavior method is more successful than the other methods.

2021, 122 Page

KEY WORDS: Aggregation, Fuzzy Logic, Mobile Robotics, Obstacle avoidance, Self-organizing, Swarm robotics.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince emeği, rehberliği ve desteği ile bana her zaman yol gösteren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Levent GÖKREM’e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince her an yanımda olan, sabır eden ve desteklerini bir an bile esirgemeyen, bu süreç boyunca ihmal etmiş olduğum eşime, anneme, babama ve kardeşlerime teşekkürlerimi sunarım.

Aileme;

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1 Yapay Fizik Yaklaşımı	7
2.2 Olasılıklı Yaklaşım	8
2.3 Evrimsel Yaklaşımlar	9
2.4 Diğer Kontrol Algoritmaları	10
2.5 Sürü Robot Modelleri ve Uygulamaları.....	11
2.6 Simülasyonlar	14
3. MATERYAL YÖNTEM	15
3.1. Bir Araya Gelme Problemi.....	15
3.2. Robot Kinematik Model.....	17
3.3. Esnek ve Ölçeklenebilir Öz Örgütlenebilir Bir Araya Gelme Algoritması	21
3.4. Bulanık Mantık Tabanlı Öz Örgütlenebilir Bir Araya Gelme Metodu.....	29
3.5. Dinamik Etkileşimli Öz Örgütlenebilir Bir Araya Gelme Metodu	38
3.5.1. Durum seçici	39
3.5.2. Yaklaşma ve hizalama	40
3.5.3. Rastgele hareket.....	42
3.5.4. Engelden kaçma	42
3.6. Performans Ölçütleri	43
3.6.1. Toplam mesafe (TM)	43
3.6.2. Beklenen kümelenme boyutu (BKB).....	44
3.6.3. Kümelenme metriği (KM)	45
3.6.4. Toplanma süresi	45
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	47

4.1. Esnek ve Ölçeklenebilir Öz Örgütlenebilir Bir Araya Gelme Algoritması Sonuçları	47
4.1.1. Simülasyon kurulumu	47
4.1.2. Simülasyon sonuçları	49
4.1.3. İstatistiksel analiz.....	63
4.1.4. Algılama yarıçapına göre toplanma süresinin istatistiksel analizi	63
4.1.5. Robot sayısına göre toplanma süresinin istatistiksel analizi	64
4.1.6. Arena boyutuna göre toplanma süresinin istatistiksel analizi	65
4.2. BMD Tabanlı Öz Örgütlenebilir Bir Araya Gelme Metodu Sonuçları	67
4.2.1. Simülasyon kurulumu	67
4.2.2. Gürültüsüz simülasyon sonuçları	69
4.2.3. Gürültü etkisi sonuçları	78
4.3. Dinamik Etkileşimli Öz Örgütlenebilir Bir Araya Gelme Metodu Sonuçları..	84
4.3.1. Simülasyon kurulumu	84
4.3.2. Beklenen kümelenme boyutu (BKB) ölçütü sonuçları	86
4.3.3. Toplam mesafe (TM) ölçütü sonuçları	89
4.3.4. Kümelenme metriği (KM) sonuçları	92
5. SONUÇ	98
6. KAYNAKLAR	102
7. ÖZGEÇMİŞ	108

SİMGE VE KISALTMLAR

Simgeler	Açıklama
$R_{M,r,n}$	Robot algılama uzaklığı
$\theta_{R,r,n}$	Robot algılama açısı
$\emptyset_{r,n}$	Robot baş açısı
$O_{M,r,n}$	Engel algılama uzaklığı
$\theta_{O,r,n}$	Engel algılama açısı
$R(\theta)$	Ortagontal döndürme matrisi
ζ	Robotun pozisyon bilgisi
x	Robotun yatay pozisyonu
y	Robotun dikey pozisyonu
θ	Robotun nispi açısı
L	Robotun teker-teker çapı
v_r	Robot hızı
ω_r	Robotun açısal hızı
R	Robot teker çapı
θ_{ortr}	Nispi açı ortalaması
$\emptyset_{yönr}$	Ortak yön baş açısı
$\emptyset_{madr}$	Baş açılarının mutlak medyan sapması
$\emptyset_{ortanca_r}$	Baş açısı ortanca değeri
$\emptyset_{enk_r}$	En küçük, baş açısı

$engel_{uzaklık_r}$	Engel uzaklığı değeri
$engel_{açı_r}$	Engel açısı ortalama değeri
$\emptyset_{fark_r}$	Açı farkı değeri
$\emptyset_r$	r . numaralı robotun baş açısı
k_1	Hız katsayısı
R_i	i . Komşu robotun uzaklığı
n	Robot sayısı
R_M	Ağılık merkezi değeri
p	Olasılık değeri
v_{mak}	Maksimum hız

Kısaltmalar

Açıklama

DW-KNN	Distance-Weighted K Nearest Neighboring
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamic
SDM	Sonlu Durum Makinesi
GPS	Küresel Konumlama Sistemi
GRÇ	Global Referans Çerçevesi
YRÇ	Yerel Referans Çerçevesi
MAD	Mutlak Medyan Sapması
BMD	Bulanık Mantık Denetleyici
BAS	Bulanık Arayüz Sistemi
DEB	Dinamik Etkileşimli Bir araya gelme

TM	Toplam Mesafe
BKB	Beklenen Kümelenme Boyutu
KM	Kümelenme Metriği
YSA	Yapay Sinir Ağları



ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2. 1. Bir araya gelme davranışı sergileyen sosyal böcek örnekleri.....	5
Şekil 2.2. Öz-örgütlenebilir bir araya gelme davranışı örneği.....	10
Şekil 2.3. (a) Kilobot (Rubenstein ve ark., 2014), (b) S-bot (Gro ve ark., 2006), (c) R-One (McLurkin ve ark., 2012), (d) E-puck (Nemec ve ark., 2017), (e) Alice (Arvin ve ark., 2014a), (f) Khepera IV (Farias ve ark., 2017), (g) Thymio (Vitanza ve ark., 2019) robot model örnekleri.....	12
Şekil 3.1. İki tekerlekli diferansiyel tahrikli robot modeli.....	18
Şekil 3.2. İki tekerlekli diferansiyel tahrikli robot modeli.....	19
Şekil 3.3. Öz örgütlenebilir bir araya gelme algoritması için kullanılan sürü robot modelinin sensör özellikleri ve robot hareket platformu için tanımlamalar.....	21
Şekil 3.4. Komşu robot algılama senaryosu	22
Şekil 3.5. Üç sürü robotunun birbirlerini algılama senaryosu	24
Şekil 3.6. Bir araya gelme davranışı döngüsü.....	25
Şekil 3.7. $\emptyset_{yön_r}$ sözde kod	27
Şekil 3.8. Üç aşamalı bulanık karar yapısı.....	30
Şekil 3.9. BMD tabanlı öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı metodu akış diyagramı	31
Şekil 3.10. $R_{M_{r,n}}$ ve $\emptyset_{median_r}$ bulanık giriş değişkenleri için üyelik fonksiyonları.....	32
Şekil 3.11. v_r ve ω_r bulanık çıkış değişkenleri için üyelik fonksiyonları	33
Şekil 3.12. $R_{M_{r,n}}$ ve $\emptyset_{diff_r}$ bulanık giriş değişkenleri için üyelik fonksiyonları	34
Şekil 3.13. $O_{M_{r,n}}$ ve $\theta_{O_{r,n}}$ bulanık giriş değişkenleri için üyelik fonksiyonları	35
Şekil 3.14. Aşama-3 için v_r ve ω_r bulanık çıkış değişkenlerinin üyelik fonksiyonları	36
Şekil 3.15. DEB sistem blok yapısı	38
Şekil 3.16. Durum seçici karar yapısı	40
Şekil 3.17. YRÇ ‘ye göre yaklaşma ve hizalama hareket dağılımı.....	41
Şekil 4.1. Simülasyon deney platformu ve robot.....	49
Şekil 4.2. Sırasıyla 5,10,15 ve 20 sürü robotunun 15x15, 20x20, 25x25 birim kare alanlar için 5 birim algılama yarıçaplarına bağlı toplanma süreleri	50

Şekil 4.3. 5,10,15 ve 20 sürü robotunun 15x15, 20x20, 25x25 birim kare alanlar için 6 birim algılama yarıçaplarına bağlı toplanma süreleri	51
Şekil 4.4. 5,10,15 ve 20 sürü robotunun 15x15, 20x20, 25x25 birim kare alanlar için 7 birim algılama yarıçaplarına bağlı toplanma süreleri	52
Şekil 4.5. 15x15 arena için 5 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları	53
Şekil 4.6. 20x20 arena için 5 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları	54
Şekil 4.7. 25x25 arena için 5 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları	55
Şekil 4.8. 15x15 arena için 6 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları	56
Şekil 4.9. 20x20 arena için 6 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları	57
Şekil 4.10. 25x25 arena için 6 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları	58
Şekil 4.11. 15x15 arena için 7 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları	59
Şekil 4.12. 20x20 arena için 7 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları	60
Şekil 4.13. 25x25 arena için 7 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları	61
Şekil 4.14. 20x20 arena boyutunda 6 birim algılama yarıçapında 15 robot için örnek bir araya gelme süreci	62
Şekil 4.15. BMD metodunda kullanılan sürü robot ve algılama özellikleri	68
Şekil 4.16. BMD metodunun arena boyutlarına göre YRÇ 6 birim için toplanma süresi	70
Şekil 4.17. BMD metodunun arena boyutlarına göre YRÇ 7 birim için toplanma süresi	71
Şekil 4.18. BMD metodunun arena boyutlarına göre YRÇ 8 birim için toplanma süresi	72
Şekil 4.19. YRÇ 6 birim sürü robotları için KM sonuçları.....	74

Şekil 4.20. YRÇ 7 birim sürü robotları için KM sonuçları.....	75
Şekil 4.21. YRÇ 8 birim sürü robotları için KM sonuçları.....	77
Şekil 4.22. YRÇ 6 için gürültü deney sonuçları	79
Şekil 4.23. YRÇ 7 için gürültü deney sonuçları	80
Şekil 4.24. YRÇ 8 için gürültü deney sonuçları	81
Şekil 4.25. Gürültü ve gürültüsüz simülasyonların karşılaştırılması	82
Şekil 4.26. 30x30 boyutundaki arenada 20 robot için bir araya gelme örneği ve performans ölçümleri	83
Şekil 4.27. DEB metodunun uygulandığı sürü robotunun hareket platformu	85
Şekil 4.28. YRÇ 3 birim için BKB ölçütü karşılaştırılması.....	87
Şekil 4.29. YRÇ 4 birim için BKB ölçütü karşılaştırılması.....	89
Şekil 4.30. YRÇ 3 birim için TM ölçütü karşılaştırması	90
Şekil 4.31. YRÇ 4 birim için TM ölçütü karşılaştırması	91
Şekil 4.32. YRÇ 3 birim için KM ölçütü karşılaştırması.....	93
Şekil 4.33. YRÇ 4 birim için KM ölçütü karşılaştırması.....	94
Şekil 4.34. 50x50 arenada YRÇ 3 birim yarı çaplı sürü robotlarıyla uygulanan simülasyon	95
Şekil 4.35. 50x50 arenada YRÇ 3 birim yarı çaplı sürü robotlarıyla uygulanan simülasyon	96
Şekil 4.36. 60x60 arenada YRÇ 4 birim yarı çaplı sürü robotlarıyla uygulanan simülasyon	97

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1. Robot ve engel algılama sensörleri.....	17
Çizelge 2. Aşama-1 ve Aşama-2 BMD kuralları.....	33
Çizelge 3. Engelden kaçma bulanık mantık kuralları	37
Çizelge 4. Esnek ve ölçeklenebilir öz örgütlenebilen bir araya gelme algoritması simülasyon kurulumu.....	47
Çizelge 5. Algılama yarıçapına göre Tamhane testi analiz sonuçları.....	64
Çizelge 6. Robot sayısına göre Tamhane testi analiz sonuçları.....	65
Çizelge 7. Robot sayısına göre Tamhane testi analiz sonuçları.....	66
Çizelge 8. Sistematik Deney Parametreleri	69
Çizelge 9. Sistematik simülasyon deney parametreleri	85
Çizelge 10. Sistematik deneylerde uygulanan adım sayısı	86

1. GİRİŞ

Sürü robotiği yaklaşımı; doğada iş birliği halinde davranış sergileyen bakteriler, böcekler gibi canlılardan esinlenerek ortaya çıkmıştır. Doğada sürü halinde yaşayan bu canlılar, kendi aralarında koordineli bir şekilde, bir araya gelme (Aggregation), akın etme (Flocking), yem arama (Foraging), desen oluşturma (Pattern Formation) gibi esnek, ölçeklenebilir ve sağlam (Robust) karakteristik davranışlar sergilemektedirler (Bayındır, 2016). Canlılar bu davranışları, kendi aralarında ve çevreleriyle etkileşim kurarak yapmaktadırlar. Sürü robotiği yaklaşımı, doğadaki canlıların davranışlarından ilham alınarak, birçok sayıda, basit özelliğe sahip robotlara, bu davranışları uygulamayı amaçlamaktadır (Bayındır ve Şahin, 2007). Sürü robotiği, bir görevi üstün yeteneklere sahip birkaç robotun gerçekleştirmesinden farklı olarak, sınırlı ve basit yeteneklere sahip benzer robotlarla gerçekleştirmeyi amaçlayan bir yaklaşımdır (Trianni ve ark., 2003).

Sürü robotiği yaklaşımının diğer çoklu robot yaklaşımlarına göre avantajı; biyo-esin temelli, yani ölçeklenebilir, esnek ve sağlam bir davranış sergileyebilmesidir (Heinrich ve ark., 2019). Sürü robotlarının ölçeklenebilir davranış sergilemesi, icra ettikleri görevleri yerine getirirken, farklı robot sayılarında da bu davranışı yerine getirmesidir. Esneklik, sürü robotlarının sergiledikleri davranışı değişen çevre koşullarına rağmen uygulamasıdır (Nedjah ve Junior, 2019). Sağlamlık ise, sürü robotlarının sergiledikleri davranış süresince robotların biri ya da birkaçı çalışamayacak durumda olsa dahi bu davranışı sergilemeye devam etmesidir. Sürü robotiği araştırmaları, genellikle doğadaki kolektif canlıların işbirlikçi davranışlarına odaklanmaktadır (Bayındır ve Şahin, 2007). Bu davranışlar arasında canlıların kendi kendine organizasyonu karmaşık görevlerin icrasında oldukça dikkat çekici olmuştur.

Sürü robotları için uygulanan davranışlarda robotlar, algıladıkları komşu robotlara ve çevredeki değişimlere göre hareketlerini belirlemektedirler. Kolektif canlılarda olduğu gibi sürü robotlarının da bir merkezi kontrolcü tarafından kontrol edilmemesi benimsenmektedir (Coppola ve ark., 2019; Şahin, 2005). Ayrıca tek bir sürü robotunun bir görevi tek başına başaramayacak yetenekte olması istenir (Şahin, 2005).

Sürü robotları hareketlerini, kısıtlı algılama ve haberleşme özellikleri sayesinde gerçekleştirirler (Dorigo ve ark., 2004). Her bir sürü robotunda temel olarak, komşu robotları algılaması için bir haberleşme donanımı, çevresindeki engellere ve robotlara çarpışmasından kaçınması için de engel algılama donanımı bulunur. Sürü robotları, amaçladıkları görevleri yerine getirirken küresel bir bilgi ile etkileşim yerine yerel etkileşimler yoluyla iş birliği yapar. Bu yüzden algılama donanımları nispeten sınırlı bir alan içinde geçerlidir. Her bir robotun yerel etkileşimler yoluyla kendi organizasyonlarını kendilerinin belirlemesi, robotların karmaşık görevler karşısında güçlü başarımlarını ortaya çıkarır (Tan ve Zheng, 2013).

Sürü robotiği araştırmaları, genellikle doğadaki kolektif canlıların işbirlikçi davranışlarına odaklanmaktadır (Bayındır ve Şahin, 2007). Sürü robotiği araştırmalarında odaklanılan kolektif davranışlar için bir araya gelme, akın, yem arama, toplu karar verme (Collective Decision) (Prasetyo ve ark., 2019), koordineli hareket (Cordinated Movement), görev dağılımı (Task Allocation) örnek olarak verilebilir (Mayya ve ark., 2019; Talamali ve ark., 2020; Turgut ve ark., 2008; Zhao ve ark., 2018).

Sürü robotiği alanında yapılan çalışmalar bir araya getirilerek sürü robotiği davranışları oluşturulmuştur. Bu davranışlardan dikkat çekenler desen oluşumu, yem arama, kendi kendine montaj (Self-Assembly), bir araya gelme, akın etme olarak sınıflandırılabilir (Brambilla ve ark., 2013; Dudek ve ark., 1993; Soysal ve Şahin, 2005)

Desen oluşturma, sürü robotlarının belirli bir görevi yerine getirirken, robotların birlikte belirli bir desen oluşturarak hedefe yönelmesini içeren bir davranıştır (Zhang ve ark., 2018). Bu davranış bakteri kolonileri ve moleküllerin dağılımı gibi desen oluşumlarından esinlenerek ortaya çıkmıştır (Oh ve ark., 2017). Yem arama davranışı, karıncalar ve sosyal böceklerde gözlemlenen yemi arama, bulma ve yuvaya getirme davranışından esinlenerek ortaya çıkmıştır (Nedjah ve Junior, 2019). Bu davranış, sürü robotlarına belirli bir çevredeki nesnelerin bulunmasını ve geri getirilmesini amaçlayan bir görevdir (Song ve ark., 2020). Kendi kendine montaj davranışı, modüler robotların bir araya gelip, ek yetenek ve özellikler kazanarak, belirli bir görevi yerine getirmesidir (Groß ve ark., 2006). Robotlar birbirleriyle modüler bir bağlantı kurarak farklı ayarlamalarla bir görev için organizasyon kurabilirler (Yang ve ark., 2019).

Akın etme davranışı, daha çok kuş ve balık sürüleri gibi canlılardan ilham alınarak sürü robotlarının organize bir şekilde ortak bir hedefe aynı yönde hareketi incelenen davranıştır (Bandara ve ark., 2021; Virágħ ve ark., 2014). Bu davranış ile robotların bir uyum içinde bir arada kalarak birbirlerine çarpmadan aynı hızda hareket etmesi amaçlanmaktadır (Reynolds, 1987).

Canlılar hayatta kalmak, yiyecek aramak için genellikle toplanma davranışı sergilerler (Erol ve Ec, 2007; Tang ve ark., 2018). Bir araya gelme davranışı canlıların (sosyal böcekler, bakteriler, balıklar) birçoğunda yaygın olarak rastlanmaktadır (Garnier ve ark., 2008). Canlılarda olduğu gibi rasgele konumlanmış robotların da bir araya getirilmesi bir araya gelme problemi olarak tanımlanmaktadır (Bayındır ve Şahin, 2007). Sürü robotları, sınırlı algılama alanlarıyla yerel etkileşimlerle organizasyonlarını belirlediklerinden dolayı bir araya toplanmaları gerekmektedir (Hu ve ark., 2014). Örneğin sürü robotları, model oluşturma, yem arama, koordineli hareket ve kendi keline montaj gibi davranışları sergilemeleri için birbirlerini algılayacak kadar bir araya gelirler. Bir araya gelme davranışı bu sebepten sürü robotiğinde bir ön koşul davranış olarak yer almaktadır (Gomes ve ark., 2013; Khaldi ve ark., 2019; Yan ve ark., 2011).

Bu tez çalışmasında, sürü robotiğinde ön koşul önemine sahip öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı için bir kontrol algoritması ve iki farklı metot geliştirilmiştir. Tez kapsamında ilk olarak, öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı için esnek ve ölçeklenebilir bir kontrol algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma ile sürü robotlarının bir araya gelmesi için, algılanan komşu robotların açı ve uzaklık bilgilerinden yararlanılmıştır. Aynı zamanda sürü robotlarının uyumlu grup hareketleri ile çevresindeki engellerden ve robotlar arasındaki çarpışmalardan kaçmasını sağlayan bir araya gelme algoritması oluşturulmuştur. Geliştirilen kontrol algoritmasını esnek ve ölçeklenebilirlik bakımından değerlendirmek için farklı algılama alanları, sürüdeki robot sayısı ve robotların hareket ettiği arena boyutları için sistematik simülasyonlar uygulanmış ve incelenmiştir. Bir araya gelme kontrol algoritmasını analiz edebilmek için istatistiksel testler yapılmıştır.

İkinci olarak, kısıtlı algılama özelliklerine sahip sürü robotlarının sensör girdilerini kullanarak bulanık mantık tekniği tabanlı öz örgütlenebilir bir araya gelme metodu geliştirilmiştir. Sürü robotlarının sensör girişlerine uygulanan gürültünün, önerilen bulanık mantık tabanlı bir araya gelme davranışının performansına olan etkisi incelenmiştir. Geliştirilen metodun esnek ve ölçeklenebilirliği, benzetim ortamında, basit özelliklere sahip diferansiyel tahrikli sürü robotları için, farklı algılama alanları, robot sayısı ve arena boyutlarına göre sistematik olarak incelenmiştir. Bulanık mantık tabanlı bir araya gelme metodunun performansı literatürde bulunan farklı bir araya gelme davranışı ölçütleriyle değerlendirilmiştir.

Son olarak, sürü robotlarının dinamik bir şekilde etkileşim kurmasını sağlayan bir araya gelme metodu geliştirilmiştir. Metodun performansı, robotlar arasındaki uzaklık (Total Distance), Kümelenme Ölçeği (Cluster Metrics) ve Beklenen Kümelenme Boyutu (Expected Cluster Size) ölçütleri kullanılarak literatürdeki diğer bir araya gelme metodlarıyla karşılaştırılmıştır.

Bu tez kapsamında, sürü robotığında öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı için esnek, ölçeklenebilir ve sağlam karakteristik özellikleri içeren yeni algoritma ve yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma ve yöntemlerde, nispeten basit algılayıcılara sahip sürü robotlarının öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışını herhangi bir merkezi kontrol biriminin etkisi olmadan komşu robotların davranışlarına bağlı olarak gerçekleştirmesi amaçlanmıştır. Sürü robotlarının bir araya gelme davranışını uygulaması için geliştirilen algoritma ve yöntemler her bir sürü robotunun birbirleri ile işbirliği yapabildiği, birbirinden izole olmuş robot gruplarının dinamik bir şekilde birleşmesini sağlayan, komşu robotların baş açısı, uzaklık ve algılama açısını kullanan gerçek dünya kurallarıyla örtüşen özgün bir kontrol yapısı sunar.

2. GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR TARAMASI

Canlılarda bir araya gelme davranışı, birbirlerine yaklaşıp tek bir küme oluşturmaları şeklinde gözlemlenmektedir (Camazine ve ark., 2001). Bir araya gelme davranışının sergilenmesinin amacı, canlıları çevresindeki tehditlerden koruyarak hayatta kalmalarına yardımcı olmaktadır (Soysal ve Şahin, 2007).

Doğada iki farklı bir araya gelme davranışı ile karşılaşmaktadır (Camazine ve ark., 2001). Bunlar; işaret tabanlı (cue-based) ve öz örgütlenebilir (Self-Organizing) bir araya gelme davranışlarıdır (Arvin ve ark., 2014b; Khaldi ve ark., 2018). Canlılar işaret tabanlı bir araya gelme davranışında sıcaklık, feromon, ışık gibi araçları kullanırken, öz-örgütlenebilir bir araya gelme davranışında herhangi bir aracıyı kullanmaz (Arvin ve ark., 2016; Khaldi ve ark., 2018) Şekil 2.1’de bir araya gelme davranışı sergileyen sosyal böceklerden örnekler gösterilmektedir.



Şekil 2. 1. Bir araya gelme davranışı sergileyen sosyal böcek örnekleri

Sürü robotiğinde işaret tabanlı toplanma, doğada gözlemlenen salgı (feromon), sıcaklık, ışık gibi araçları kullanan sosyal canlıların toplanmalarından ilham almaktadır (Bayındır, 2016). Sürü robotiğinde işaret tabanlı toplanma araştırmaları içerisinde dikkat çeken

alışmalar arasında BEECLUST modeli yer almaktadır (Kernbach ve ark., 2009). BEECLUST modeli işaret tabanlı toplanma davranışına iyi bir örnek olup bu modelde aracı olarak sıcaklık kullanılmıştır. Arvin ve ark., (2016, 2011) alışmalarında bal arılarının belirli bir sıcaklığın olduğu bölgelerde toplanmasını incelemişlerdir. İşaret tabanlı toplanmada bir diğer dikkat çeken aracı ise feromondur. Feromon, özellikle sosyal böceklerde kimyasal etmenler yoluyla iletişim kurmak için kullanılmaktadır (Tang ve ark., 2018).

Arvin ve ark., (2018) alışmasında işaret tabanlı bir araya gelme davranışında BEECLUST algoritmasından yararlanarak feromon tabanlı bir çalışma sunmuşlardır. İlk olarak sistematik bir şekilde işaret tabanlı kümelenme davranışını üzerinde feromonun etkisini incelemişlerdir. BEECLUST temelli “phi-clust” olarak isimlendirilen bir araya gelme modeli önermişlerdir.

Sadeghi Amjadi ve ark., (2021) alışmasında işaret tabanlı bir araya gelme davranışı için bir yöntem önermişlerdir. Karıncaların ve arıların kullandığı gezinme davranışlarından esinlenerek, robotların işarete bağlı olarak nispi konumunu öğrenmelerinde yardımcı olacak ortamdaki bağka işaretlerden yararlanmışlardır. Önerdikleri yöntemin iyi bilinen BEECLUST davranışının dğk robot yoğunluğundaki performansından daha iyi bir sonuç elde ettiklerini rapor etmişlerdir.

Sürü robotiğinde odaklanılan bir araya gelme davranışlarından biri de öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışdır. z örgütlenebilir bir araya gelme davranışı, sürü robotlarının merkezi kontrol birimi olmadan aralarında bir yerel etkileşim kurarak bir araya gelmelerini amaçlayan toplanmadır (Jeanson ve ark., 2005; Khaldi ve ark., 2019; Khaldi ve Cherif, 2016). z örgütlenebilir bir araya gelme davranışı sürü robotiğinde en çok çalışılan alanlar arasındadır. z örgütlenebilir bir araya gelme yaklaşımları yapay fizik, olasılıklı, evrimsel yaklaşımlar ve kontrol algoritmaları şeklinde ayrılmaktadır (Sathiya ve Chinnadurai, 2019)

2.1 Yapay Fizik Yaklaşımı

Yapay fizik yaklaşımını kullanarak bir araya gelme davranışını uygulayan çalışmalarda, robotlar arasındaki etkileşimler, yapay fiziksel kuvvetlerle modellenmektedir. Robotlar arasındaki etkileşimde yapay fiziksel kuvvetler olarak, daha çok çekme ve itme kuvvetleri kullanılmaktadır (Gasparri ve ark., 2012; Leccese ve ark., 2013). Sürü bireylerinin arasındaki uzaklığı yapay fiziksel yaklaşım uygulayarak, uzun mesafede çekme kuvveti, kısa mesafede itme kuvveti şeklinde modellenmektedir (Vanualailai ve Sharma, 2010).

Khaldi ve ark., (2017) yapay fiziksel bağlantılı bir yaklaşımı kullanarak öz örgütlenebilir bir araya gelme metodu önermişlerdir. Önerdikleri çalışmada robotlar arasındaki komşuluk ilişkilerinin belirlenmesinde “Distance-Weighted K Nearest Neighboring” (DW-KNN) yaklaşımını kullanmışlardır. Daha önceki çalışmalarında (Khaldi ve Cherif, 2016) ise DW-KNN’nin belirlenmesinde “Smoothed Particle Hydrodynamic” (SPH) tekniğini kullanarak “K-Nearest Neighboring” (KNN) metodunu geliştirmişlerdir.

Khaldi ve ark., (2018) ‘nin başka bir çalışmasında DW-KNN ‘nin belirlenmesinde robot yoğunluğunu değerlendirerek komşular arasındaki mesafe ağırlıklarını kullanmışlardır. Son zamanlarda yapılan bir çalışmada (Khaldi ve ark., 2019) “Distance- Minkowski, Distance-angular” ve “Distance-Cosine” isimli üç farklı yöntem önermişlerdir. Araştırmacılar daha önceki çalışmasındaki geliştirdikleri DW-KNN tabanlı yöntem ile bu üç yeni yöntemi kendi aralarında karşılaştırmışlardır. Bu yöntemler arasından “Distance-Minkowski” yönteminin daha iyi performans gösterdiğini rapor etmişlerdir.

Hendzel ve Wiech (2019) “Lyapunov” tekniği yardımıyla robotlar arasındaki ilişkileri sanal yay ve sönümleme elemanları yardımıyla modellemişlerdir. Bu çalışmalarında sürü robotlarının öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışını sergilemeleri için ayrık oransal ve türev kontrolcüsü kullanılmıştır.

2.2 Olasılıklı Yaklaşım

Olasılıklı (Probablistic) yaklaşımı kullanan çalışmalarda, hamam böceklerinin davranışlarından ilham alınmıştır. Bu çalışmalarda hamam böceklerinin bulundukları kümelerde kalma süresi olasılığını böcek sayısına göre modellemişlerdir. Kümedeki hamam böceği ne kadar fazla ise böceklerin kümede kalma olasılığı artmaktadır (Jeanson ve ark., 2005). Araştırmacılar çalışmalarında, sonlu durum makinesi yöntemiyle hamam böceklerini modelleyerek bir araya gelme davranışını incelemişlerdir (Garnier ve ark., 2008; Lerman ve ark., 2005).

Soysal ve Şahin (2005) kaçma, yaklaşma ve bekleme durumlarını içeren bir sonlu durum makinesi yöntemiyle olasılıklı bir araya gelme yaklaşımı önermişlerdir. Önerdikleri metod da sistematik deneylerle arena boyutu, simülasyon adım sayısı ve geçiş olasılıklarına bağlı olarak bir araya gelme davranışının performansını incelemişlerdir.

Bayındır ve Şahin (2009) önerdikleri olasılıklı bir araya gelme davranışı modelinde sürü robotlarının toplanma performansını ölçmek için bir model geliştirmişlerdir. Çalışmalarını fizik tabanlı bir simülatör kullanarak gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak modelin küçük ölçekli olasılıklı model uygulamalarından daha hızlı bir model olduğunu rapor etmişlerdir. Düşük yoğunluklu robot topluluklarında ölçeklenebilir bir toplanma oluşmadığını belirtmişlerdir.

Hu ve ark., (2014) hamam böceklerinin davranışından esinlenerek sürü robotlarının arama ve toplanma durumlarını için bir karar mekanizması içeren olasılıklı bir araya gelme modeli önermişlerdir. Çalışmada merkezi bir kontrol birimi olmayan ve bir lider tarafından yönlendirilmeyen robot sürüsü için, robotların yerel etkileşimlerine bağlı olarak bir robot kümesinde kalma ve ayrılma olasılıklarına göre, bir araya gelme davranışını incelemişlerdir.

Katada (2018), toplanma davranışının sergilenmesi için olasılıklı sonlu durum makinesinin parametrelerinin belirlenmesinde evrimsel hesaplama yöntemi kullanmışlardır. Simülasyon deneylerinden elde ettikleri sonuçlara göre, evrimsel hesaplama yöntemi ile desteklenen olasılıklı sonlu durum makinesi yönteminin bir araya gelme davranışında yararlı olduğunu rapor etmişlerdir.

Fırat ve ark., (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, bilgili robot (informed) diye adlandırdıkları seçilmiş robotların bir araya gelme davranışına olan etkisini olasılıklı sonlu durum makinesi yaklaşımı kullanarak incelemişlerdir. Bilgili robotlar arenada önceden belirlenmiş yerlerden kaçınması görevini üstlenmektedir. Bilgili robotların arenada belirlenen iki ve dört farklı bölgede toplanmasını incelemişlerdir.

Ligot ve ark., (2020) çalışmalarında, sürü robotiğinde kolektif davranışlar için, davranış ağaçlarının kullanımında bulunan olasılıkları, otomatik modüler tasarım yönünden incelemişlerdir. Çalışmada bir araya gelme ve yem arama davranışı için üç farklı deneysel araştırma yapmışlardır.

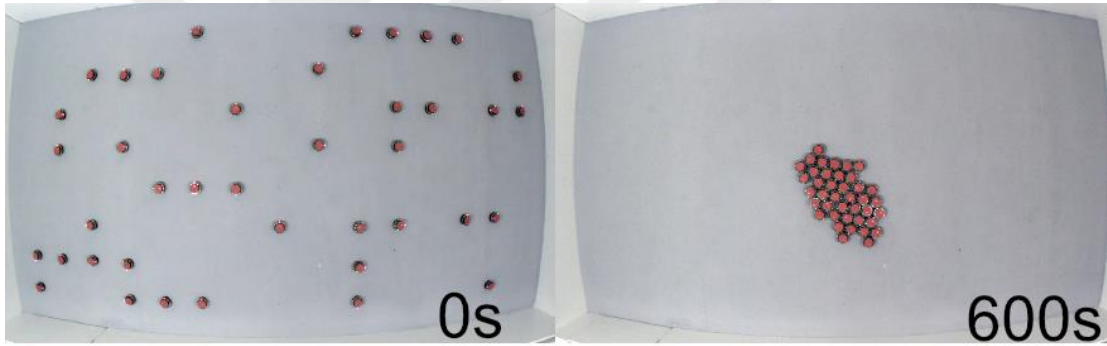
2.3 Evrimsel Yaklaşımlar

Evrimsel yaklaşımlar çalışmaları, sürü robotlarına evrimsel metotlar kullanarak bir araya gelme uygulamalarını içermektedir. (Trianni ve ark., 2003) çalışmalarında, s-bot adı verilen sürü robotu kullanarak, yapay evrimsel teknikleri ile bir araya gelme davranışına çözüm aramışlardır. Sürü robotlarına hem statik hem de dinamik bir araya gelme davranışı uygulayarak, statik ve dinamik toplanma kavramını ortaya çıkarmışlardır.

Soysal ve ark., (2007) öz örgütlenebilir bir araya gelme ile ilgili dikkat çeken çalışmalarında evrimsel ve olasılıklı olmak üzere iki farklı metot önermişlerdir. Kullandıkları evrimsel kontrolcü, kızılötesi yakınlık sensöründen aldıkları girdileri, bir YSA (yapay sinir ağları) ile sürü robotunun hareketini kontrol etmektedir. Olasılıklı metotta ise, sürü robotlarına çekme, itme, bekleme ve engelden kaçınma durumları için, bir Sonlu Durum Makinesi (SDM) yardımıyla bir araya gelme davranışı uygulanmaktadır. Evrimsel ve olasılıklı metotlarının karşılaştırılması sonucunda evrimsel kontrolcünün daha iyi bir performans gösterdiğini rapor etmişlerdir. Diğer bir çalışmada “Novelty Research” yaklaşımı ile yapay sinir ağı kontrolcüsü eğitilerek bir araya gelme davranışına çözüm aranmıştır (Gomes ve ark., 2013).

2.4 Diğer Kontrol Algoritmaları

Gauci ve ark., (2014) tarafından yapılan bir araya gelme davranışı çalışmasında, sadece “if-then-else” yapısı kullanarak hesaplama olmayan bir kontrolcü önermişlerdir. Kullandıkları sürü robotlarının, komşu robotları algılamaları için iki bitlik bir algılama yeteneğine sahip (0 (robot yok) /1 (robot var)) bir sensör kullanmışlardır. Kullanılan bu algılayıcılar için algılama aralığı sınırını başlangıçta sınırsız olarak belirlemişlerdir. Daha sonra uyguladıkları deneylerle algılama aralığını değiştirerek, bu etkinin bir araya gelme davranışına olan performansını incelemişlerdir. Şekil 2.2’de Melvin Gauci’nin öz-örgütlenebilir bir araya gelme davranışı için bir senaryo örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Öz-örgütlenebilir bir araya gelme davranışı örneği (Gauci ve ark., 2014).

Martínez-Clark ve ark., (2018) çalışmasında diferansiyel tahrikli mobil robotları kullanarak öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı için bir algoritma önermiştir. Bu algoritma herhangi bir küresel konum belirleme sistemi (GPS) kullanmadan komşu robotların uzaklık ve açı bilgilerine dayanan bir araya gelme yöntemidir.

Mısır ve ark., (2020) çalışmalarında bulanık mantık tabanlı öz örgütlenebilir bir araya gelme metodu önermişlerdir. Çalışmada sürü robotığında kullanılan geleneksel öz örgütlenebilir bir araya gelme metotlarından farklı olarak, bulanık mantık denetleyicileri kullanarak sınırlı sensör verilerini değerlendirmişlerdir. Benzetim ortamında farklı algılama alanlarına sahip, farklı sayıdaki sürü robotlarına, farklı büyüklüklerdeki arenalarda sistematik deneyler uygulamışlardır.

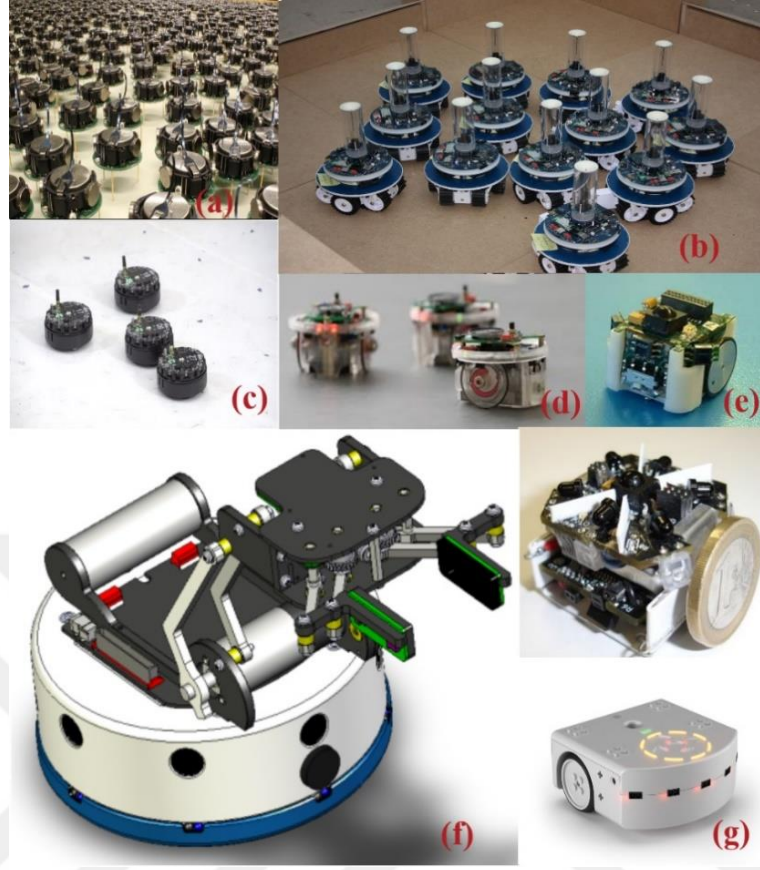
Çalışmada algılayıcı girişlerine gürültü uygulanarak bulanık mantık tabanlı öz örgütlenebilir bir araya gelme metodunun performansı incelenmiştir. Sürü robotlarının öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışındaki ölçeklenebilirliği ve esnekliği uygulanan sistematik deneylerle değerlendirilmiştir.

Parhizkar ve ark., (2020) çalışmasında bir sosyal amip olan “*Dictyostelium discoideum*” bir araya gelme davranışlarından esinlenerek, bu biyolojik örneği sürü robotları üzerinde incelemişlerdir. Bir araya gelme davranışında biyolojik örneğin, sinyal yayılım modelini benzetim ortamında incelemişlerdir. Çalışmada biyolojik bir araya gelme davranışını, fiziksel sürü robotları Kilobot’lar üzerinde de göstermişlerdir.

Mısır ve Gökrem (2020), çalışmalarında sürü robotlarının kısıtlı sensör girdilerini kullanan bir öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı metodu önermişlerdir. Yöntemde sensör girdileri olarak komşu robotların nispi açıları ve uzaklıkları kullanılmaktadır. Yöntemin esnek ve ölçeklenebilirliğini test etmek için robot sayısı ve arena boyutuna bağlı olarak sistematik simülasyon deneyleri uygulamışlardır.

2.5 Sürü Robot Modelleri ve Uygulamaları

Sürü robotığında istenilen görev ve uygulamaların yapılması için çok sayıda robot modelleri mevcuttur (Patil ve ark., 2013). Robot modelleri sadece tek bir görevi gerçekleştirmenin yanı sıra birbirinden farklı görevleri de yerine getirebilecek nitelikte olabilmektedirler (Olaronke ve ark., 2020). Sürü robotığı araştırmacıları, amacına uygun robot tasarımlarını, olabildiğince basitleştirerek ve minyatürleştirerek sürü robot davranışlarını incelemektedirler (Anoop ve Kanakasabapathy, 2018). Şekil 2.3’de literatürde karşılaşılan sürü robot çalışmalarında kullanılan robot modeli örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 2.3. (a) Kilobot (Rubenstein ve ark., 2014), (b) S-bot (Gro ve ark., 2006), (c) R-One (McLurkin ve ark., 2012), (d) E-puck (Nemec ve ark., 2017), (e) Aalice (Arvin ve ark., 2014a), (f) Khepera IV (Farias ve ark., 2017), (g) Thymio (Vitanza ve ark., 2019) robot model örnekleri

Robot platformlarındaki temel işlev, robotlar arasındaki iletişim ve robot ile çevre arasındaki etkileşimi kurabilecek algılama birimlerini barındıran tasarımlar kurmaktır. Araştırmacılar, bu temel işlevleri yerine getiren robot modellerinde hem maliyet bakımından hem de sürü robotiği yaklaşımında benimsenen basit tasarım daha çok tekerlekli mobil robot modellerini tercih etmişlerdir (Seeja ve ark., 2018).

Sürü robotiği uygulamaları içerisinde en dikkat çekici projelerden biri “kilobot” ‘tur (Rubenstein ve ark., 2012). Ölçeklenebilir büyük ölçekli otonom sürülerle çeşitli sürü robot davranışlarında görev alması için tasarlanmıştır. Rubenstein ve ark., (2014) çalışmalarında “kilobot” kullanarak kendi kendine montaj davranışını incelemişlerdir.

Bu davranışı yaklaşık bin adet “kilobot” ile uygulamaları fiziksel sürü robotlarının ölçeklenebilirliği açısından literatürde oldukça ilgi çekici olmuştur.

Kendi kendine montaj davranışı için önceden belirlenmiş karmaşık şekiller oluşturdıklarını rapor etmişlerdir. Ebert. T. Julia ve ark., (2018) çalışmalarında çok özellikli toplu karar verme problemini, zorlu bir platform senaryosunda üç farklı renk için hem simülasyon ortamında hem de fiziksel sürü robotları (Kilobot) ile incelemişlerdir.

Bir diğer dikkat çeken sürü robot projesi “S-bot” dur (Mondada ve ark., 2004). S-bot’lar özellikle birbirlerine kenetlenme özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Diferansiyel tahrikli paletlerle hareket kabiliyetine sahiptir. Donatıldığı algılayıcıları vasıtasıyla çevresiyle etkileşim kurabilmektedir (Groß ve ark., 2006).

Araştırmacılar, S-bot’ların birbirine kenetleme özelliğini kullanarak, sürü robot sistemlerinde koordineli hareketi incelemek için delikten kaçınma davranışını incelemişlerdir (Trianni ve ark., 2006). Sürü robotlarının zorlu bir arenada deliklere düşmeden kaçınmalarını araştırmışlardır. S-botların deliklerden kaçınmalarını sağlamak için yapay evrim tekniğini kullanmışlardır.

E-puck projesi robot sürülerini incelemek için geliştirilmiş düşük maliyetli otonom robot tasarımıdır (Mondada ve ark., 2009). Bu robotlara üzerlerinde bulunan kızılötesi uzaklık sensörleri, ses sensörleri (mikrofon, hoparlör) ve kamera donanımları ile sürü robot davranışları uygulanabilmektedir. (Gutiérrez ve ark., 2009) çalışmalarında “e-puck” robotlar için bir yerel iletişim modülü tasarımı sunmuşlardır. Bu sistem robotların kendi aralarında haberleşmesini ve aralarındaki uzaklık ve yön bilgilerinin bulunmasını sağlamaktadır.

2.6 Simölasyonlar

Sürü robotiğı uygulamalarında, sürü robotiğı davranışlarını incelemek için çok sayıda robot kullanılmaktadır. Araştırmacılar sürü robot uygulamaları için geliştirdikleri metotları incelerken hem uygulamaları hızlı bir şekilde yapmak hem de robot maliyetinden tasarrufta bulunmak için simölasyonlar kullanmaktadırlar(Tan ve Zheng, 2013). Sürü robotiğı uygulamalarında kullanılan simölasyonlar için V-Rep, ARGoS, Webot, Matlab (Mobile Robotic Toolbox), Player/Stage ve Gazebo örnek verilebilir (Nedjah ve Junior, 2019).



3. MATERYAL YÖNTEM

Bu bölümde, sürü robotlarında öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı için geliştirilen bir kontrol algoritması ve iki farklı metot açıklanmaktadır. İlk olarak öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı problemi tanıtılmıştır. Daha sonrasında geliştirilen algoritma ve metotların uygulanabileceği robot kinematiği açıklanmaktadır. Ayrıca öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışının performansını ölçmek için kullanılan ölçütler sunulmaktadır.

3.1. Bir Araya Gelme Problemi

Bu bölümde öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışının problem tanımlamaları ve bu problem için bazı varsayımlar açıklanmaktadır. Sürü robotlarının bir araya gelme davranışı, belirli bir boyuttaki dört tarafı engellerle donatılmış kare alan içerisinde uygulanmaktadır. Burada amaç, engellerle sınırlandırılmış arenada, sürü robotlarını bir işaret/aracı kullanmadan bir araya getirmektir. Ayrıca sınırlandırılmış alan içerisinde sürü robot sayısı değişse de bir araya gelme davranışı öz örgütlenebilir olarak uygulanabilmelidir.

Sürü robotlarının hareket alanı global referans çerçevesi (GRÇ) olarak isimlendirilmektedir. Sürü robotlarının, engel olarak algıladığı GRÇ'nin kapalı olan dört tarafının dışına çıkmaması, bu engelleri algılayarak GRÇ içerisinde hareket etmesi istenir. GRÇ'de n adet sürü robotu bulunduğunda, bu robotlar 1'den n 'e kadar numaralandırılmaktadır. Sürü robotlarının GRÇ 'de birbirleriyle etkileşim kurabilmesi ve çevresindeki engelleri algılayabilmesi için sensörleri bulunmaktadır. Bu sensörler ve görevleri ve varsayımlar aşağıda belirtildiği gibidir:

- Sürü robotları 360° algılama alanına sahiptir.
- Sürü robotları, algılayıcıları vasıtasıyla engel ve robot ayırımını yapabilmektedir.
- Sürü robotları GRÇ sınırlarını engel olarak algılar.
- Sürü robotlarının engel ve robot algılama alanları sınırlandırılmıştır. Sınırlandırılmış bu alan yerel referans çerçevesi (YRÇ) olarak isimlendirilmektedir.
- Sürü robotları YRÇ alanı dışında kalan hiçbir engel ve/veya robotu algılayamaz.
- Bir sürü robotu herhangi bir engelle ve/veya robotla karşılaşmıyorsa rastgele hareket etmektedir.
- Sürü robotu bir dijital pusula (magnetometer) yardımıyla kendi baş açısını hesaplayabilmektedir.
- Algılanan sürü robotları komşu robot, algılayan sürü robotu ise odak robotu olarak adlandırılmaktadır.
- Sürü robotu robot algılama sensörüyle YRÇ içerisindeki komşu robotların baş açılarını ve uzaklık bilgilerini hesaplayabilir.
- Sürü robotu engel algılama sensörüyle YRÇ içerisindeki engelin uzaklığını ve açısını hesaplayabilir.

Sürü robotunun sahip olduğu sensörlerle ilgili parametreleri Çizelge 1’de belirtilmektedir. Sürü robotunun robot algılama sensörü (Robot Detection), YRÇ içerisindeki algıladığı her bir komşu robotun uzaklığını ($R_{M_{r,n}}$) ölçebilmektedir. Algılanan komşu robotların açıları ($\theta_{R_{r,n}}$) olarak ifade edilmektedir. r , burada odak robotunun numarasını ifade ederken, n komşu robotun numarasını ifade etmektedir. Algılanan açı sınırları $[-\pi \pi]$ radyandır. Robot algılama sensörleri aynı zamanda algılanan komşu robotların baş açılarına erişebilmektedir.

Sürü robotlarının çevresine yerleştirilen kızılötesi haberleşme yoluyla robotların elektronik pusuladan aldıkları açı bilgileri robotlar arasında paylaşılabilmektedir (Turgut ve ark., 2008). Algılanan komşu robotların baş açıları ($\emptyset_{r,n}$) olarak ifade edilmektedir. Açı sınırları $[-\pi \pi]$ radyan ‘dır.

Engel algılama sensörü, bir engele olan uzaklığı ($O_{M_{r,n}}$) ve algılanan engelin açısını ($\theta_{O_{r,n}}$) hesaplayabilmektedir. Engel algılama, uzaklık sınırı YRÇ yarıçapına göre ayarlanabilmektedir. Engel algılama açısı sınırları $[-\pi \pi]$ 'dir.

Çizelge 1. Robot ve engel Algılama sensörleri

Sensör adı	Parametre adı	Ölçüm aralıkları
Robot Algılama	Robot algılama uzaklığı ($R_{M_{r,n}}$)	{YRÇ} birim
	Robot algılama açısı ($\theta_{R_{r,n}}$)	$[-\pi \pi]$ rad.
	Robot baş açısı ($\emptyset_{r,n}$)	$[-\pi \pi]$ rad.
Engel Algılama	Engel algılama uzaklığı ($O_{M_{r,n}}$)	{YRÇ} birim
	Engel algılama açısı ($\theta_{O_{r,n}}$)	$[-\pi \pi]$ rad.

3.2. Robot Kinematik Model

Bu çalışmada, sürü robotu modeli olarak, holonomik olmayan (non-holonomic), iki tekerden tahrikli diferansiyel mobil robot referans alınmıştır. Robotun iki boyutlu düzlemdeki konumunu belirlemek için GRÇ ve YRÇ arasında doğrudan matematiksel bir ilişki vardır. Şekil 3.1’de robotun GRÇ ve YRÇ ilişkisi gösterilmektedir. Robotun konumunun belirlenmesi için robot yapısının merkezinde bulunan “K” noktası referans alınmıştır. “K” noktasının konumu GRÇ’de x, y koordinatları ile ifade edilmektedir. Robotun GRÇ ‘deki açısı θ olarak belirlenmektedir. Robotun pozisyon bilgisi Eşitlik 3.1’de belirtildiği gibidir. Robotun “K” noktasına göre X_L, Y_L konumları YRÇ’yi tanımlamaktadır.

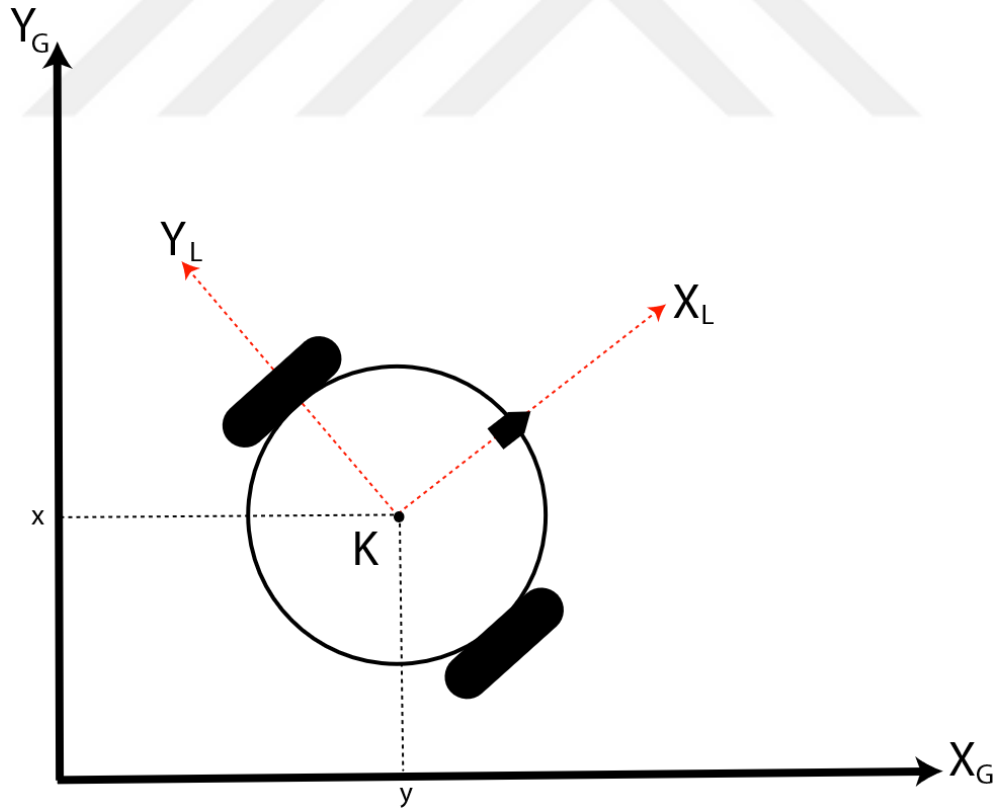
$$\zeta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Robotun GRÇ'deki hareketine göre konumlanmasının belirlenmesinde ortagonal döndürme matrisi kullanılmaktadır. Bu matris Eşitlik 3.2'de ifade edildiği gibidir.

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

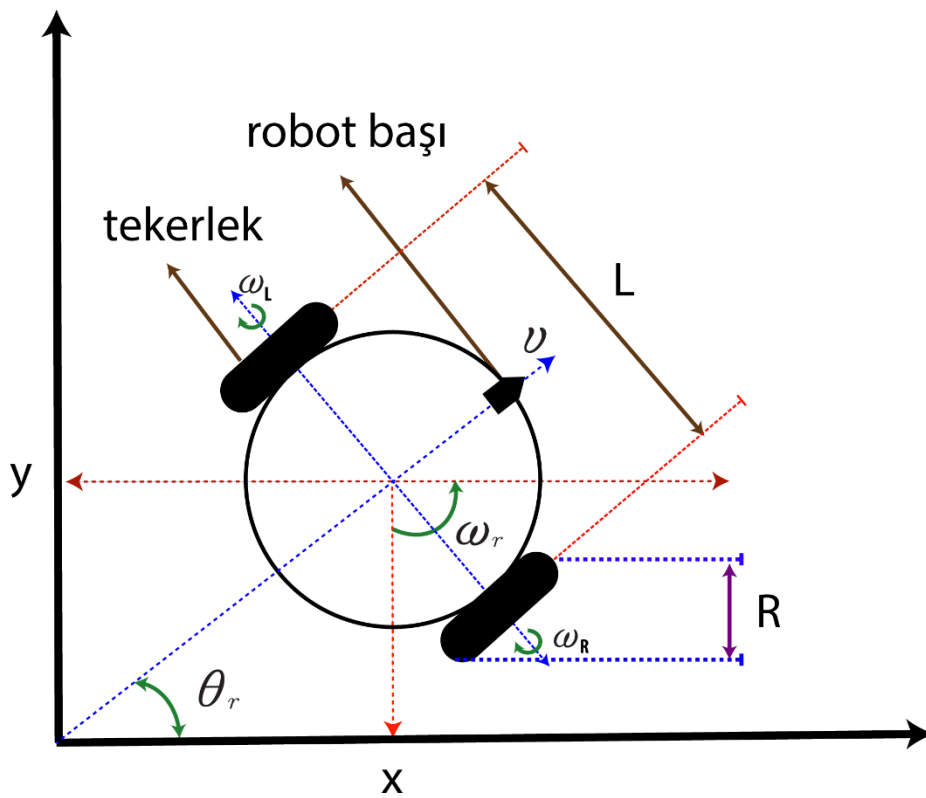
Bu matris robotun YRÇ'deki hareketine bağlı olarak GRÇ'deki pozisyonunun belirlenmesinde kullanılmaktadır. Eşitlik 3.3'te robotun GRÇ 'deki hareketini tamamlanmaktadır.

$$\zeta_L' = R(\theta) \cdot \dot{\zeta} \quad (3.3)$$



Şekil 3.1. İki tekerlekli diferansiyel tahrikli robot modeli

Şekil 3.2’de iki tekerden tahrikli mobil robotun modeli gösterilmektedir. Mobil robot $\frac{L}{2}$ yarıçapında dairesel bir yapıya sahiptir. Paralel olarak yerleştirilmiş iki R çaplı tekerleri, birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Bu sayede bir sürü robotu 360° dönüş kabiliyetine sahiptir. Sürü robotu baş yönü boyunca v hızı ile ileri yönde hareket edebilmektedir.



Şekil 3.2. İki tekerlekli diferansiyel tahrikli robot modeli

Sürü robotu Eşitlik 3.4’de ifade edilen sınırlandırılmış GRÇ alanında hareket edebilmektedir. Burada v_r robotun x yönündeki hızını ve ω_r robotun açısal hızını ifade etmektedir. Sürü robotu v_r hızında, ω_r açısal hızı ile x yönünde x_r birim, y yönünde y_r birim ve θ_r açısı kadar dönerek ilerlemektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & 0 \\ \sin(\theta_r) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Burada x_r , y_r ve θ_r Eşitlik 3.5’de ifade edildiği gibi sürü robotunun son pozisyonuna (güncel pozisyon) eklenmesi gereken parametredir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r(t + \Delta t) \\ \dot{y}_r(t + \Delta t) \\ \dot{\theta}_r(t + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_r(t) \\ \dot{y}_r(t) \\ \dot{\theta}_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Şekil 3.2’de modeli verilen sürü robotu sol ve sağ tekerleğinin açısal hızını (ω_L ve ω_R), v_r hızı ve ω_r açısal hızına bağlı olarak belirlemektedir. Böylece sürü robotu ω_L and ω_R ’ye bağlı olarak yönünü belirlemektedir. Eşitlik 3.6’da sırasıyla sol tekerleğin hızı ω_L ve sağ tekerleğin hızı ω_R için robot hız v_r ve açısal hızı ω_r için eşitlik ilişkileri verilmektedir.

$$v_r = \frac{R(\omega_L + \omega_R)}{2} \quad \omega_r = \frac{R(\omega_L - \omega_R)}{L} \quad (3.6)$$

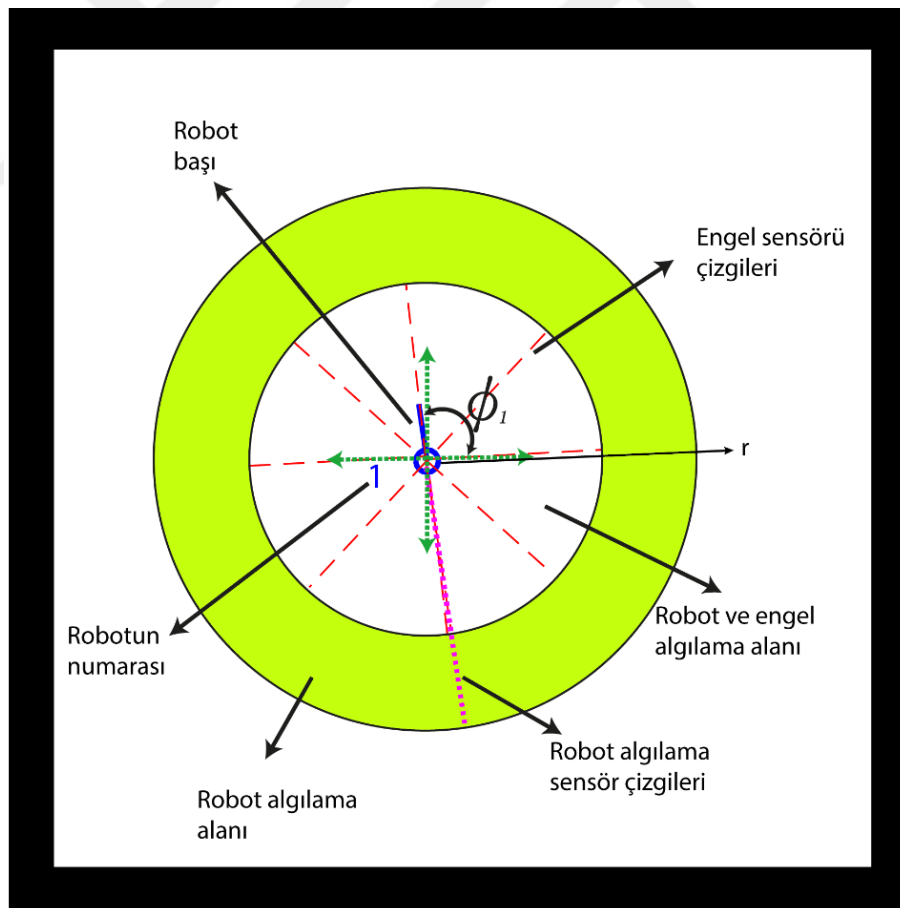
Eşitlik 3.6’ya bağlı olarak sırasıyla sol ve sağ tekerlek açısal hızları Eşitlik 3.7’de ifade edilmektedir.

$$\omega_L = \frac{v_r - \left(\frac{L}{2}\right) \omega_r}{R} \quad \omega_R = \frac{v_r + \left(\frac{L}{2}\right) \omega_r}{R} \quad (3.7)$$

3.3. Esnek ve Ölçeklenebilir Öz Örgütlenebilir Bir Araya Gelme Algoritması

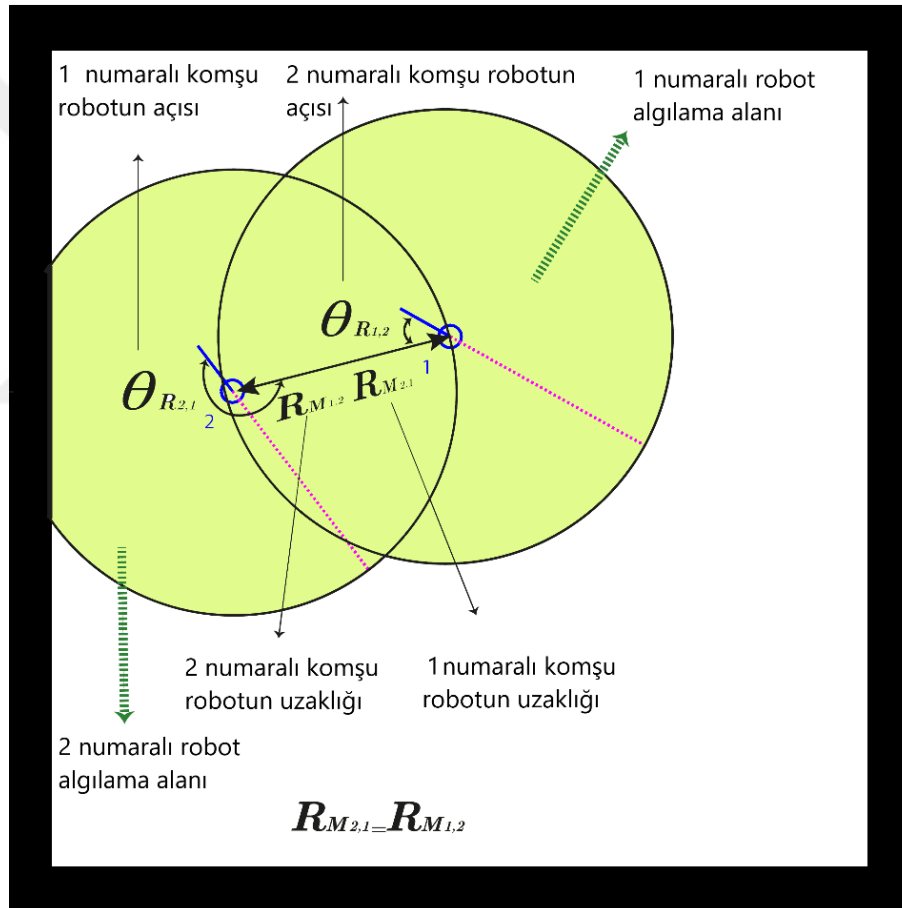
Bu bölümde, öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı için geliştirilen kontrol algoritması açıklanmaktadır. Kontrol algoritmasında robot hareketi, Bölüm 3.1.’de belirtilen bir araya gelme problemi varsayımları doğrultusunda belirlenmektedir. Algoritma, sürü robotunun GRÇ’deki son konumunun belirlenmesinde komşu robot ilişkilerini kullanmaktadır.

Şekil 3.3’de r birim yarıçapında dairesel yapıya sahip bir sürü robotu gösterilmektedir. Sürü robotu, sınırlandırılmış robot platformu üzerinde $\emptyset_1$ baş açısı ile konumlanmıştır. Kırmızı kesik çizgilerle belirtilen sensör çizgilerinin taradığı alan hem engel hem de robot algılama alanıdır. Yeşil taralı alan ise sadece komşu robotu algılama alanıdır. Sürü robotları ayırt edilebilmeleri için 1 ‘den n ‘e kadar numaralandırılmıştır.



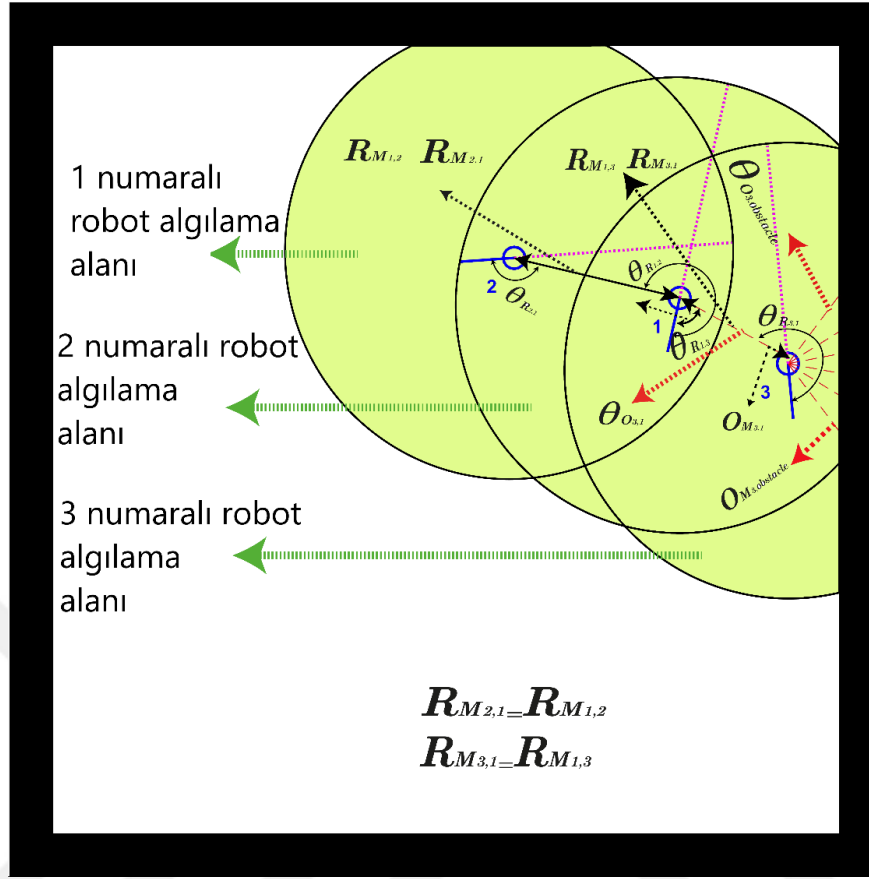
Şekil 3.3 Öz örgütlenebilir bir araya gelme algoritması için kullanılan sürü robot modelinin sensör özellikleri ve robot hareket platformu için tanımlamalar

Şekil 3.4 'de sürü robotunun robot algılama özelliklerini ifade eden bir senaryo gösterilmektedir. Yeşil renk ile gösterilen taralı alan her iki robotun algılama alanıdır. Senaryoda 1 ve 2 numaralı robotlar birbirlerinin algılama alanı içerisindeydir. 1 numaralı robot 2 numaralı robotu $R_{M_{1,2}}$ uzaklığında $\theta_{R_{1,2}}$ açısı ile algılamaktadır. 2 numaralı robot ise 1 numaralı robotu $R_{M_{2,1}}$ uzaklığında $\theta_{R_{2,1}}$ açısı ile algılamaktadır. 1 ve 2 numaralı robot birbirlerini karşılıklı algıladığından $R_{M_{1,2}}$, $R_{M_{2,1}}$ uzaklıkları eşittir. Bu senaryoda sürü robotlarının, robot algılama özelliği vurgulanmaktadır.



Şekil 3.4. Komşu robot algılama senaryosu

Şekil 3.5’de üç adet sürü robotu için robot algılama ve engel algılama özelliklerini ifade eden bir senaryo gösterilmektedir. 1, 2 ve 3 numaralı robotların robot algılama sınırları yeşil renk ile taralı olarak gösterilen alandır. Senaryoda 3 numaralı robot engel algılama sınırına kadar engele yaklaşmıştır. Engel algılama radarı kırmızı kesik çizgiler ile gösterilmiştir. Ayrıca 3 numaralı hem engeli hem de 1 numaralı robotu algılamaktadır. 3 numaralı robot 1 numaralı robotu $R_{M_{3,1}}$ mesafesinde $\theta_{R_{3,1}}$ açısında bir robot olarak algılarken, 1 numaralı robotu $O_{M_{3,1}}$ uzaklığında, $\theta_{O_{3,1}}$ açısı ile engel olarak algılamaktadır. 1 numaralı robot ise 3 numaralı robotu $R_{M_{1,3}}$ mesafesinde $\theta_{R_{1,3}}$ açısında robot olarak, $O_{M_{1,3}}$ uzaklığında, $\theta_{O_{1,3}}$ açısı ile engel olarak algılamaktadır. 1 ve 3 numaralı robotlar birbirlerini karşılıklı algıladığından engel ve robot algılama uzaklıkları eşittir. 2 numaralı robot sadece 1 numaralı robotun, robot algılama alanındadır. 2 numaralı robot 1 numaralı robotu $R_{M_{2,1}}$ uzaklığında $\theta_{R_{2,1}}$ açısıyla robot olarak algılamaktadır. 1 numaralı robot ise 2 numaralı robotu $R_{M_{1,2}}$ uzaklığında $\theta_{R_{1,2}}$ açısıyla robot olarak algılamaktadır. 2 numaralı robot ise 1 numaralı robotun engel algılama uzaklığında olmadığından bir engel olarak algılamamaktadır.



Şekil 3.5. Üç sürü robotunun birbirlerini algılama senaryosu

Eşitlik 3.8’de öz örgütlenebilir bir araya gelme algoritmasının temelini oluşturan sürü robotunun bireysel hareketi ifade edilmektedir. Sürü robotu bireysel hareketini, komşu robotları algılama açısına, uzaklığına ve baş açılarına bağlı olarak yapmaktadır. Sürü robotu {YRÇ} algılama yarıçapındaki ve 3.5 birim uzaklık aralığında komşu robotları algılar ise komşu robotları algıladığı açılarının ortalaması kadar döner ve ilerler. Eğer komşu robotları algıladığı uzaklıklardan herhangi biri 1 ile 3.5 birim uzaklıkta ise sürü robotu ortak bir yönde ilerlemektedir. Ortak yönde hareket eden sürü robotu dönüş yönünü, algıladığı komşu robotların baş açılarına göre $\phi_{yön_r}$ açısı ile belirlemektedir. Sürü robotu algılama sınırları içerisindeki 0 ile 1 birim aralığında, engel veya komşu robotla karşılaşır, komşu robot veya engellere çarpmamak için hareket etmektedir. Eğer sürü robotu algılama sınırları içerisinde engel veya robot ile karşılaşmaz ise rastgele hareket etmektedir. YRÇ yarıçapı robot özelliğine bağlı olarak önceden belirlenen sensör algılama aralığıdır ve dinamik olarak ayarlanabilir.

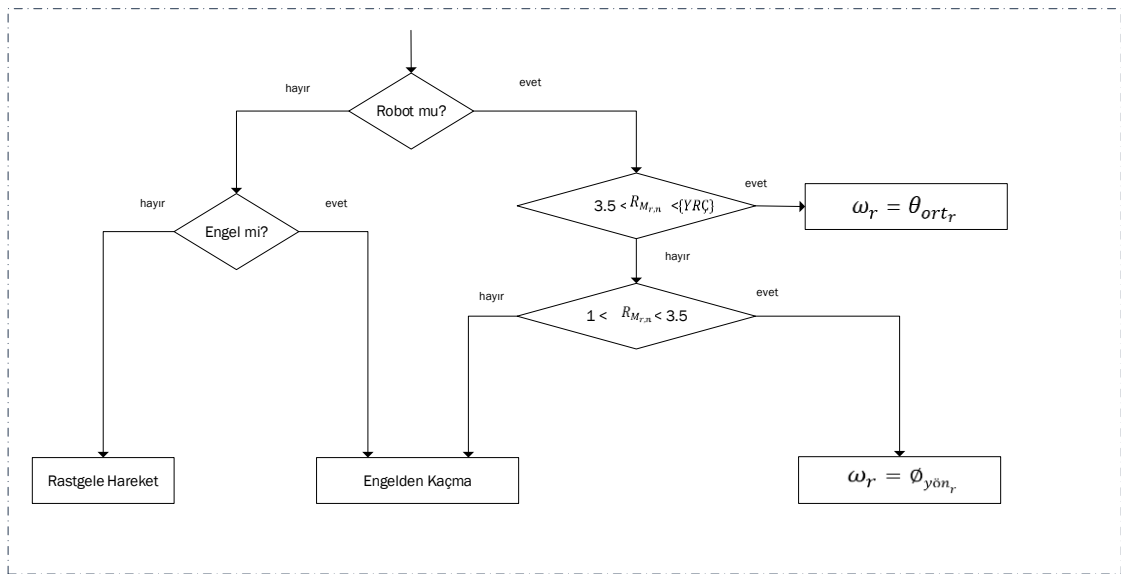
$$\left\{ \begin{array}{ll} \omega_r = \theta_{ort_r} & , \quad 3.5 < R_{M_r,n} \leq \{YR\} \text{ birim} \\ \omega_r = \emptyset_{y\ddot{o}n_r} & , \quad 1 < R_{M_r,n} \leq 3.5 \text{ birim} \\ engelden ka\c{c}ma(O_{M_r,n}, \theta_{O_r,n}) & , \quad 0 < O_{M_r,n} \leq 1 \text{ birim} \\ \omega_r = \text{rand}(-180^\circ, 180^\circ) & , \quad diğ{e}r \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Şekil 3.6’da Eşitlik 3.8’de ifade edilen toplanma metodunun akış diyagramı gösterilmektedir. Sürü robotu {YRÇ} algılama yarıçapındaki ve 3.5 birim uzaklık aralığında komşu robotları algıladığında Eşitlik 3.9’daki gibi θ_{ort_r} ’yi (algıladığı komşu robotların nispi açılarının ortalamasını) hesaplar.

$$\theta_{ort_r} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \theta_{R_r,n_i} \quad [n_i]=[n_1 \ n_2 \ n_3 \ \dots \ n_S] \quad (3.9)$$

Burada S algılanan komşu robot sayısını ifade etmektedir.

Bu durumda sürü robotunun dönüş açısı θ_{ort_r} derece, robot hızı $v_r = 2 \frac{\text{birim}}{\text{adım}}$ olur. Bu koşul ile robotlar birbirine yaklaşır ve robotlar algılama alanı içerisindeki en fazla sayıda komşu robot bulunan yöne ilerler. Böylece odak sürü robotu algıladığı komşu robotlara yaklaşır.



Şekil 3.6. Bir araya gelme davranışı döngüsü

Eğer sürü robotları birbirlerine 3,5-1 birim aralığında yaklaşırsa hesaplanan $\phi_{yön_r}$ açısı yönünde ilerler. Böylece sürü robotları ortak yönde hareketini gerçekleştirir. $\phi_{yön_r}$ açısını belirleyen ifade Eşitlik 3.10'da verilmiştir. Sürü robotları ortak yönde hareketi sergilerken komşu robotların baş açılarını değerlendirir.

$$\begin{cases} \phi_{yön_r} = \phi_{enk_r} & , \quad (\phi_{ortanca_r} - \phi_{mad_r}) < \phi_r < (\phi_{ortanca_r} + \phi_{mad_r}) \\ \phi_{yön_r} = \phi_{ortanca_r} & , \quad \text{diğer} \end{cases} \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.10'da kullanılan ϕ_{enk_r} açısı odak robotunun algıladığı en yakındaki robotun baş açısıdır. ϕ_{enk_r} açısı Eşitlik 3.11'e göre hesaplanır. ϕ_{enk_r} sürü robotlarının ortak yönde hareketinde kullanılır. Sürü robotları ϕ_{enk_r} açısı kadar döndüğünde en yakınındaki robotu takip etmektedir.

$$\phi_{enk_r} = seç(\phi_{r,n}) \quad (3.11)$$

Burada $seç()$ fonksiyonu komşu robot baş açılarından küçük olanı seçmektedir. Eşitlik 3.10'da kullanılan $\phi_{ortanca_r}$ odak robotunun algıladığı komşu robotların baş açılarının medyan değeridir. $\phi_{ortanca_r}$ Eşitlik 3.12'ye göre hesaplanmaktadır. $\phi_{ortanca_r}$ komşu robotların hareket yönünün belirlenmesinde kullanılır.

$$\phi_{ortanca_r} = ortanca(\phi_{r,n}) \quad (3.12)$$

Burada $ortanca()$ fonksiyonu bir veri setindeki ortanca değeri döndürür. Eşitlik 3.10'da kullanılan ϕ_{mad_r} açısı algılanan komşu robotların baş açılarının mutlak medyan sapmasıdır (Median Absolute Deviation-MAD). MAD değeri Eşitlik 3.13'e göre hesaplanmaktadır.

Komşu robotların baş yönlerinin mutlak medyan sapması odak robotunun komşu robotlarla olan ortak yönde hareketini sağlar. Sürü robotları sabit hızda hareket eder ve algılama alanı içerisinde, 1 ile 3.5 birim mesafede robot algılırsa komşu robotların baş yönlerini kullanarak kendi baş açısını belirler. Ayrıca odak robotu algıladığı komşu robotlarla aynı yönde ilerlemesi için komşu robotların sapma açılarını (MAD) kullanır.

$$\phi_{mad_r} = ortanca(|\phi_{r,n} - \phi_{ortanca_r}|) \quad (3.13)$$

Şekil 3.7’de Eşitlik 3.10’da ifade edilen $\phi_{yön_r}$ açısının belirlenmesinde kullanılan sözde kod parçası gösterilmektedir. Bu kod parçasına göre sürü robotu, $\phi_{ortanca_r}$, ϕ_{mad_r} , $\phi_{r,n}$ açılara bağlı olarak $\phi_{yön_r}$ açısını belirler. $\phi_{yön_r}$ açısı, $\phi_{ortanca_r}$ ve ϕ_{mad_r} açılarının toplam ve farkı ile belirlenir. Sürü robotunun baş yönü $\phi_{r,n}$; $\phi_{ortanca_r}$ ve ϕ_{mad_r} açılarının toplam ve fark değeri aralığında ise, $\phi_{yön_r}$ açısı ϕ_{enk_r} ’ye eşit olur. Böylece robot ϕ_{enk_r} kadar döner. Bu durumda sürü robotu en yakınındaki robotu takip edip etmeyeceğine karar verir. Eğer odak robotunun baş yönü $\phi_{r,n}$; $\phi_{ortanca_r}$ ve ϕ_{mad_r} açılarının toplam ve fark değeri aralığında değilse, robot açısı $\phi_{ortanca_r}$ kadar döner.

Algoritma ortak yönde hareket

```

if ( $\phi_{ortanca_r} - \phi_{mad_r}$ ) <  $\phi_r$  < ( $\phi_{ortanca_r} + \phi_{mad_r}$ ) then
     $\phi_{yön_r} = \phi_{enk_r}$ 
else
     $\phi_{yön_r} = \phi_{ortanca_r}$ 
end if

```

Şekil 3.7. $\phi_{yön_r}$ sözde kod

Sürü robotu $\phi_{yön_r}$ açısını hesaplayarak kendisinin ve komşu robotların baş yönlerini değerlendirir. Bu değerlendirme ile sürü robotu komşu robotlarla ortak yönde hareket eder. Sürü robotu ortak yönde hareketi sergilerken algıladığı komşu robotlara ve engellere 1 birimden daha az bir uzaklık karşılaşırsa Eşitlik 3.14’de ifade edildiği gibi engellere ve robotlara çarpmadan hareket eder. Her bir sürü robotu toplanma metodu ile birbirlerini zincirleme olarak takip eder. Bu sayede bazı robotlar birbirlerini algılamasa da birlikte hareket ederek bir arada toplanırlar.

Sürü robotları çevresinde bir engel veya robotla karşılaşırsa Eşitlik 3.14’deki gibi hareket etmektedir. Sürü robotu engel uzaklığı ve engelleri algıladığı açıyı kullanarak hareket eder. Sürü robotu engel uzaklığına bağlı olarak hızını, engel açısına bağlı olarak da dönüş yönünü belirler. Sürü robotu dönüş yönünü belirlemek için engeli algıladığı açılarının ortalamasının “0”’dan büyük veya “0”’dan küçük olup olmadığını hesaplar.

$$\begin{cases} \omega_r = 180^\circ & , & engel_açı_r \leq 0 \\ \omega_r = -180^\circ & , & engel_açı_r > 0 \\ v_r = engel_uzaklık_r & , & 0 < engel_uzaklık_r \leq 1 \end{cases} \quad (3.14)$$

Sürü robotunun eşitlik 3.14’deki gibi engel mesafesinden en az biri 1 birim uzaklıkta ise robot hızı engel mesafesine bağlı olarak değişir ve $engel_uzaklık_r$ olur. Eşitlik 3.15’e göre $engel_uzaklık_r$ 1 birimin altında olduğunda robot hızı $engel_açı_r$ ‘ye eşit olur. Böylece robot hızı engele yaklaşma uzaklığına bağlı olarak 0 ile 1 arasında değer alır. Bu hız ile sürü robotları karşılaştıkları engelden kaçmak için engelin olmadığı yöne döner.

$$engel_uzaklık_r = \min(O_{M_r,n}) \quad (3.15)$$

Sürü robotlarının engelin olmadığı yöne dönmesi için Eşitlik 3.16’daki gibi dönüş açıları belirlenir. Eşitlik 3.16 kullanılarak algılanan engel açılarının ortalaması, sürü robotlarına konumlandırılan engel sensörlerinin açılara ve sayısına (K) bağlı olarak bulunur. Algılanan engellerin açılarının ortalaması negatif ise robot 180° kadar sola döner. Eğer algılanan engellerin açılarının ortalaması pozitif ise robot -180° sağa kadar döner.

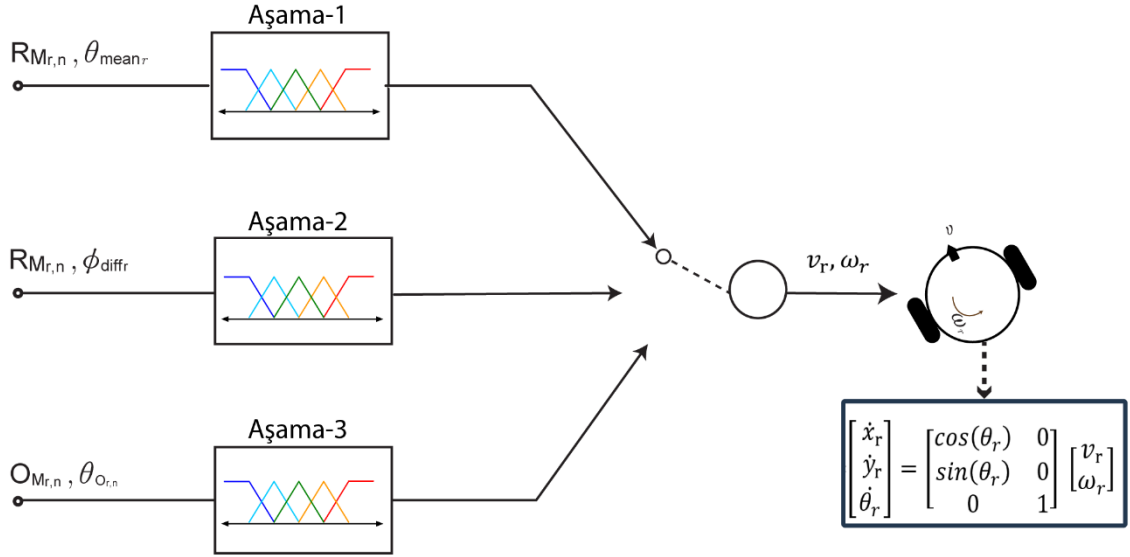
$$engel_açı_r = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \theta_{o_r, n_i} \quad (3.16)$$

Robotlar eğer çevresinde hiçbir robot ve engel algılamaz ise Şekil 3.10'daki akış diyagramında belirtildiği gibi $[-180^\circ, 180^\circ]$ aralığında rastgele açılarla yönlendirilirler. Rastgele hareket eden sürü robotunun algılama alanı içerisine bir komşu robot girdiğinde sürü robotu önerilen toplanma metodunu uygular.

3.4. Bulanık Mantık Tabanlı Öz Örgütlenebilen Bir Araya Gelme Metodu

Bu bölümde, Bulanık mantık (Fuzzy Logic) tabanlı öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı için geliştirilen metod açıklanmaktadır. Önerilen metodun katkısı, engelden kaçınma, bir araya gelme ve birlikte hareket durumları için üç farklı Bulanık Mantık Denetleyicinin (BMD) tasarlanmasıdır. Bu BMD'de giriş değişkeni olarak sürü robotlarının algılanan komşu robotla arasındaki uzaklık, açı ve baş yönleri, engele olan uzaklık ve açı bilgileri kullanılmaktadır. Sürü robotları, algıladığı komşu robotların anlık hareketlerine bağlı olarak bir araya gelme davranışı sergilemek için sınırlı sayıda bulanık mantık kuralları kullanır. Bulanık mantık kuralları, komşu sürü robotlarından alınan kısıtlı sensör verilerini denetler, her bir sürü robotu algıladığı bu sensör verilerini bireysel olarak değerlendirir.

Şekil 3.8'de geliştirilen üç aşamalı BMD odak sürü robotunun GRÇ'deki hareketlerini belirleyen bulanık karar yapısı gösterilmektedir. Odak sürü robotu üç aşamalı karar yapısında belirtilen Aşama-1, Aşama-2 ve Aşama-3 'deki BMD kurallarıyla hızını (v_r) ve mevcut baş açısına eklenen dönüş açısını (ω_r) belirlemektedir.



Şekil 3. 8. Üç aşamalı bulanık karar yapısı

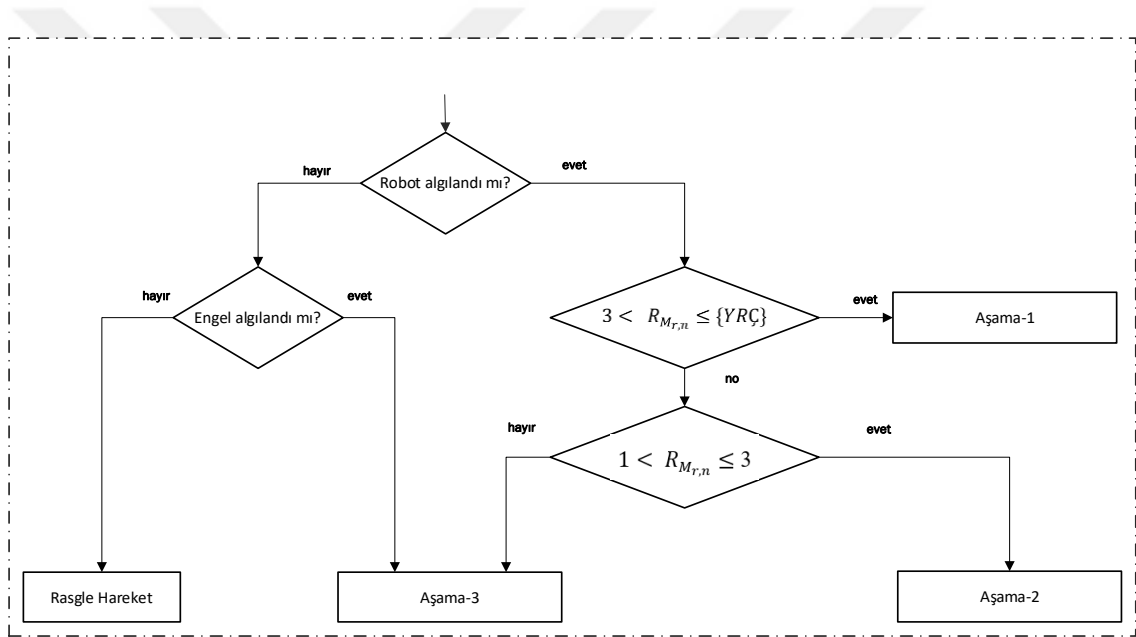
Şekil 3.9’de BMD tabanlı öz örgütlenebilir bir araya gelme metodunun akış diyagramı gösterilmektedir. Sürü robotu YRÇ alanı içerisinde robot algılaması durumunda, algıladığı robotlar arasındaki uzaklıklara bağlı olarak Aşama-1 ve Aşama-2 durumlarından hangisinin kullanacağına karar vermektedir.

Sürü robotu algılama sınırı içerisinde 3 birim uzaklığa kadar robot algılar ise Aşama-1’deki BMD’yi kullanmaktadır. Aşama-1 sürü robotlarının algıladığı komşu robotlarına en uygun yönde yaklaşmasını sağlamaktadır. Aşama-1 ile sürü robotu, komşu robotların algıladığı açılara bağlı olarak hız ve dönüş açısını ayarlamaktadır.

Sürü robotları arasındaki mesafe 1 ile 3 birim aralığında ise Aşama-2 BMD kullanılmaktadır. Aşama-2 BMD birbirlerine yeterince yaklaşan robotların ortak bir yönde hareket sergilemesini sağlamaktadır. Aşama-2 ile sürü robotu, algıladığı komşu robotların baş açılarını bakarak hız ve dönüş açısını ortak yönde olacak şekilde ayarlamaktadır.

Sürü robotu bir engel ile karşılaşması durumunda veya 1 birimden daha az uzaklıklarda herhangi bir komşu robota yaklaşması durumunda Aşama-3 engelden kaçınma BMD'yi kullanmaktadır. Aşama-3 BMD engel algılayıcılarından ölçülen uzaklık ve engel algılama açısını kullanarak engelden uzaklaşmak için robot hız ve dönüş açısını ayarlamaktadır.

Sürü robotu herhangi bir engel veya robot ile karşılaşmaması durumunda rasgele hız ve açılarla GRÇ'de rastgele hareket etmektedir. GRÇ'de rastgele hareket eden sürü robotu bir robot ve engel ile karşılaştığında 3 aşamalı BMD yöntemine göre davranışını belirler.



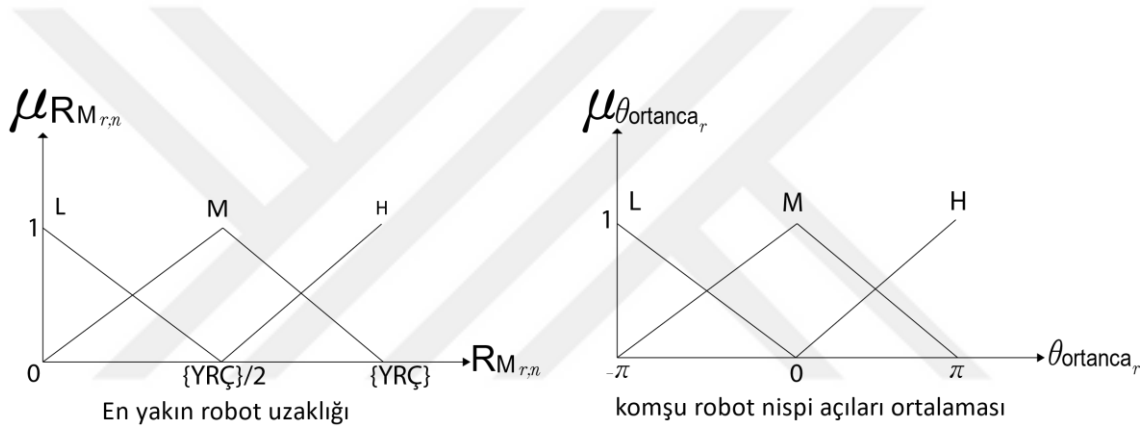
Şekil 3. 9. BMD tabanlı öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı metodu akış diyagramı

Aşama-1 odak sürü robotunun YRÇ'de algıladığı komşu robotlara yaklaştırmak için kullanılmaktadır. Aşama-1 'de bulanık giriş değişkeni olarak $R_{Mr,n}$ ve $\theta_{ortanca_r}$ kullanılmaktadır. $R_{Mr,n}$ algılanan komşu robotların uzaklığı en yakın olanıdır. $\theta_{Rr,n}$ ise algılanan komşu robotların, algılandığı açı bilgisidir. Eşitlik 3.17'de belirtildiği gibi $\theta_{ortanca_r}$ odak robotunun komşu robotları algıladığı açılarının ortanca (medyan) değeridir.

$\theta_{R_{r,n}}$ için r burada komşu robotun numarası iken $[n]=[n_1 \ n_2 \ n_3 \ \dots \ n_S]$ ise algılanan komşu robotların numaralarıdır.

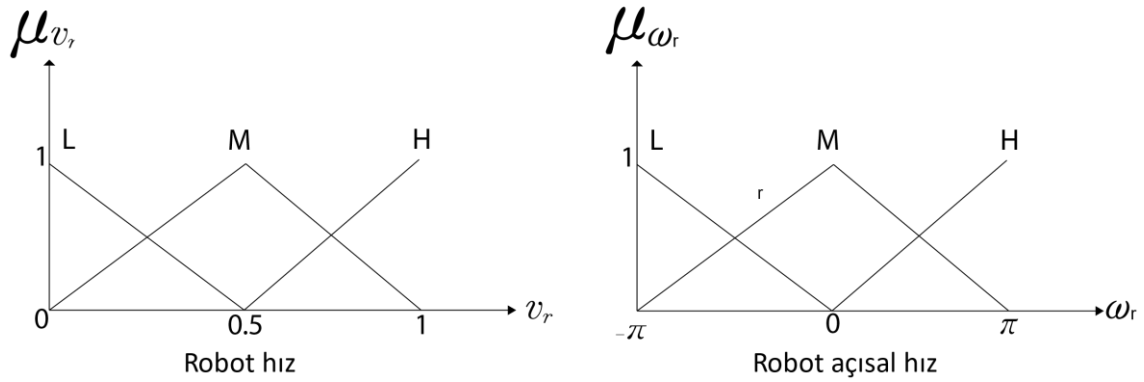
$$\theta_{ortanca_r} = ortanca(\theta_{R_{r,n}}) \quad [n] = [n_1 \ n_2 \ n_3 \ \dots \ n_S] \quad (3.17)$$

$R_{M_{r,n}}$ ve $\theta_{ortanca_r}$ bulanık giriş değişkenleri Şekil 3.10'da gösterildiği gibi sırasıyla $[0 \ \{YRÇ\}]$ ve $[-\pi \ \pi]$ evrensel kümeleri ve L, M, H (L: Low, M: Medium, H: High) bulanık alt kümeleriyle değerlendirilmektedir.



Şekil 3. 10. $R_{M_{r,n}}$ ve $\theta_{ortanca_r}$ bulanık giriş değişkenleri için üyelik fonksiyonları

Şekil 3.11'de gösterildiği gibi Aşama-1 'de $R_{M_{r,n}}$ ve $\theta_{ortanca_r}$ bulanık giriş değişkenlerine (Fuzzy Antecedent Variables) bağlı olarak çıkış değişkenleri v_r ve $\phi_{r,n}$ belirlenir. v_r ve ω_r çıkış değişkenleri sırasıyla $[0 \ 1]$ ve $[-\pi \ \pi]$ bulanık evrensel kümelerinde L, M, H üyelik fonksiyonlarına bağlı olarak belirlenmektedir. v_r ve ω_r sırasıyla robotun GRÇ üzerindeki hızını ve dönüş açısını belirlemektedir.



Şekil 3. 11. v_r ve ω_r bulanık çıkış değişkenleri için üyelik fonksiyonları

Aşama-1’de $R_{M_{r,n}}$ ve $\theta_{ortanca_r}$ bulanık giriş değişkenleri için, Çizelge 2’de gösterilen bulanık mantık kuralları ile v_r ve ω_r bulanık çıkış değişkenleri belirlenmektedir. Aşama-1 ‘deki BMD’de BAS (Bulanık Arayüz Sistemi) tipi “Mamdani”, kural bağıntısı “and”, “and” metodu için “min” ve durulaştırma için “centriod” kullanılmaktadır.

Çizelge 2. Aşama-1 ve Aşama-2 BMD kuralları

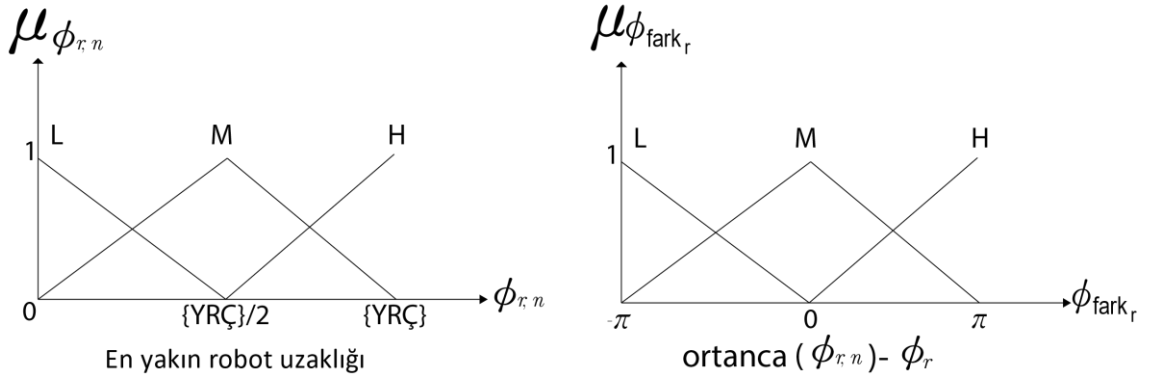
Kural Sayısı	Kurallar
R1	Eğer $R_{M_{r,n}} = H$ ve $\theta_{ortanca_r} = H$ ise ($v_r = H$) ($\omega_r = H$)
R2	Eğer $R_{M_{r,n}} = H$ ve $\theta_{ortanca_r} = M$ ise ($v_r = M$) ($\omega_r = M$)
R3	Eğer $R_{M_{r,n}} = H$ ve $\theta_{ortanca_r} = L$ ise ($v_r = L$) ($\omega_r = L$)
R4	Eğer $R_{M_{r,n}} = M$ ve $\theta_{ortanca_r} = H$ ise ($v_r = H$) ($\omega_r = H$)
R5	Eğer $R_{M_{r,n}} = M$ ve $\theta_{ortanca_r} = M$ ise ($v_r = M$) ($\omega_r = M$)
R6	Eğer $R_{M_{r,n}} = M$ ve $\theta_{ortanca_r} = L$ ise ($v_r = L$) ($\omega_r = L$)
R7	Eğer $R_{M_{r,n}} = L$ ve $\theta_{ortanca_r} = H$ ise ($v_r = H$) ($\omega_r = H$)
R8	Eğer $R_{M_{r,n}} = L$ ve $\theta_{ortanca_r} = M$ ise ($v_r = M$) ($\omega_r = M$)
R9	Eğer $R_{M_{r,n}} = L$ ve $\theta_{ortanca_r} = L$ ise ($v_r = L$) ($\omega_r = L$)

Aşama-2, Aşama-1’de birbirlerine yaklaşmış olan sürü robotlarının ortak bir yönde hareket etmesi amacıyla kullanılmaktadır. Böylece sürü robotları GRÇ’de algıladıkları robotlar ile bir bölgede kümelenmez ve diğer sürü robotlarını birleşmek için arar.

Aşama-2’de bulanık giriş değişkeni olarak $R_{M_{r,n}}$ ve ϕ_{fark_r} kullanılmaktadır. $R_{M_{r,n}}$ algılanan komşu robotların uzaklığı en yakın olanıdır. Eşitlik 3.18’de ifade edildiği gibi ϕ_{fark_r} odak robotunun algıladığı komşu robotların baş açılarının medyan değeri ile olan açı farkını bulmak için kullanılmaktadır. Bu açı farkı, odak robotunun ortak yönde ilerleyen sürü robotlarıyla aynı yönde dönmesini sağlamaktadır. $\phi_{r,n}$ algılanan komşu robotların baş açısı bilgileridir ve r burada odak robotunun numarası iken $[n]=[n_1 n_2 n_3 \dots n_S]$ algılanan komşu robotların numaralarıdır. $ortanca(\phi_{r,n})$ fonksiyonu algılanan komşu robotların açılarından medyan değerini seçer.

$$\phi_{fark_r} = ortanca(\phi_{r,n}) - \phi_r \quad (3.18)$$

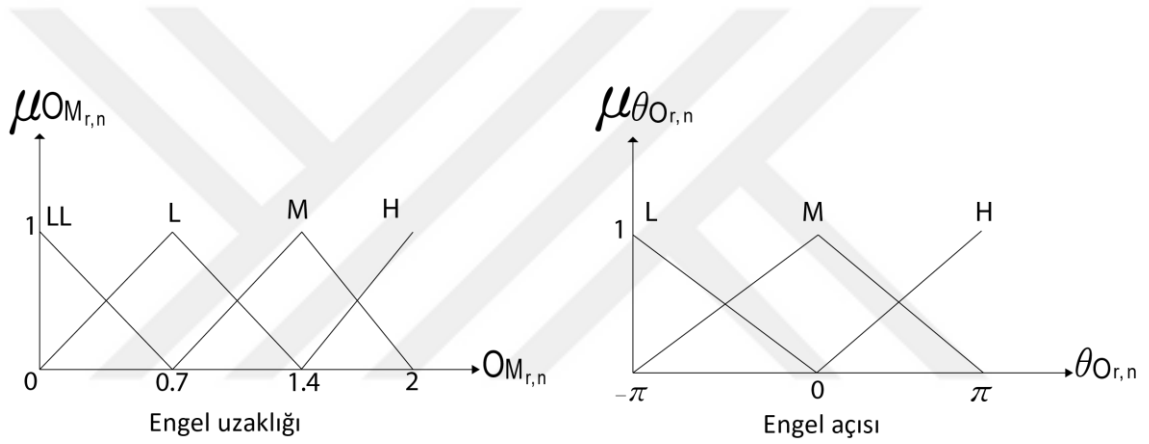
Aşama-2’de $R_{M_{r,n}}$ ve ϕ_{fark_r} bulanık giriş değişkenleri Eşitlik 3.12’de gösterildiği gibi sırasıyla $[0 \text{ } \{YRC\}]$ ve $[-\pi \text{ } \pi]$ evrensel kümesinde L, M, H bulanık alt kümeleriyle değerlendirilmektedir. Aşama-2 ‘de çıkış değişkenleri olarak Aşama-1 de olduğu gibi v_r ve ω_r belirlenmiştir. Ayrıca Aşama-2 BMD’de BAS tipi “Mamdani”, kural bağıntısı “and”, “and” metodu için “min” ve durulaştırma için “centriod” kullanılmaktadır.



Şekil 3. 12. $R_{M_{r,n}}$ ve ϕ_{fark_r} bulanık giriş değişkenleri için üyelik fonksiyonları

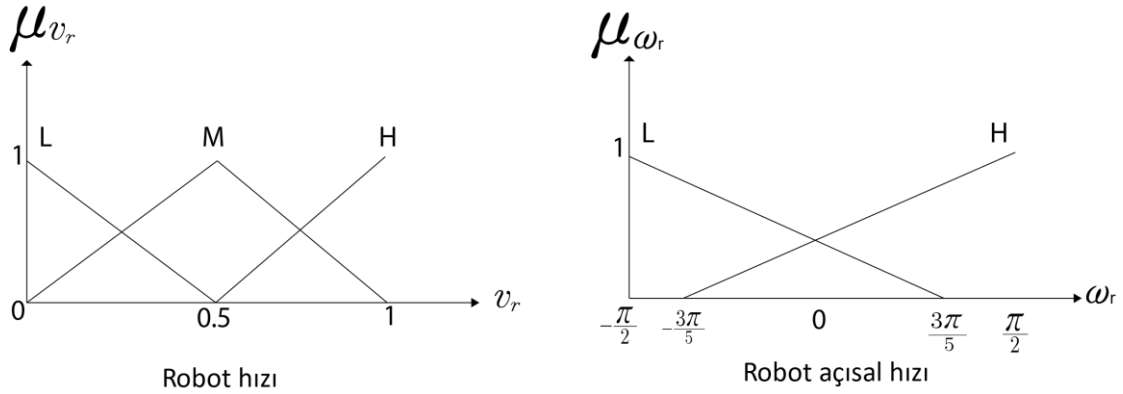
Aşama-3, sürü robotlarının GRÇ’de bir engel ile karşılaştığında engelden kaçmaları amacıyla kullanılmaktadır. Aşama-3 ‘de bulanık giriş değişkenleri olarak $O_{M_{r,n}}$ ve $\theta_{O_{r,n}}$ kullanılmaktadır. Burada $\theta_{O_{r,n}}$ engel algılayan sensörlerin açılarının ortalamasıdır. $O_{M_{r,n}}$ ise $\theta_{O_{r,n}}$ ’ye bağlı en yakın engel uzaklığıdır.

Şekil 3.13’de gösterildiği gibi $O_{M_{r,n}}$ ve $\theta_{O_{r,n}}$ için engel aralığı [0 2] evrensel kümesinde LL, L, M, H (LL: Lowest L: Low, M: Medium, H: High) bulanık alt kümeleriyle, engel açısı ise $[-\pi \pi]$ evrensel kümesinde L, M, H (L: Low, M: Medium, H: High) bulanık alt kümeleriyle değerlendirilmektedir.



Şekil 3. 13. $O_{M_{r,n}}$ ve $\theta_{O_{r,n}}$ bulanık giriş değişkenleri için üyelik fonksiyonları

Aşama-3 BMD’de $O_{M_{r,n}}$ ve $\theta_{O_{r,n}}$ bulanık giriş değişkenlerine bağlı olarak v_r ve ω_r çıkış değişkenleri belirlenir. Şekil 3.14’de gösterildiği gibi v_r bulanık çıkış değişkeni [0 1] evrensel kümesinde L, M, H bulanık alt kümeleriyle, ω_r çıkış değişkeni ise $[-\pi/2 \pi/2]$ evrensel kümesinde L ve H bulanık alt kümeleriyle değerlendirilmektedir.



Şekil 3. 14. Aşama-3 için v_r ve ω_r bulanık çıkış değişkenlerinin üyelik fonksiyonları

Çizelge 3’deki bulanık mantık kuralları ile $O_{M,r,n}$ ve $\theta_{O,r,n}$ bulanık giriş değişkenleri için ile v_r ve ω_r bulanık çıkış değişkenleri belirlenmektedir. Aşama-3 ’deki BMD’de BAS tipi “Mamdani”, kural bağıntısı “and”, “and” metodu için “min” ve durulaştırma için “centriod” kullanılmaktadır.

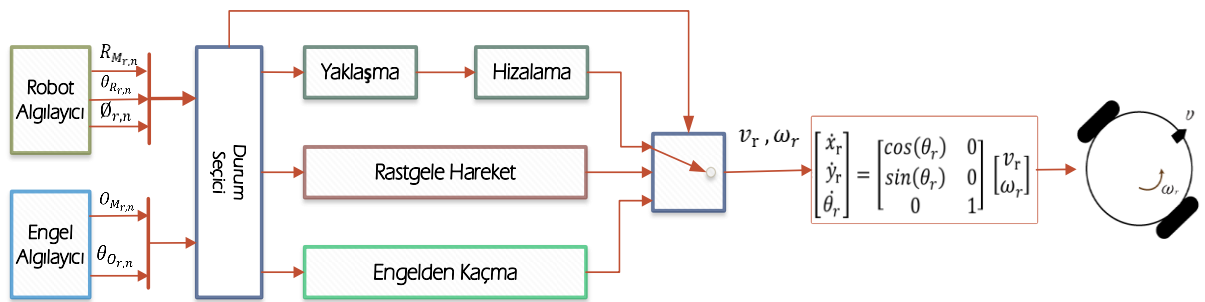
Çizelge 3. Engelden kaçma bulanık mantık kuralları

Kural Sayısı	Kurallar
$R1$	Eğer $O_{M_{r,n}} = H$ ve $\theta_{O_{r,n}} = H$ ise ($v_r = H$) ($\omega_r = L$)
$R2$	Eğer $O_{M_{r,n}} = H$ ve $\theta_{O_{r,n}} = M$ ise ($v_r = H$) ($\omega_r = L$)
$R3$	Eğer $O_{M_{r,n}} = H$ ve $\theta_{O_{r,n}} = L$ ise ($v_r = H$) ($\omega_r = H$)
$R4$	Eğer $O_{M_{r,n}} = M$ ve $\theta_{O_{r,n}} = H$ ise ($v_r = M$) ($\omega_r = L$)
$R5$	Eğer $O_{M_{r,n}} = M$ ve $\theta_{O_{r,n}} = M$ ise ($v_r = M$) ($\omega_r = H$)
$R6$	Eğer $O_{M_{r,n}} = M$ ve $\theta_{O_{r,n}} = L$ ise ($v_r = M$) ($\omega_r = H$)
$R7$	Eğer $O_{M_{r,n}} = L$ ve $\theta_{O_{r,n}} = H$ ise ($v_r = L$) ($\omega_r = L$)
$R8$	Eğer $O_{M_{r,n}} = L$ ve $\theta_{O_{r,n}} = M$ ise ($v_r = L$) ($\omega_r = H$)
$R9$	Eğer $O_{M_{r,n}}$ is L ve $\theta_{O_{r,n}}$ is L ise (v_r is L) ($\omega_r = H$)
$R10$	Eğer $O_{M_{r,n}}$ is LL ve $\theta_{O_{r,n}}$ is L ise (v_r is L) ($\omega_r = H$)
$R11$	Eğer $O_{M_{r,n}}$ is LL ve $\theta_{O_{r,n}}$ is M ise (v_r is H) ($\omega_r = H$)
$R12$	Eğer $O_{M_{r,n}}$ is LL ve $\theta_{O_{r,n}}$ is H ise (v_r is L) ($\omega_r = L$)

3.5. Dinamik Etkileşimli Öz Örgütlenebilir Bir Araya Gelme Metodu

Bu bölümde, sürü robotiği için dinamik etkileşimli öz örgütlenebilir bir araya gelme (DEB) metodu açıklanmaktadır. Geliştirilen metot da sürü robotlarının hareketi, engel ve robot algılayıcıları kullanılarak belirlenmektedir. DEB metodunda kullanılan kontrolcü bu sensörler yardımıyla durum seçicisinin karar vermesine yardımcı olmaktadır. Temel davranışlardan biri olan bir araya gelme davranışı uygulamalarında sade, hesaplama maliyeti az olan, farklı arena büyüklüklerinde uygulanabilir, etkileşim kuracağı robot sayısını sınırlandırmayan, esnek ve ölçeklenebilir kontrol algoritmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Geliştirilen DEB metodu bu ihtiyaçları karşılayan özelliktedir. Yöntemde kullanılan kontrol birimleri sürü robotlarının komşu robotlarla aralarında dinamik etkileşim yapısı sunar. Ayrıca literatürdeki diğer metotlara göre DEB kontrolcüsünde, sürü robotlarının uzaklık ve nispi açıların yanı sıra baş açıları da kullanılmaktadır (Khaldi ve ark., 2018a; Martínez-Clark ve ark., 2018a).

Şekil 3.15'te DEB yönteminin temel çalışma diyagramı gösterilmektedir. DEB ya göre iki tekerden diferansiyel tahrikli mobil robotun hareketi robot algılama ve engel algılama sensörleri vasıtasıyla belirlenmektedir. Sürü robotunun kontrol stratejisinde robot davranışını belirlemek için bir durum seçici kullanılmaktadır. Durum seçici karar yapısı yaklaşma ve hizalama, rastgele hareket, engelden kaçınma hareketlerinden birinin seçimini yapmaktadır. Sürü robotunun hız (v_r) ve açısal hızı (ω_r); kinematik modeli vasıtasıyla her bir durum kontrolcüsü tarafından belirlenir.



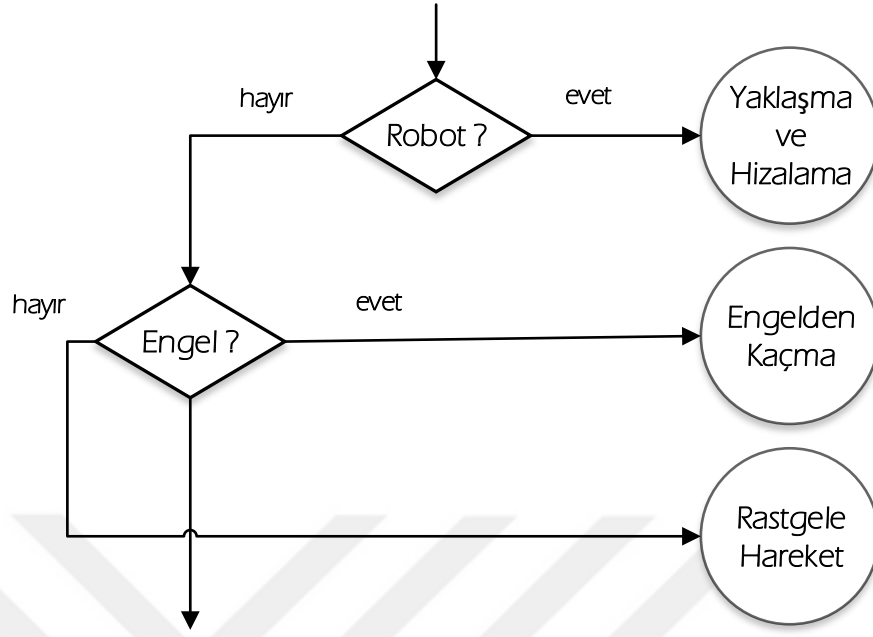
Şekil 3. 15. DEB sistem blok yapısı

Yaklaşma ve hizalama birimleri sürü robotlarının bir grup şeklinde hareket etmesini sağlamaktadır. Yaklaşma birimi, bir sürü robotunun komşu robotları algılaması durumunda birbirlerine yaklaşmasını, hizalama birimi ise birbirlerine yeterince yaklaşan robotların organize bir şekilde ortak yönde hareket etmesini sağlar. Bu sayede farklı sayıdaki birçok robot grubunun tek bir robot kümesini oluşturması hedeflenir.

Rastgele hareket birimi, sürü robotunun herhangi bir robot ve engel algılamaması durumunda rastgele hareketi için kullanılmaktadır. Engelden kaçma birimi, sürü robotunun bir engele veya komşu robotlara çarpışmadan kaçınmasını sağlar. Sürü robotu bu birim sayesinde engellerden kaçabilmekte ve diğer sürü robotlarıyla çarpışmadan iş birliği halinde hareket edebilmektedir.

3.5.1. Durum seçici

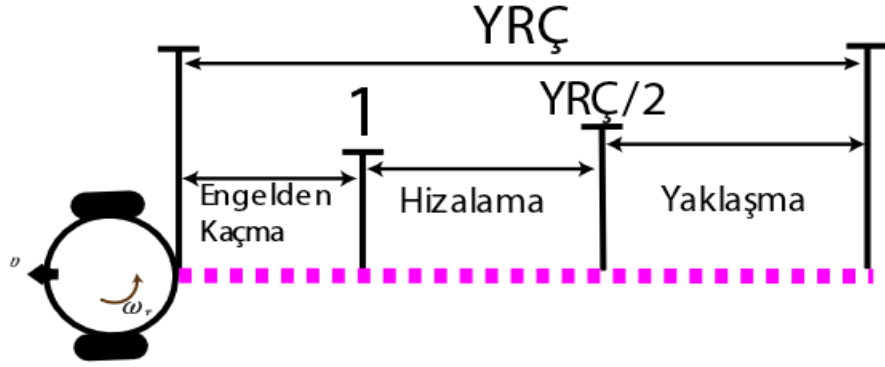
Durum seçici birimi, Şekil 3.16’da gösterildiği gibi bir karar yapısına sahiptir. Bu karar yapısı robot davranışının belirlenmesinde öncü bir rol üstlenmektedir. Durum seçici başlangıçta, sürü robotunun algıladığı nesnenin robot veya engel olduğunu tespit etmektedir. Sürü robotu, eğer algılanan nesne bir robot ise yaklaşma ve hizalama birimi ile bir engel ise engelden kaçma birimi ile kontrol edilir. Herhangi bir engel veya robot algılamaz ise rastgele hareket birimi ile kontrol edilmektedir.



Şekil 3. 16. Durum seçici karar yapısı

3.5.2. Yaklaşma ve hizalama

Sürü robotu YRÇ alanı içerisindeki algıladığı robotların uzaklıklarına ($R_{M_{r,n}}$) bağlı olarak yaklaşma ve hizalama hareketi sergilemektedir. Şekil 3.17’de sürü robotunun yaklaşma ve hizalama hareketlerini hangi alan sınırlarında gerçekleştirdiği gösterilmektedir. Sürü robotunun algıladığı robot ile uzaklığı YRÇ ile $\frac{YRÇ}{2}$ arasında ise yaklaşma hareketi, $\frac{YRÇ}{2}$ ile 1 birim arasında ise hizalama hareketi sergilemektedir.



Şekil 3. 17. YRÇ ‘ye göre yaklaşma ve hizalama hareket dağılımı

Eşitlik 3.19’da sürü robotunun $R_{M,r,n}$ ve YRÇ sınırlarına bağlı olarak hız (v_r) ve açısal hız (ω_r) hesaplamaları ifade edilmektedir. Sürü robotu yaklaşma hareketini sergilerken algıladığı komşu robotların nispi açılarının ($\theta_{R,r,n}$) ortalamasına bağlı olarak açısal hızını (ω_r) ve en yakınındaki robotun uzaklığının değişimine göre hızını (v_r) belirler. ω_r sürü robotunun en fazla sayıda komşu robotun bulunduğu yöne hareket etmesini sağlar. v_r ise sürü robotunun komşu robotlara yavaşlayarak yaklaşmasını sağlar. Burada k_1 , robot hızının belirlenmesinde kullanılan katsayıdır.

$$[v_r] = \begin{cases} \begin{bmatrix} k_1 \cdot \min(R_{M,r,n}) \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{R,r,n} \end{bmatrix}, & \frac{YRÇ}{2} < R_{M,r,n} \leq YRÇ \\ \begin{bmatrix} k_1 \cdot \min(R_{M,r,n}) \\ \text{ortanca}(\theta_{r,n}) - \theta_r \end{bmatrix}, & 1 < R_{M,r,n} \leq \frac{YRÇ}{2} \end{cases} \quad (3.19)$$

Sürü robotu hizalama hareketi sergilerken Eşitlik 3.19’da belirtildiği gibi algıladığı komşu robotların baş açıları ($\theta_{r,n}$) ve kendi baş açısına (θ_r) bağlı olarak açısal hızını (ω_r) belirler. Burada ω_r , $\text{ortanca}(\theta_{r,n}) - \theta_r$ dir. Sürü robotu hesapladığı ω_r ile komşu robotlarla ortak yönde hareket eder. v_r ise yaklaşma hareketinde olduğu gibi belirlenir.

3.5.3. Rastgele hareket

Durum seçici biriminde belirtildiği gibi sürü robotu herhangi bir engel ve/veya robot algılamaması durumunda rasgele bir hız ve açısal hızda hareket etmektedir. Sürü robotu rastgele hareket durumunda v_r ve ω_r 'yi Eşitlik 3.20'ye göre belirlemektedir.

$$\begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{cases} k_1 \cdot rand(1, LRF) \\ rand(-\pi, \pi) \end{cases} \quad (3.20)$$

Eşitlik 3.20'de belirtildiği gibi v_r , YRÇ uzaklığına göre, k_1 katsayısına bağlı olarak rasgele belirlenmektedir. ω_r ise $(-\pi, \pi)$ aralığında rasgele belirlenir. Sürü robotu herhangi bir robot ve/veya engelle karşılaşana kadar bu durum devam eder.

3.5.4. Engelden kaçma

Sürü robotunun bir engelle karşılaşması veya çarpışacak kadar bir robot ile yaklaşması durumundaki hız ve açısal hızı, *engelden kaçma* kontrolcüsüne göre belirlenir. Sürü robotunda bulunan engel algılayıcı, maksimum 1 birime kadar olan engel uzaklıklarını tespit etmektedir. Sürü robotu bu uzaklık aralığında karşılaştığı nesnelerden kaçmak için Eşitlik 3.21'deki gibi hız ve açısal hızını belirlemektedir. Sürü robotunun algıladığı engele uzaklığı $O_{M_{r,n}}$, açısı ise $\theta_{R_{r,n}}$ olarak ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} k_1 \cdot O_{M_{r,n}} \\ \pi \end{bmatrix} & \theta_{R_{r,n}} \leq 0 \\ \begin{bmatrix} k_1 \cdot O_{M_{r,n}} \\ -\pi \end{bmatrix} & \text{diğer} \end{cases} \quad (3.21)$$

Eşitlik 3.21'e göre sürü robotu, engel algılayıcısı sayesinde algıladığı engel açısının yönüne bağlı olarak sağa ya da sola dönmektedir. Algılanan engel açısı negatif ise sürü robotu sağa, pozitif ise sola dönmektedir. Sürü robotunun açısal hızı sola dönüş için $-\pi$, sağa dönüş π olarak belirlenmektedir. Sürü robotunun hızı ise engel uzaklığına bağlı olarak ($O_{M_{r,n}}$), k_1 katsayısına göre belirlenmektedir.

3.6. Performans Ölçütleri

Bir araya gelme metotlarının ve algoritmalarının performansını incelemek için robotlar arasındaki toplam mesafe (Total Distance-TM), kümelenme metriği (Cluster Metrics-KM), beklenen kümelenme boyutu (Expected Cluster Size- BKB) ve toplanma süresi ölçütleri kullanılmıştır. Bu metrikler robotların kümelenme, mekânsal dağılımı ve komşuluk ilişkilerine bağlı toplanma performansını gösteren ve literatürde tercih edilen ölçütlerdir.

3.6.1. Toplam mesafe (TM)

Toplam mesafe (TM), robotlar arasındaki toplam uzaklığı ölçmek için kullanılmaktadır (Martínez-Clark ve ark., 2018a; Soysal ve ark., 2007). Eşitlik 3.22'de her bir sürü robotunun toplam uzaklığının hesabı ifade edilmektedir. Burada TM (-) negatif olarak veya (+) olarak belirlenmektedir. TM'si sıfıra yakın değer gösteren robot grupları daha iyi toplanma performansı gösterir. Burada *uzaklık()* fonksiyonu her iki robot arasındaki uzaklık bilgisini döndürmektedir. TM bir araya gelme davranışının performansının değerlendirilmesinde ve özellikle bir araya gelme davranışı kalitesinin belirlenmesinde büyük öneme sahiptir.

$$TD = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{uzaklık}(R_i, R_j) \quad (3.22)$$

3.6.2. Beklenen kümelenme boyutu (BKB)

Beklenen kümelenme boyutu (BKB), bir robot kümesindeki herhangi bir robotun ait olduğu küme boyutunun hesaplaması için kullanılmaktadır (Soysal ve ark., 2007). Eşitlik 3.23’de BKB’nin hesaplanmasında bir sürü robotunun algıladığı diğer komşu robotlarla olan komşuluk ilişkisi tanımlanmaktadır. Komşuluk ilişkisinin olup olmadığının belirlenmesinde $komşu(R_i, R_j)$ fonksiyonu kullanılmaktadır. $komşu(R_i, R_j)$ fonksiyonu, R_i, R_j arasında bir komşuluk ilişkisi varsa mantıksal “1” döndürür, yoksa “0” döndürür. Bir sürü robotunun diğer bir robotu, komşu robot olarak tanımlanması için $YRÇ$ alanının içerisinde olması gerekmektedir.

$$komşu(R_i, R_j) = \begin{cases} 1 & \text{uzaklık}(R_i, R_j) < YRÇ \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (3.23)$$

Ayrıca bir sürü robotunun diğer sürü robotlarıyla komşuluk ilişkisi kurabilmesinin yanında komşuluk ilişkisi olmasa bile robotlar arasındaki yerel bağlantılarının da olması gerekmektedir. Sürü robotlarının komşuluk ilişkilerinden yararlanarak robotlar arasında yerel bağlantının kurulması için “*transitive closure*” algoritması kullanılmaktadır (Cohen, 1997). Eşitlik 3.24’de BKB ‘nin hesaplanması için her bir sürü robotunun bulunduğu küme boyutu $boyut(R_i)$ hesaplanmaktadır. $boyut(R_i)$ fonksiyonu, sürü robotunun komşuluk ilişkisi ve sürü robotunun diğer komşular arasında yerel bağlantıdan yararlanarak hesaplanır.

$$BKB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n boyut^2(R_i) \quad (3.24)$$

3.6.3. Kümelenme metriği (KM)

Kümelenme Metriği (KM), bir sürüdeki robotların bir araya gelme davranışı sergileme sürecindeki kümelenme ölçütüdür (Gauci ve ark., 2014b). Bir araya gelme davranışındaki temel amaç bir robot sürüsündeki tüm robotların birbirleriyle komşuluk ilişkisi kurarak tek bir küme oluşturmaktır. Eşitlik 3.24'e göre KM, bir sürüdeki en büyük kümenin robot sayısına oranıdır. En büyük küme en çok robot bulunan robot kümesidir. Bir araya gelme davranışı sergileyen bir sürüde KM=1 olması beklenmektedir.

$$KM[t] = \frac{\text{t. adımdaki en büyük kümedeki robot sayısı}}{\text{robot sayısı}(n)} \quad (3.24)$$

3.6.4. Toplanma süresi

Toplanma süresi, bir robot sürüsündeki tüm robotların birbirlerinin algılama alanları içerisine girinceye kadarki geçen süredir. Robotların herhangi birinin algılama alanına diğer robotların tümü girdiğinde bir araya gelme işlemi sonlandırılmaktadır (Mısır ve ark., 2020).

Toplanma süresinin esas alınması için, sürü robotlarının herhangi birinin YRÇ'sinde, GRÇ'de bulunan bütün robotları algılamalıdır. Herhangi bir robotun tüm robotları algılayabilmesi için diğer robotların ağırlık merkezinin bu robotun YRÇ 'si içerisinde olması gereklidir. Sürü robotlarının GRÇ üzerindeki ağırlık merkezi konumları Eşitlik 3.25'teki gibi ifade edilmektedir. GRÇ üzerindeki sürü robotlarının ağırlık merkezi her bir sürü robotunun x_r ve y_r konumlarının ortalaması bulunarak hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned}
x_{\text{merkez}} &= \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n x_r \\
y_{\text{merkez}} &= \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n y_r
\end{aligned} \tag{3.25}$$

Eşitlik 3.26’da sürü robotların ağırlık merkezinin, herhangi bir robotun YRÇ içerisinde olup olmadığının testi ifade edilmektedir. Burada R_M , sürü robotlarının YRÇ boyutunu ifade etmektedir. Sürü robotları Eşitlik 3.26’da verilen koşulu sağlamaları durumunda bir araya gelme şartını yerine getirmiş olmaktadır.

$$(y_{\text{merkez}} - x_r)^2 + (y_{\text{merkez}} - y_r)^2 \leq R_M^2 \tag{3.26}$$

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, geliştirilen esnek ve ölçeklenebilir öz örgütlenebilen bir araya gelme algoritması, bulanık mantık tabanlı öz örgütlenebilen bir araya gelme metodu ve dinamik etkileşimli öz örgütlenebilir bir araya gelme metodu sonuçları açıklanmaktadır. Geliştirilen yöntemler MATLAB ortamında geliştirilen “Mobile Robotic Toolbox”da simüle edilmiştir “Mobile Robotic Toolbox” sürü robotu uygulamaları ve çoklu robot sistemlerinin geliştirilmesi için kullanılabilen bir ara yüzüdür.

4.1. Esnek ve Ölçeklenebilir Öz Örgütlenebilir Bir Araya Gelme Algoritması Sonuçları

Geliştirilen esnek ve ölçeklenebilir bir araya gelme algoritması için Çizelge 4’deki gibi benzetim ortamında sistematik deneyler uygulanmıştır. Sistematik deneyler arena boyutu, robot algılama yarıçapı ve robot sayısına bağlı olarak belirlenmiştir. Uygulanan simülasyon deneylerindeki amaç sürü robotlarının, değişen arena boyutlarında ve değişen robot algılama özellikleriyle ölçeklenebilir bir şekilde farklı robot sayılarında bu davranışı uygulayabilmeleridir.

4.1.1. Simülasyon kurulumu

Çizelge 4. Esnek ve ölçeklenebilir öz örgütlenebilen bir araya gelme algoritması simülasyon kurulumu

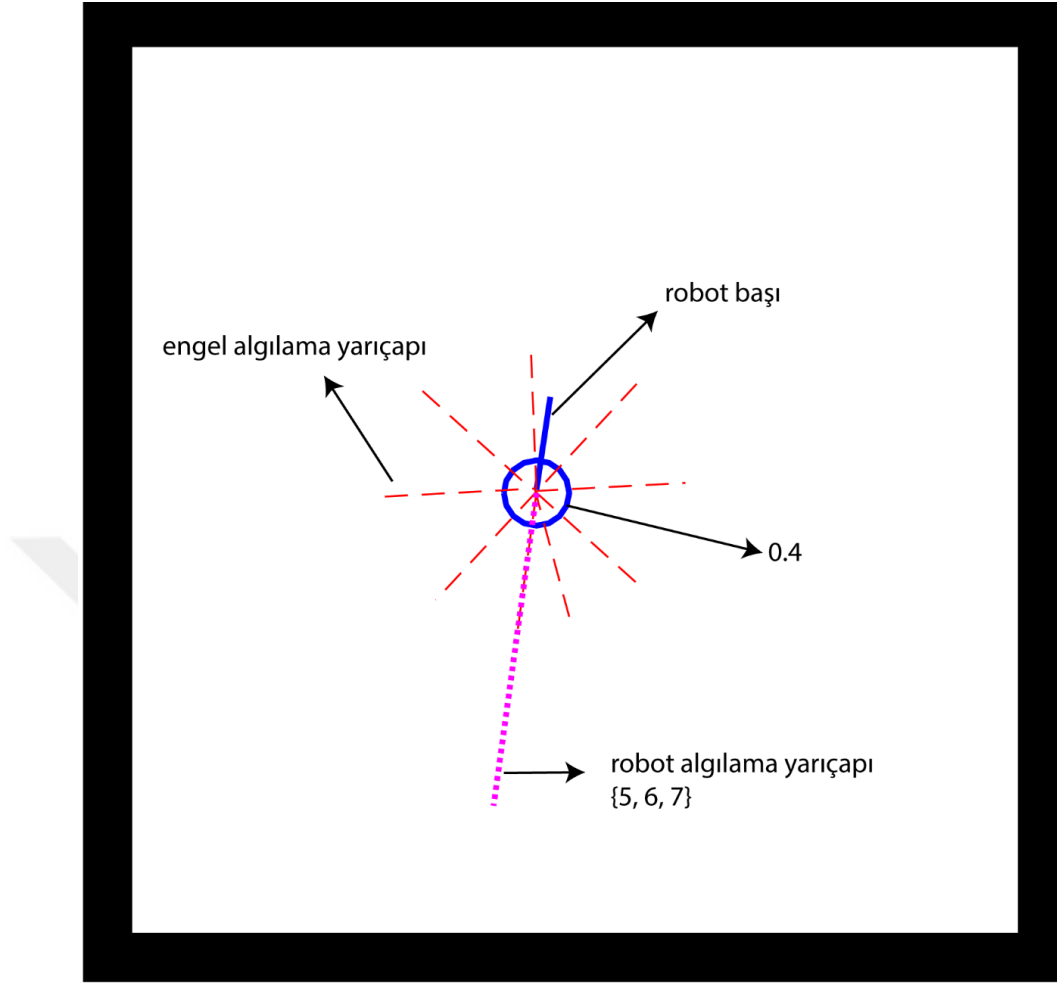
Arena Boyutu	{15x15, 20x20, 25x25}
Robot algılama yarıçapı	{5, 6, 7}
Robot sayısı	{5, 10, 15, 20}

Çizelge 4’de belirtilen robot algılama yarıçapı {5, 6, 7}, robot sayıları {5, 10, 15, 20} ve arena boyutlarına 15x15, 20x20, 25x25 bağlı olarak 36 farklı sistematik deney uygulanmıştır. Bir araya gelme davranışının performansını ölçmek için toplanma süresi ve TM metriği kullanılmıştır. Toplanma süresi, simülasyon deneylerinin başlangıç anından, sonlandırıldığı ana kadar geçen simülasyon adım sayısıdır. TM metriği simülasyon deneylerinin başlangıç anından, bitiş zamanına kadar robotlar arasındaki toplam uzaklık bilgisidir. Bu simülasyon sonuçları için TM metriği pozitif değer olarak hesaplanmıştır.

Simülasyon deneylerinde, robotlar arena platformuna rastgele bir şekilde dağıtılmaktadır. Bu dağılım arena boyutu büyüklüğüne ve robot sayısına bağlı olarak ayarlanmaktadır. Rastgele dağıtılan robotlar birbirleriyle örtüşecek şekilde aynı konumlarda yerleşmeleri durumunda, rastgele dağılım sağlanana kadar yani robotların birbirleriyle örtüşmemeleri durumuna kadar tekrarlanmaktadır. Arena boyutu küçüldükçe ve robot sayısı arttıkça robotların arenada konumlandırılması örtüşmeden dolayı zordur. Bu durumu göz önüne alarak, uygulanan simülasyon kurulumu için arena boyutu ve robot sayısı robotların örtüşmeyeceği şekilde belirlenmiştir.

Simülasyon ortamında uygulanan sistematik deneyler 100 kez tekrarlanmıştır. Sonuçların analizinde tekrarlanan sonuçların ortanca değerlerine göre performans değerlendirmeleri yapılmıştır.

Simülasyon deneylerinde kullanılan sürü robotu holonomik olmayan (non-holonomik) modele sahiptir. Robot yarıçapı $r = 0.4$ birim olarak belirlenmiştir. Sürü robotu dairesel bir yapıya sahiptir. Robot algılama yarıçapı sistematik deneyler yoluyla her bir deney için {5, 6, 7} olarak belirlenmiştir. Simülasyon deney platformu dört tarafı engellerle sınırlandırılmış kare yapıdadır. Sürü robotları bu kare platformu içerisinde bir araya gelme davranışını sergilemektedirler. Kare platformunun sınırları engel olarak tanımlanmıştır. Şekil 4.1’de simülasyon deney platformu ve kullanılan robot benzetimi gösterilmektedir.

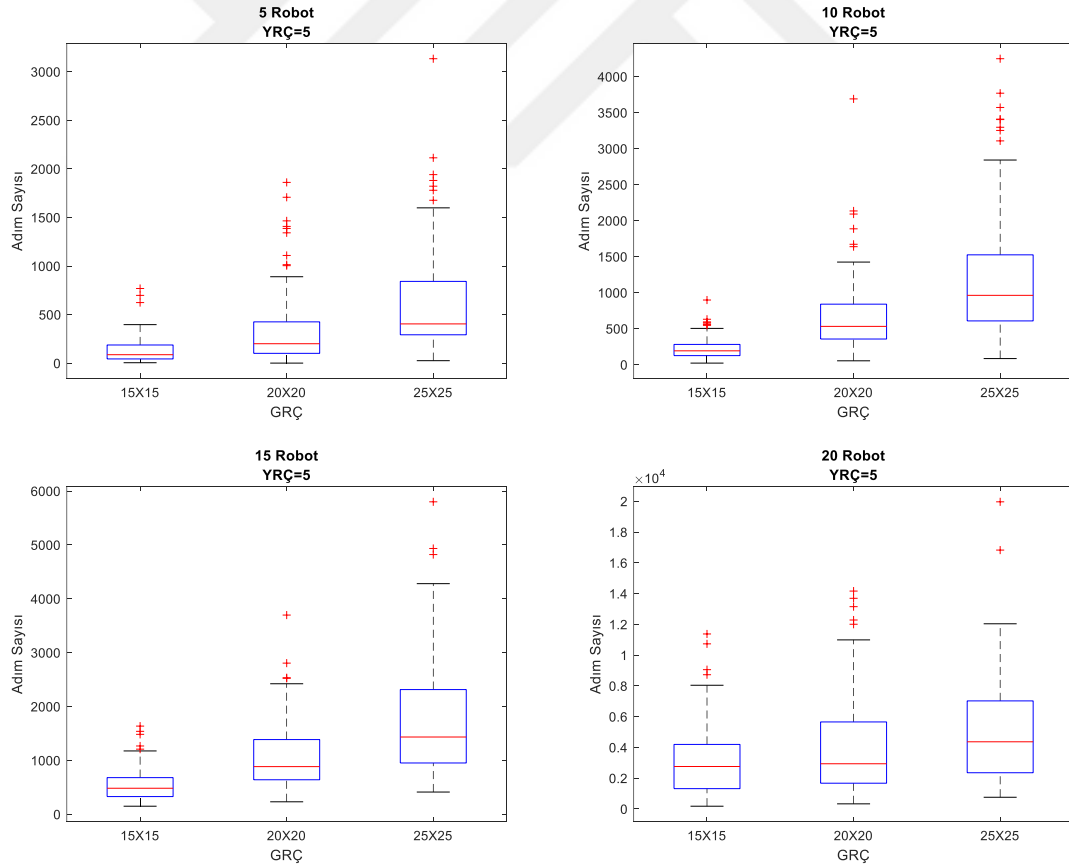


Şekil 4.1. Simülasyon deney platformu ve robot

4.1.2. Simülasyon sonuçları

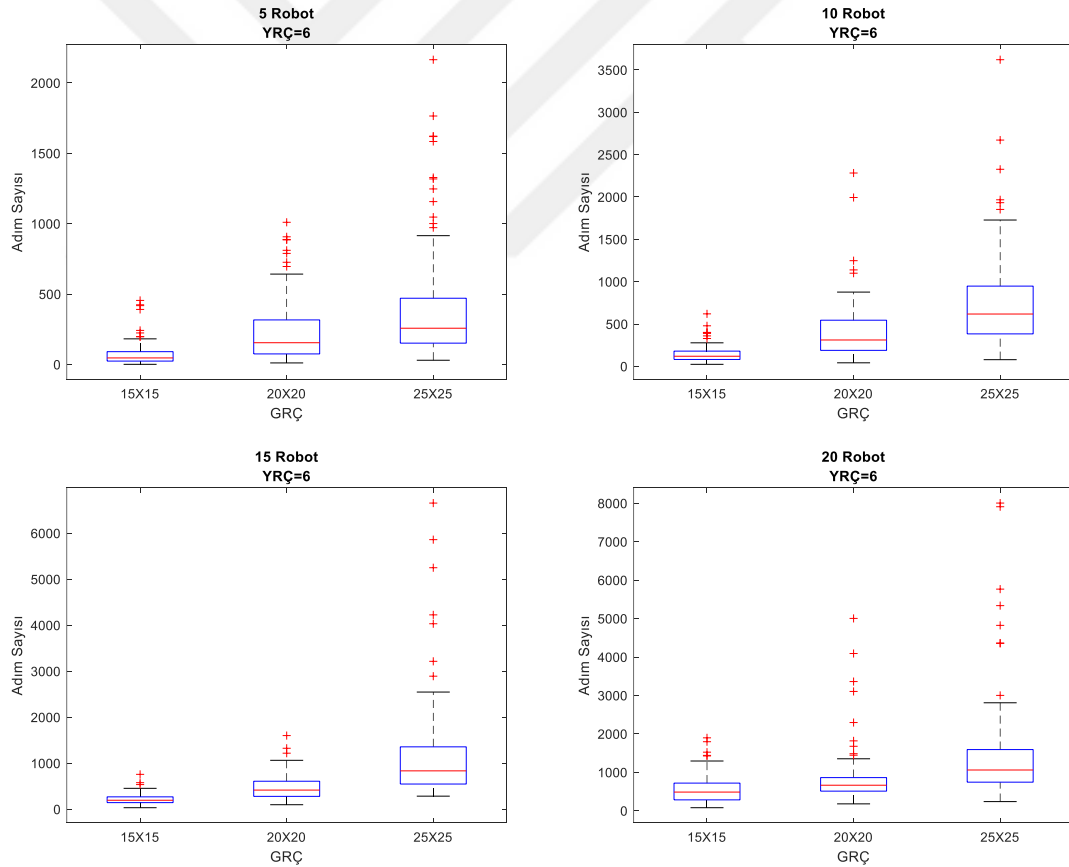
Bu bölümde önerilen toplanma metodunun farklı arena boyutu, farklı robot sayısı ve farklı algılama yarıçapları için simülasyon deney sonuçlarını incelenmiştir. simülasyon deney sonuçları arena boyutu, robot sayısı ve robot algılama yarıçapına göre kutu grafiği ile ifade edilmiştir. Kutu grafiklerinde kırmızı düz çizgi ile belirtilen değer toplanma sürelerinin ortanca değeridir. Ayrıca kutu grafiklerinde belirtilen kırmızı “+” işareti aşırı uç (outlier) toplanma süresi değerleridir. Aşırı uç değer elde edilen simülasyon deney sonuçlarının diğer sonuçlara göre önemli ölçüde farklı olduğunu ifade eden değerdir. Aşırı uç değeri de bir araya gelme davranışının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Şekil 4.2’de 5, 10, 15 ve 20 sayılarındaki sürü robotunun 15x15, 20x20, 25x25 birim kare alanlar için 5 birim algılama yarıçaplarına bağlı toplanma süreleri gösterilmektedir. Dikey eksen simülasyon adım sayısını belirtmektedir. Yatay eksen arena boyutlarına (GRÇ) göre simülasyon deney dağılımlarını belirtmektedir. 5 birim yarıçapına sahip sürü robotlarında uygulanan sistematik simülasyonlarda elde edilen sonuçlara göre arena boyutunun artmasıyla toplanma süresinin (adım sayısının) arttığı görülmektedir. Aynı şekilde arena boyutu sabit kalmak şartıyla robot sayının artmasıyla toplanma adım sayısının arttığı görülmektedir. 5 birim algılama yarıçapı için uygulanan deneylerde en düşük ortanca değeri 87.5 adım olarak 15x15 arena boyutunda 5 robotla, en yüksek ortanca değeri ise 4366 adım olarak 25x25 arena boyunda 20 robot ile gerçekleşmiştir. En yüksek aşırı uç değeri 19966 adım olarak 25x25 arena boyutunda 20 robotla uygulanan deneyde gözlemlenmiştir. En çok aşırı uç elde edilen deneyler 25x25 arena boyutlarında uygulanan simülasyon sonuçlarından elde edilmiştir



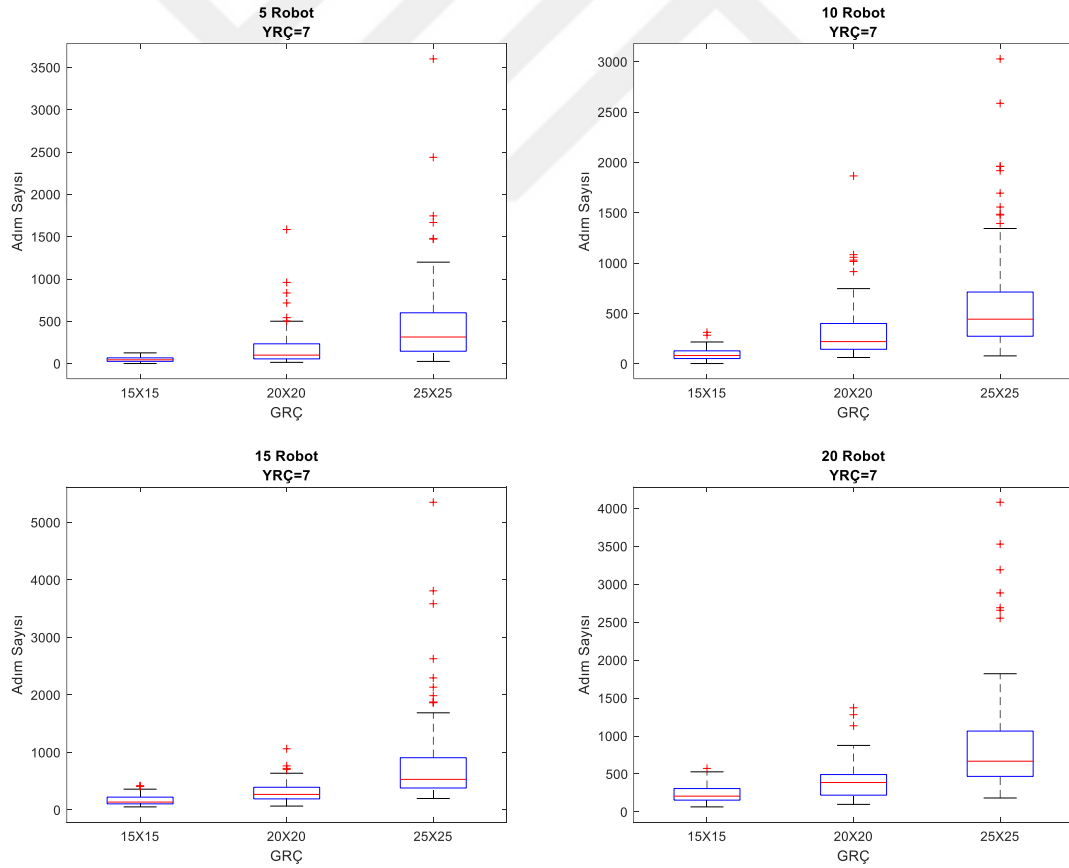
Şekil 4. 2. Sırasıyla 5,10,15 ve 20 sürü robotunun 15x15, 20x20, 25x25 birim kare alanlar için 5 birim algılama yarıçaplarına bağlı toplanma süreleri

Şekil 4.3’de 5, 10, 15 ve 20 sürü robotunun 15x15, 20x20, 25x25 birim kare alanlar için 6 birim algılama yarıçaplarına bağlı toplanma süreleri gösterilmektedir. Algılama yarıçapının değişiminin toplanma süresine olan etkisini karşılaştırmak amacıyla sistematik deneyler 6 birim yarıçapına göre yapılmıştır. Algılama yarıçapı 6 birim olan sürü robotlarıyla uygulanan deneylerde 5 birim yarıçapına göre toplanma süresi kısalmıştır. 6 birim algılama yarıçapı için uygulanan simülasyonlarda en düşük ortalama değeri 46 adım olarak 15x15 arena boyutunda 5 robotla, en yüksek ortalama değeri ise 1060 adım olarak 25x25 arena boyunda 20 robot ile gerçekleşmiştir. En yüksek aşırı uç değeri 8005 adım olarak 25x25 arena boyutunda 20 robotla uygulanan simülasyonda gözlemlenmiştir.

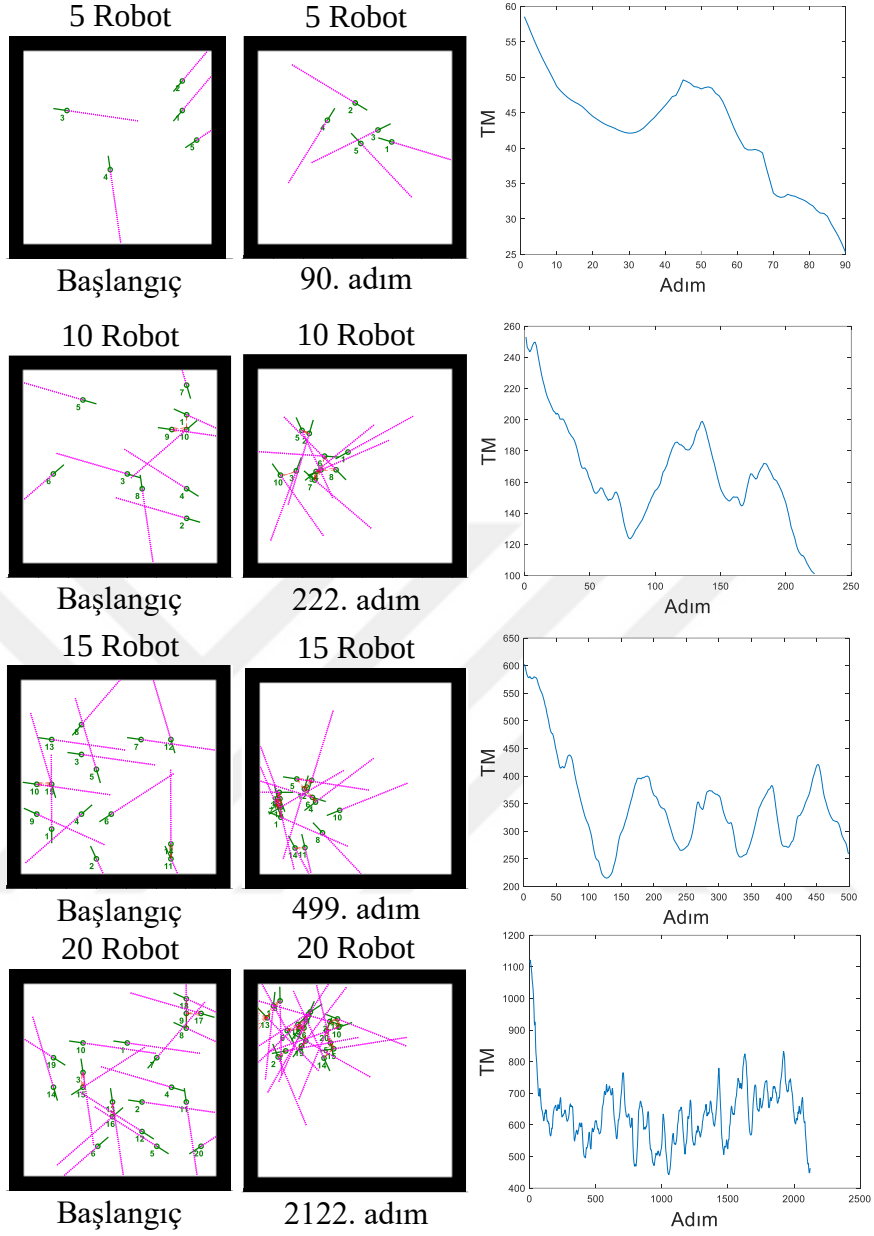


Şekil 4. 3. 5, 10, 15 ve 20 sürü robotunun 15x15, 20x20, 25x25 birim kare alanlar için 6 birim algılama yarıçaplarına bağlı toplanma süreleri

Şekil 4.4’de 5, 10, 15 ve 20 sürü robotunun 15x15, 20x20, 25x25 birim kare alanlar için 7 birim algılama yarıçaplarına bağlı toplanma süreleri gösterilmektedir. Şekil 4.4’de görüldüğü gibi robot sayısı ve arena boyutu arttıkça toplanma süresi artmaktadır. 7 algılama yarıçapı için uygulanan simülasyonlarda en düşük ortanca değeri 45 adım olarak 15x15 arena boyutunda 5 robotla, en yüksek medyan değeri ise 670 adım olarak 25x25 arena boyutunda 20 robot ile gerçekleşmiştir. En yüksek aşırı uç değeri 5351 adım olarak 25x25 arena boyutunda 15 robotla uygulanan sistematik simülasyonlarda gözlemlenmiştir. Algılama yarıçapı 5 ve 6 birim için uygulanan sistematik simülasyon deneyleri toplanma süresi bakımından 7 birim yarı çapındaki deneylerle ile karşılaştırıldığında, 7 birim algılama yarıçapı için toplanma süresinin azaldığı gözlemlenmiştir.

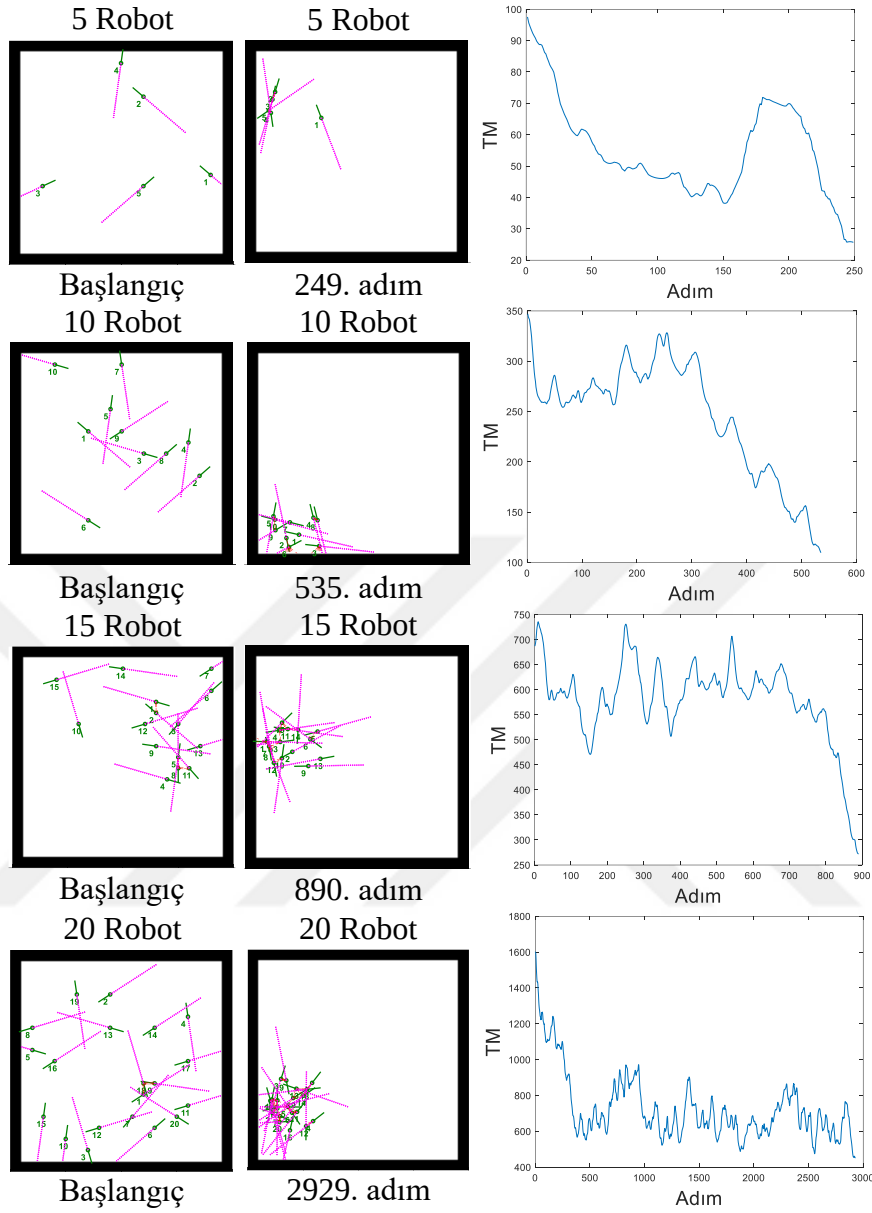


Şekil 4. 4. 5, 10, 15 ve 20 sürü robotunun 15x15, 20x20, 25x25 birim kare alanlar için 7 birim algılama yarıçaplarına bağlı toplanma süreleri



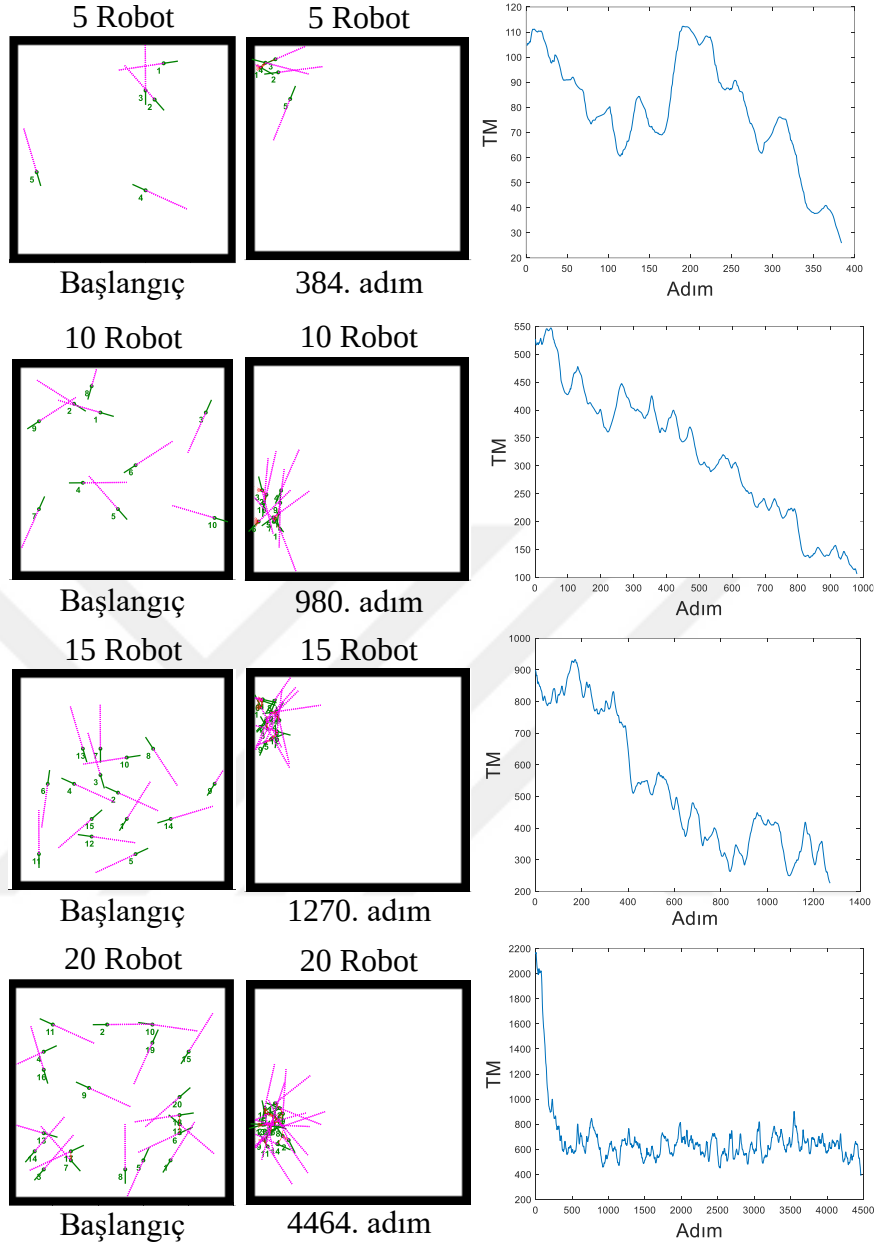
Şekil 4. 5. 15x15 arena için 5 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları

Şekil 4.5’de 5 birim algılama yarıçapı ve 15x15 arena boyutları için sistematik simülasyonlardan seçilmiş 5, 10, 15 ve 20 robot ile uygulanan örnek deneyler gösterilmektedir. Bu simülasyonlarda toplanma sürecinin başlangıç ve bitiş pozisyonlarında sürü robotlarının durumları gösterilerek farklı büyüklükteki arena boyutu ve farklı sayıdaki robotlar için değişen toplanma süreleri ve TM verilmektedir.



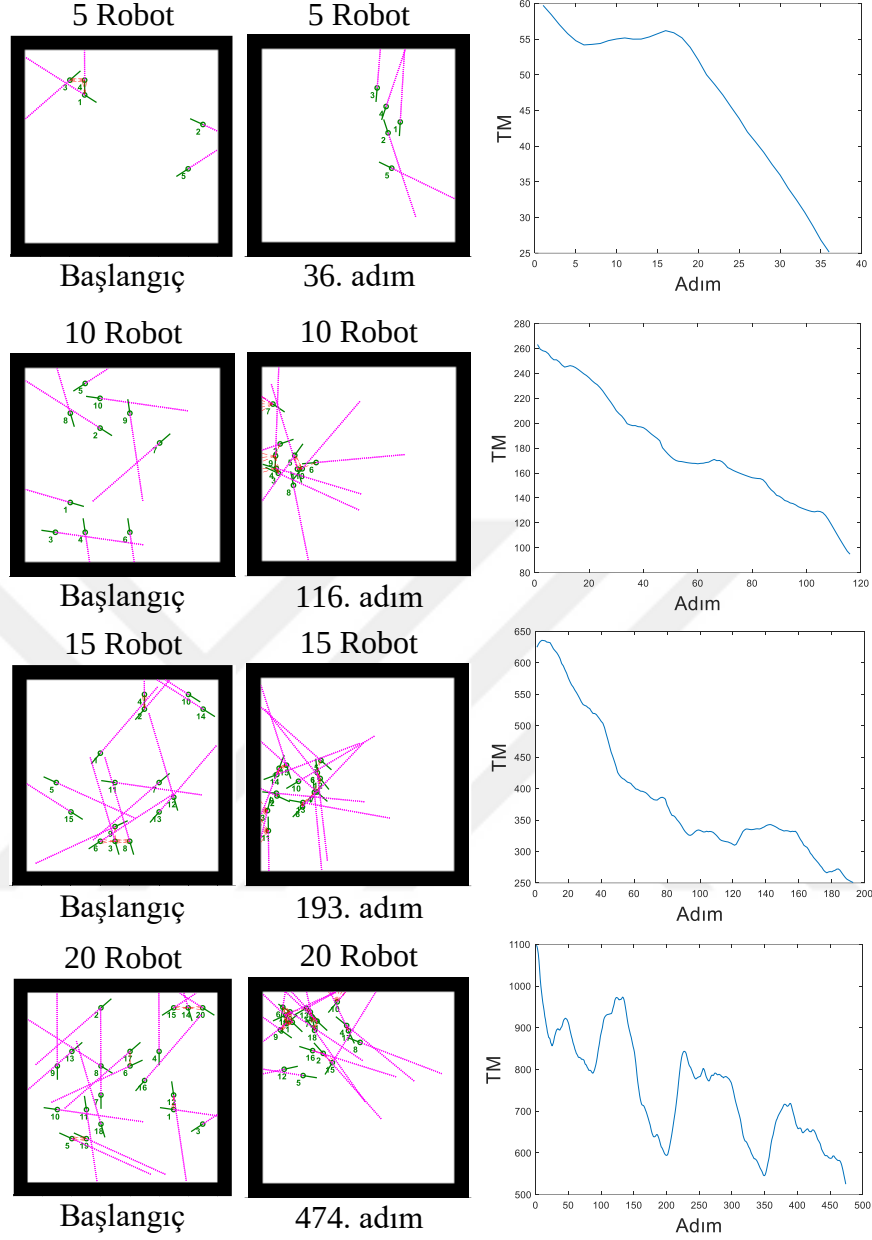
Şekil 4. 6. 20x20 arena için 5 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları

Şekil 4.6'da 5 birim algılama yarıçapına sahip sürü robotları için 15x15 arena boyutlarında 5, 10, 15 ve 20 robot ile uygulanan örnek simülasyon sonuçları gösterilmektedir. 5, 10, 15 ve 20 robot için uygulanan deneyler sırasıyla 249, 535, 890 ve 2929. adımda bir araya gelme koşulu sağlanmış ve TM ölçütleri sırasıyla en son 25.83, 109.7, 272.7 ve 452.6 olmuştur.



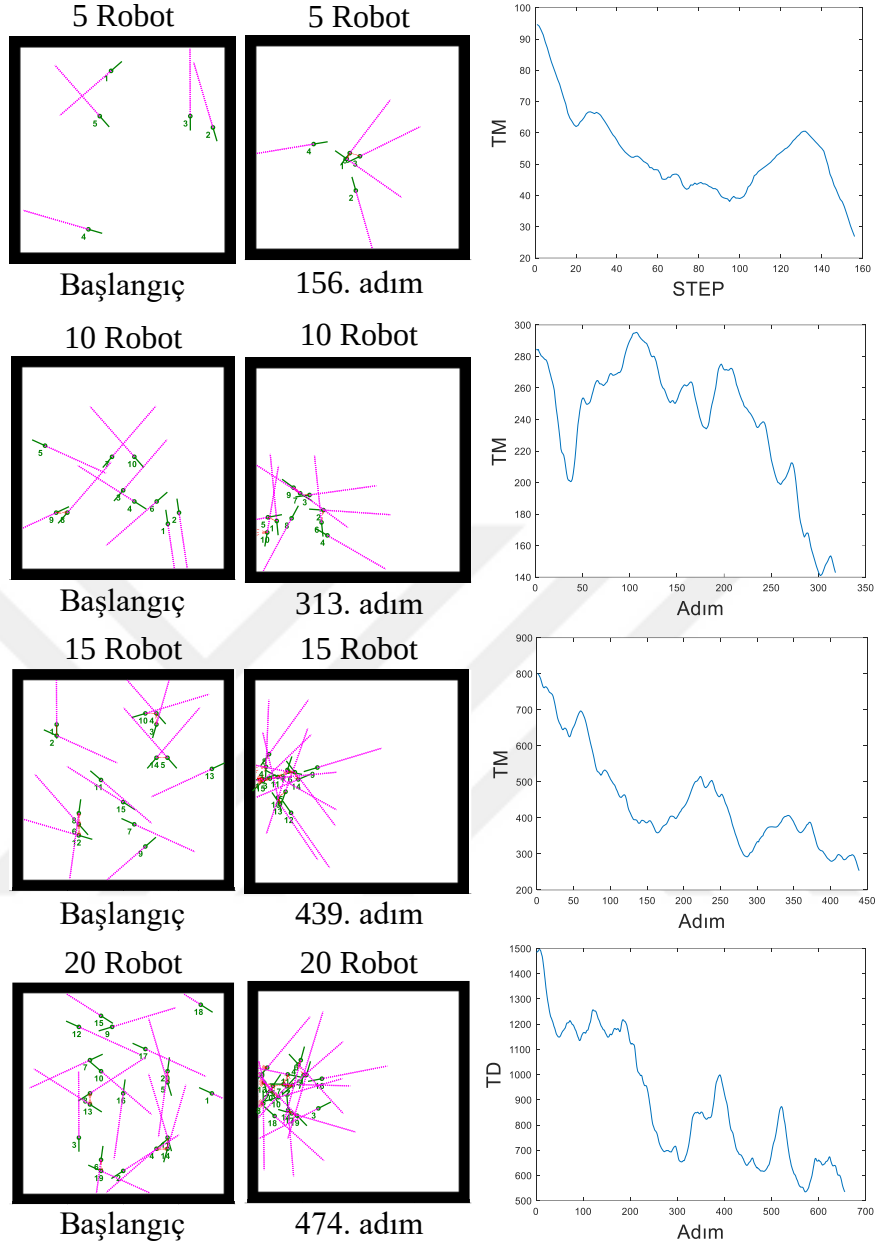
Şekil 4. 7. 25x25 arena için 5 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları

Şekil 4.7’de 25x25 arena boyutunda 5 birim algılama yarıçapındaki sürü robotları için 5,10,15 ve 20 sürü robotu ile uygulanan sistematik deney sonucu gösterilmektedir. Sırasıyla 5, 10, 15 ve 20 robot için bir araya gelme davranışı tamamlanma süreleri 384, 980, 1270, 4464 olarak elde edilmiştir. TM metrik sonuçları ise sırasıyla 25.92, 106.2, 226.1, ve 388.8 olarak elde edilmiştir.



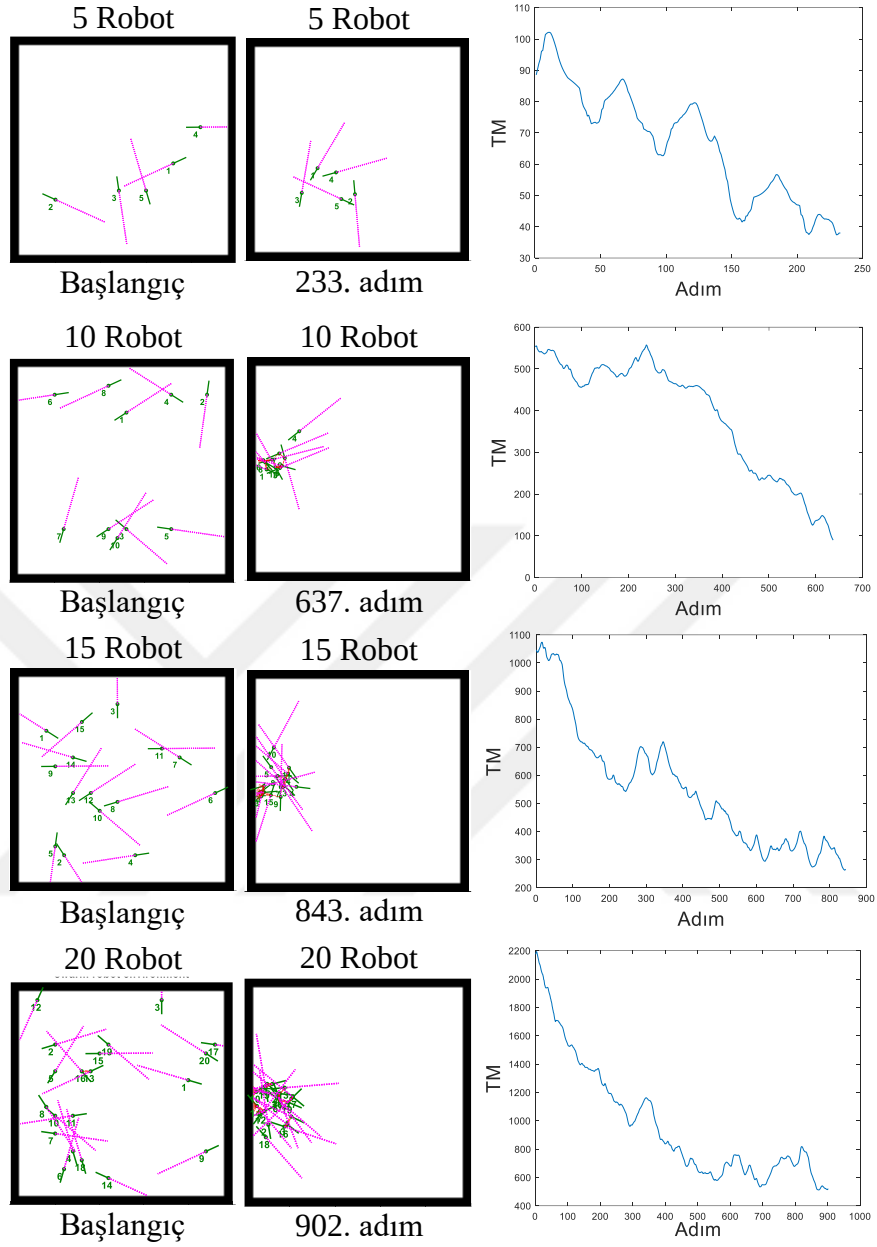
Şekil 4. 8. 15x15 arena için 6 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları

Şekil 4.8’de 15x15 arena boyutunda 6 birim algılama yarıçapındaki sürü robotları ile farklı robot sayılarında uygulanan sistematik deney sonuçları gösterilmektedir. Sırasıyla 5, 10, 15 ve 20 robot için bir araya gelme davranışı tamamlanma süreleri 36, 116, 193, 474 olarak elde edilmiştir. Sırasıyla TM metrik sonuçları 25.15, 94.87, 251.8 ve 525 olarak elde edilmiştir.



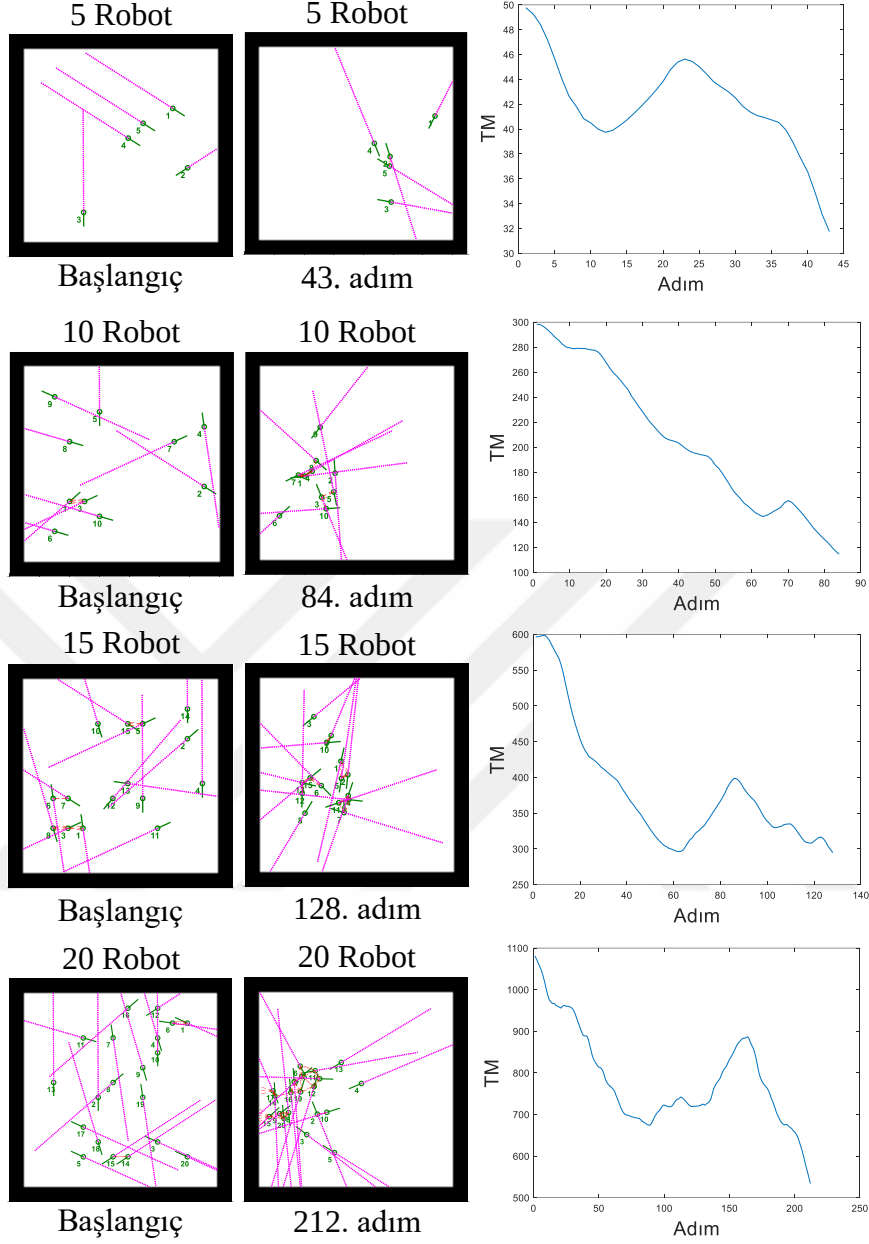
Şekil 4. 9. 20x20 arena için 6 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları

Şekil 4.9’da algılama yarıçapı 6 birim olan sürü robotlarının 20x20 arena boyutunda 5, 10, 15 ve 20 robot için elde edilen sistematik simülasyon sonuçları gösterilmektedir. 5 robot için 156., 10 robot için 313., 15 robot için 439. ve 20 robot için 474. adımda bir araya gelme tamamlanmıştır. TM ölçütleri 5, 10, 15 ve 20 robot için sırasıyla 28.87, 144.9, 253.6 ve 537.6’dır.



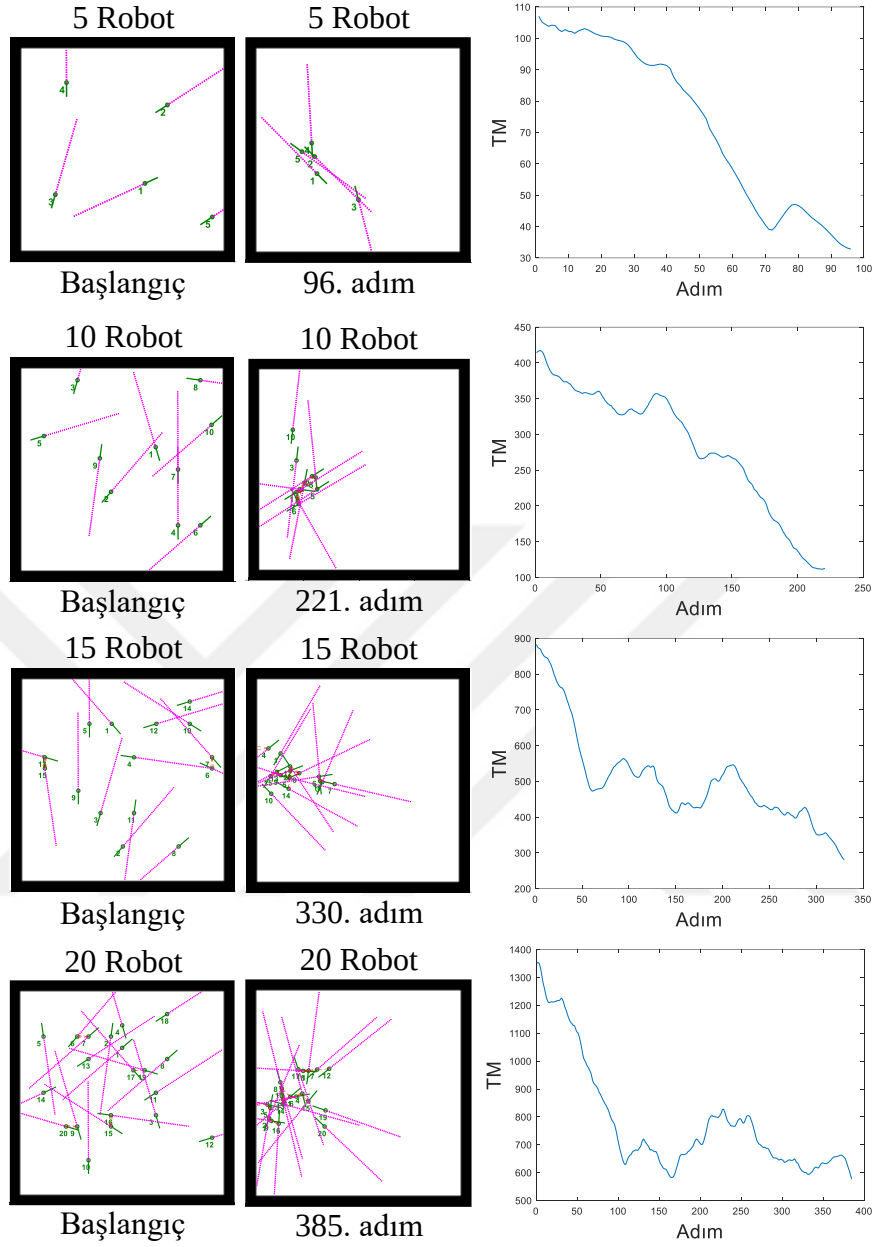
Şekil 4.10. 25x25 arena için 6 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları

Şekil 4.10'da 25x25 arena boyutunda 6 birim algılama yarıçapındaki sürü robotları ile farklı robot sayılarında sistematik deney sonuçları gösterilmektedir. 5, 10, 15 ve 20 robot için sırasıyla bir araya gelme davranışı tamamlanma süreleri 233, 637, 843, 902 olarak elde edilmiştir. Sırasıyla TM metrik sonuçları 38, 89.51, 266.2 ve 518.9 olarak elde edilmiştir.



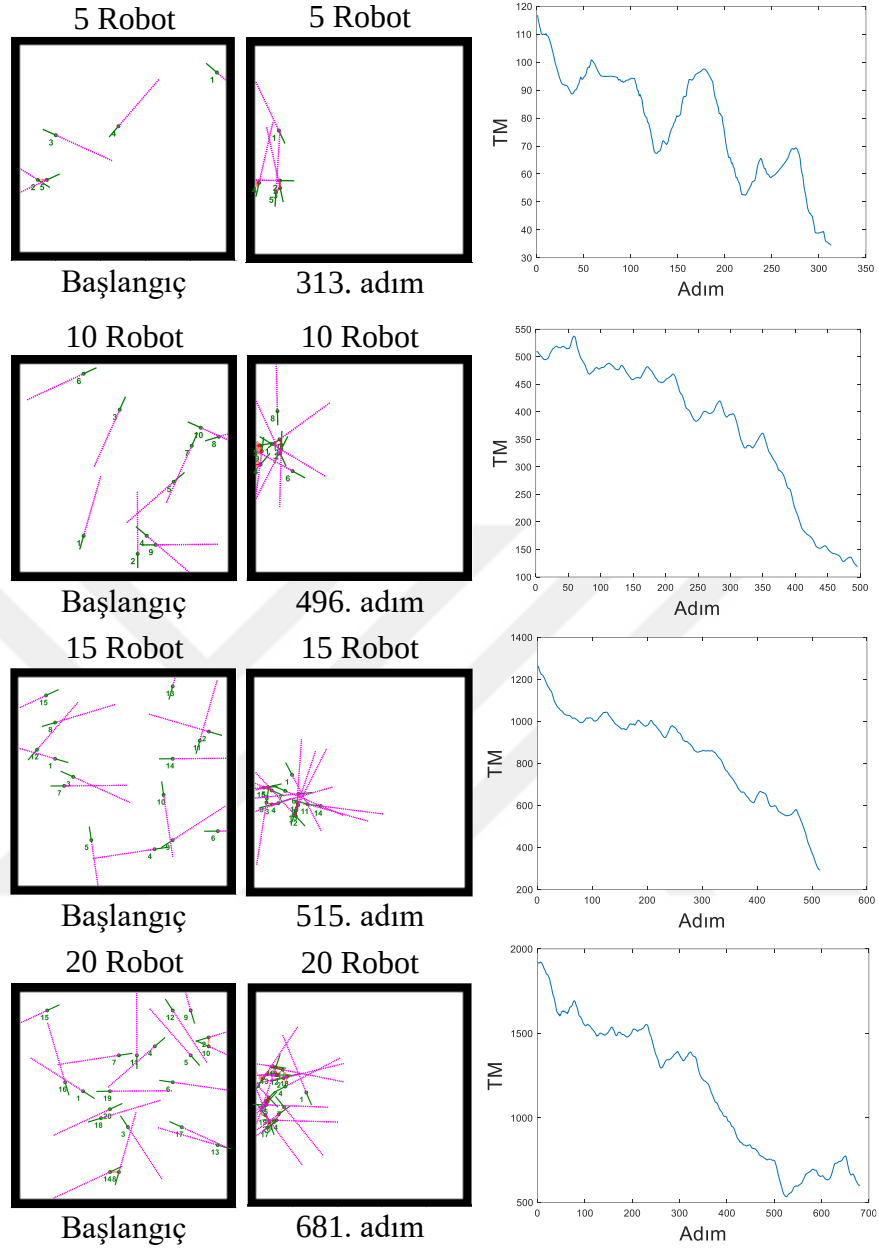
Şekil 4. 11. 15x15 arena için 7 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları

Şekil 4.11’de 15x15 arena boyutunda 7 birim algılama yarıçapındaki sürü robotları için 5,10,15 ve 20 sürü robotu ile simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Sırasıyla 5, 10, 15 ve 20 robot için bir araya gelme davranışı tamamlanma süreleri 43, 84, 128, 212 olarak elde edilmiştir. TM metrik sonuçları ise sırasıyla 31.7, 114.6, 294.9 ve 534.2 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.12. 20x20 arena için 7 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları

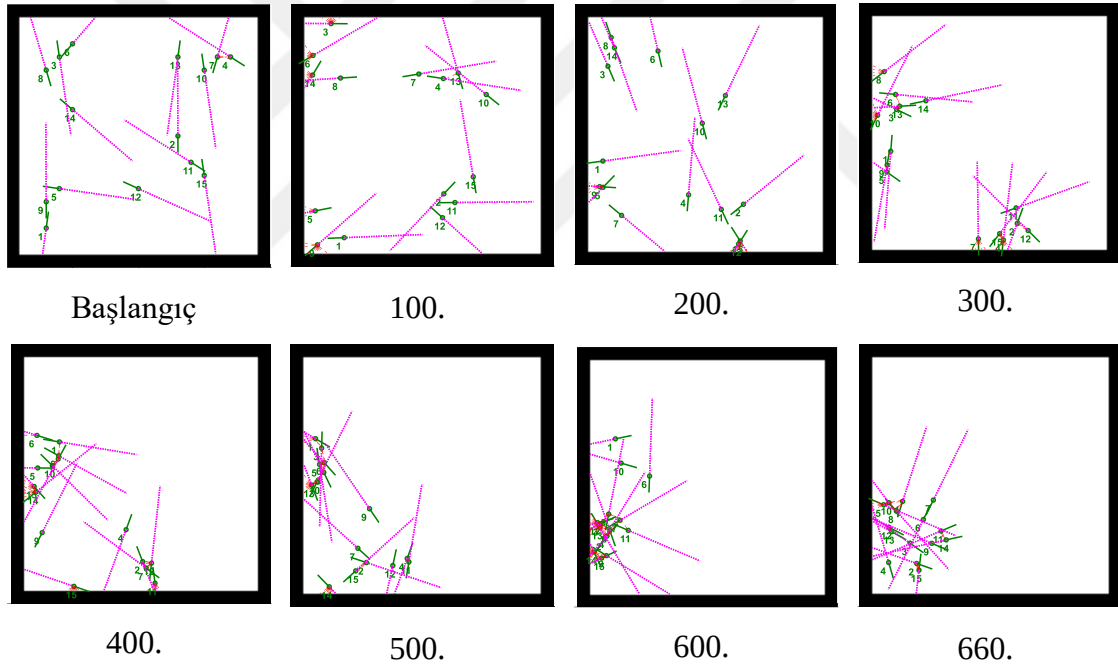
Şekil 4.12’de 20x20 arena boyutunda 7 birim algılama yarıçapındaki sürü robotları ile farklı robot sayılarında sistematik simülasyon sonuçları gösterilmektedir. 5, 10, 15 ve 20 robot için sırasıyla bir araya gelme davranışı tamamlanma süreleri 96, 221, 330, 385 olarak elde edilmiştir. Sırasıyla TM metrik sonuçları 32.8, 112.3, 280.5 ve 577.1 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.13. 25x25 arena için 7 birim algılama yarıçapı için TM ve başlangıç bitiş konumları

Şekil 4.13’de algılama yarıçapı 7 birim olan sürü robotlarının 25x25 arena boyutunda 5, 10, 15 ve 20 robot için elde edilen sistematik simülasyon sonuçları gösterilmektedir. 5 robot için 313, 10 robot için 496, 15 robot için 515 ve 20 robot için 681 adımda bir araya gelme tamamlanmıştır. TM ölçütleri 5, 10, 15 ve 20 robot için sırasıyla 34.4, 120.8, 292.5 ve 600.2’dir.

Şekil 4.14’de 36 farklı sistematik simülasyon deneyinin 100 kez tekrarlanmasından elde edilen deneylerden birinin bir araya gelme süreci gösterilmektedir. Bu simülasyon 20x20 arena boyutunda 6 birim algılama yarıçapına sahip 15 adet sürü robotu için yapılmıştır. Bir araya gelme süreci boyunca 300. adıma gelindiğinde üç ayrı sürü robotu grubu olduğu görülür. Bu üç ayrı gruptaki her robot kendi grubu içinde ortak yönde hareket sergilemiştir. Böylece 400., 500., ve 600. adımda gösterildiği gibi her grup zamanla birbirleri ile birleşmiştir. Bir araya gelme süreci 660. adımda tamamlanmıştır. Sürü robotlarının rastgele yerleştirildiği pozisyondan, bir araya gelme davranışının tamamlanmasına kadar geçen her 100 adımda örnekler alınmıştır. Simülasyon 660. adımda her bir sürü robotu birbirlerinin algılama sınırlarına girdiğinde tamamlanmıştır.



Şekil 4.14. 20x20 arena boyutunda 6 birim algılama yarıçapında 15 robot için örnek bir araya gelme süreci

4.1.3. İstatistiksel analiz

Bu bölümde robot sayısı, arena boyutu ve algılama yarıçapına göre sürü robotlarının bir araya gelme davranışının performansı istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Performans ölçütü olarak robotların toplanma süreleri temel alınmıştır.

4.1.4. Algılama yarıçapına göre toplanma süresinin istatistiksel analizi

Esnek ve ölçeklenebilir öz örgütlenebilen bir araya gelme algoritmasının toplanma süresi, algılama yarıçapına (YRÇ) göre değerlendirilmiştir. Sürü robotlarının bir araya gelme sürelerinin algılama yarıçapına göre değerlendirmek için (Kruskal-Wallis H $p=0.00$)(Betzler ve ark., 2017) testi kullanılmıştır. Kruskal- Wallis H testi ikiden fazla parametrede anlamlı bir farklılık olup olmadığının testidir. Kruskal-Wallis H testi ile algılama yarıçapına göre toplanma süreleri arasında anlamlı farklılık olduğu tespit edilmiştir. Algılama yarıçapı arttıkça toplanma süresi azalmaktadır. 5, 6 ve 7 birimlik yarıçap uzunlukları ile oluşturulmuş gruplar arasındaki farklılığı karşılaştırmak için Tamhane testi kullanılmıştır. Çizelge 5’de 5, 6 ve 7 birim algılama yarıçaplı grupların Tamhane testine göre birbirleri arasındaki farklılıklar gösterilmiştir.

Çizelge 5’deki değerlendirmelere göre YRÇ 5 birim olan grubun toplanma süresi diğer gruplardan daha fazladır. YRÇ 6 birim olan grubun toplanma süresi 5 birime göre daha az, 7 birime göre daha fazladır. YRÇ 7 birim olan grubun toplanma süresi diğerlerine göre daha azdır. YRÇ’ye göre istatistiksel analiz değerlendirildiğinde algılama yarıçapının büyümesi toplanma süresini kısaltmıştır.

Çizelge 5. Algılama yarıçapına göre Tamhane testi analiz sonuçları

(I) YRÇ	(J) YRÇ	Fark (I-J)	p
5 birim	6 birim	1009.44	< 0.01
	7 birim	1189.89	< 0.01
6 birim	5 birim	-1009.44	< 0.01
	7 birim	180.45	< 0.01
7 birim	5 birim	-1189.89	< 0.01
	6 birim	-180.45946	< 0.01

4.1.5. Robot sayısına göre toplanma süresinin istatistiksel analizi

Geliştirilen bir araya gelme algoritmasının uygulanan sistematik deneylerden alınan sonuçlara göre toplanma süresi performansı, robot sayısına göre istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Robot sayısına göre toplanma süreleri arasında anlamlı farklılık vardır (Kruskal-Wallis H $p=0.00$). Farklı robot sayısı grupları arasındaki farklılık Tamhane testi ile belirlenmiştir. Çizelge 6’da 5, 10, 15, 20 robot için birbirleri arasındaki farklılıklar gösterilmektedir. 5, 10, 15, 20 robot sayılarına göre yapılan testlerde toplanma süreleri robot sayısı arttıkça artmaktadır. Robot sayısının artmasıyla toplanma süresinin artması beklenen bir durumdur. Çünkü daha fazla robot bir araya gelmek için daha çok robotla birlikte hareket eder.

Çizelge 6. Robot sayısına göre Tamhane testi analiz sonuçları

(I) Robot sayısı	(J) Robot sayısı	Fark (I-J)	p
5 Robot	10 Robot	-211.58	< 0.01
	15 Robot	-442.59	< 0.01
	20 Robot	-1579.33	< 0.01
10 Robot	5 Robot	211.58	< 0.01
	15 Robot	-231.01	< 0.01
	20 Robot	-1367.74	< 0.01
15 Robot	5 Robot	442.59	< 0.01
	10 Robot	231.01	< 0.01
	20 Robot	-1136.73	< 0.01
20 Robot	5 Robot	1579.33	< 0.01
	10 Robot	1367.74	< 0.01
	15 Robot	1136.73	< 0.01

4.1.6. Arena boyutuna göre toplanma süresinin istatistiksel analizi

Bu kısımda toplanma süresi arena boyutuna göre istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Arena boyutuna göre toplanma süreleri arasında anlamlı farklılık vardır (Kruskal- Wallis H $p=0.00$). Arena boyutu büyüdükçe toplanma süresi artmaktadır. Arena boyutları arasındaki farklılık Tamhane Testi ile belirlenmiştir. Çizelge 7’de 15x15, 20x20 ve 25x25 arena boyutlarının arasındaki toplanma süresi arasındaki farklılıklar gösterilmektedir.

Çizelge 7. Robot sayısına göre Tamhane testi analiz sonuçları

(I) Arena Boyutu	(J) Arena Boyutu	Fark (I-J)	p
15x15	20x20	-320.85	< 0.01
	25x25	-815.84	< 0.01
20x20	15x15	320.85	< 0.01
	25x25	-494.98	< 0.01
25x25	15x15	815.84	< 0.01
	20x20	494.98	< 0.01

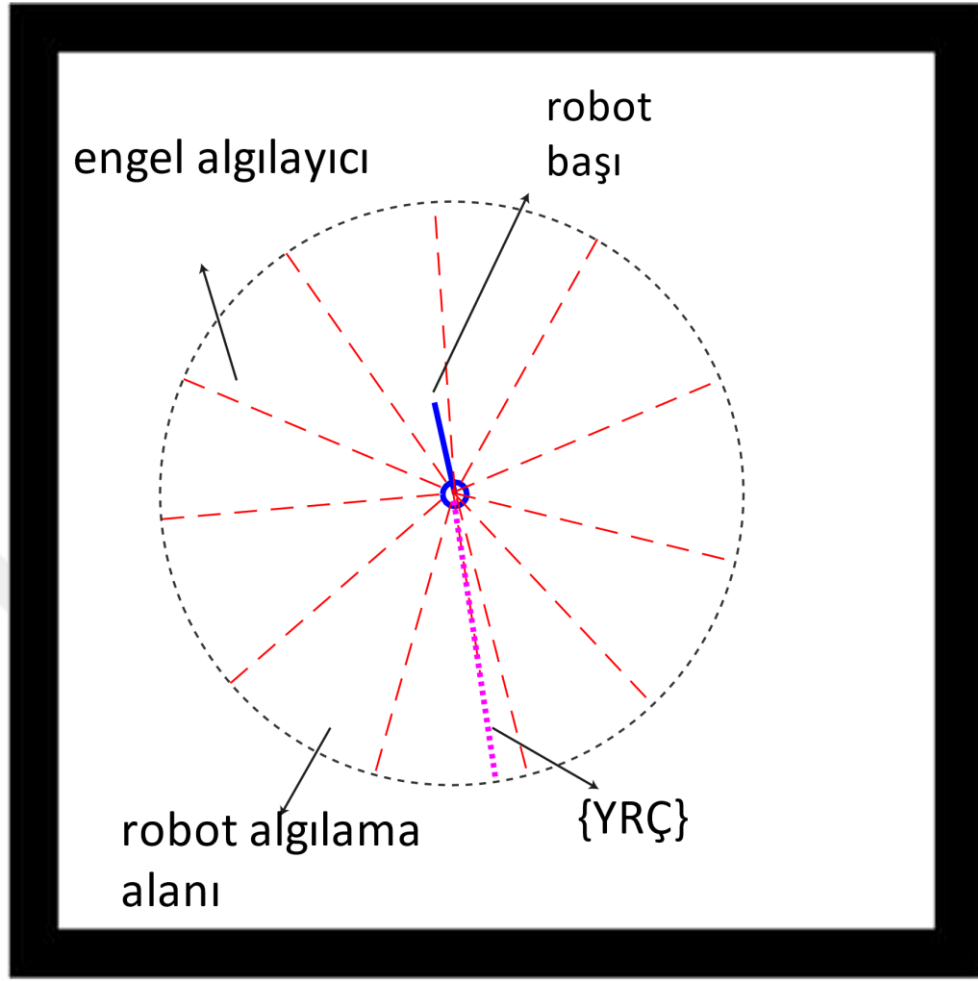
25x25 boyutlu arena da yapılan testler 20x20 ve 15x15 boyutlu alanlara göre daha uzun sürede gerçekleşmiştir. 20x20 arena boyutundaki testlerde 15x15 arena boyutundakilere göre daha yavaştır. 15x15 boyutundaki yapılan testler diğer arena boyutlarına göre daha kısa sürede gerçekleşmiştir.

4.2. Bulanık Mantık Tabanlı Öz Örgütlenebilir Bir Araya Gelme Metodu Sonuçları

Bu bölüm, geliştirilen BMD tabanlı öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı için uygulanan sistematik simülasyonların kurulumunu ve incelenmesini içermektedir. Sistematik deneyler farklı arena boyutlarında, farklı sayıda robotlarla ve farklı algılama yarıçaplarında uygulanan simülasyonlardır. Sürü robotlarına uygulanan BMD metodunun performansını incelemek için gürültülü ve gürültüsüz sistematik deneyler yapılmıştır. Bir araya gelme davranışının performansını ölçmek için toplanma süresi ve KM ölçütleri kullanılmıştır.

4.2.1. Simülasyon kurulumu

Şekil 4.15’de benzetim ortamında kullanılan sınırlandırılmış robot platformu üzerinde yarıçapı 0.25 olan dairesel sürü robotu modeli gösterilmektedir. Sürü robotu 2 farklı sensöre sahiptir. Bunlar engel algılama ve robot algılama sensörleridir. Kırmızı kesik çizgiler sürü robotunun engel algılama çizgileridir. Dairesel alan ise robot algılama alanıdır. Bu dairesel alan sürü robotunun sensör algılama sınırını göstermektedir.



Şekil 4. 15. BMD metodunda kullanılan sürü robot ve algılama özellikleri

BMD tabanlı metot için benzetim ortamında gürültülü ve gürültüsüz sistematik deneyler uygulanmıştır. Çizelge 8’de belirtilen gürültüsüz sistematik simülasyonlar GRÇ (arena boyutu), YRÇ ve robot sayısına bağlı olarak uygulanmaktadır. Gürültülü deneyler ise gürültüsüz uygulanan her bir sistematik deneye ek olarak $N(0, \sigma)$ formunda farklı standart sapma değerlerinde “Gaussian” dağılımında gürültülü olarak uygulanmaktadır.

Çizelge 8. Sistematik deney parametreleri

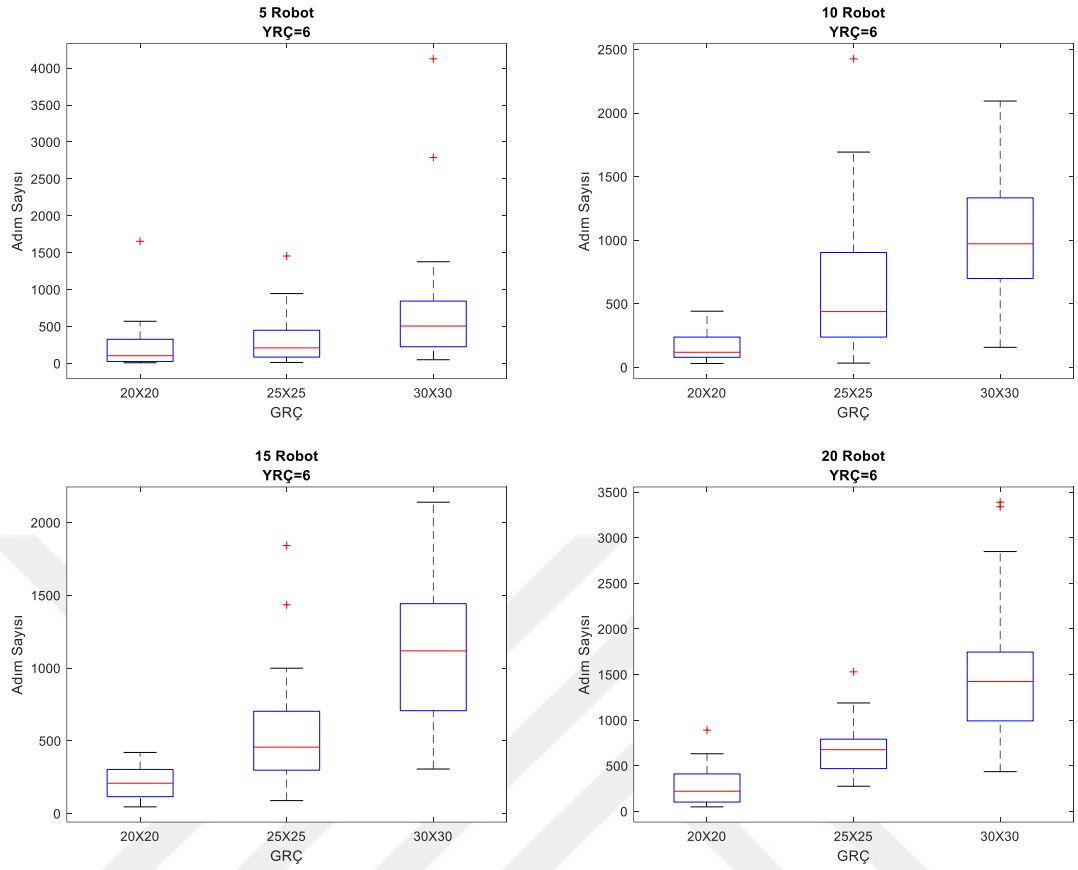
Parametre	Aralıklar
GRÇ	{20x20, 25x25, 30x30}
YRÇ	{6, 7, 8}
Robot sayısı	{5, 10, 15, 20}
Gürültü formu $N(0, \sigma)$	$\sigma = \{0.15, 0.25, 0.35\}$

Çizelge 8’de belirtildiği gibi farklı YRÇ {6, 7, 8}, farklı robot sayıları {5, 10, 15, 20} ve farklı GRÇ için { 20x20, 25x25, 30x30 } 36 farklı gürültülü ve gürültüsüz sistematik deneyler yapılmıştır. Her bir deney 20 kez tekrarlanmıştır.

4.2.2. Gürültüsüz simülasyon sonuçları

Şekil 4.16’da YRÇ algılama yarıçapı 6 birim için 5, 10, 15, 20 robotun sırasıyla 20x20, 25x25, 30x30 arena boyutlarında uygulanan deney sonuçları kutu grafiği ile ifade edilmektedir. Kutu grafiğinde gösterilen kırmızı çizgiler tekrarlanan 20 deneyin toplanma süresinin ortanca değerini belirtmektedir.

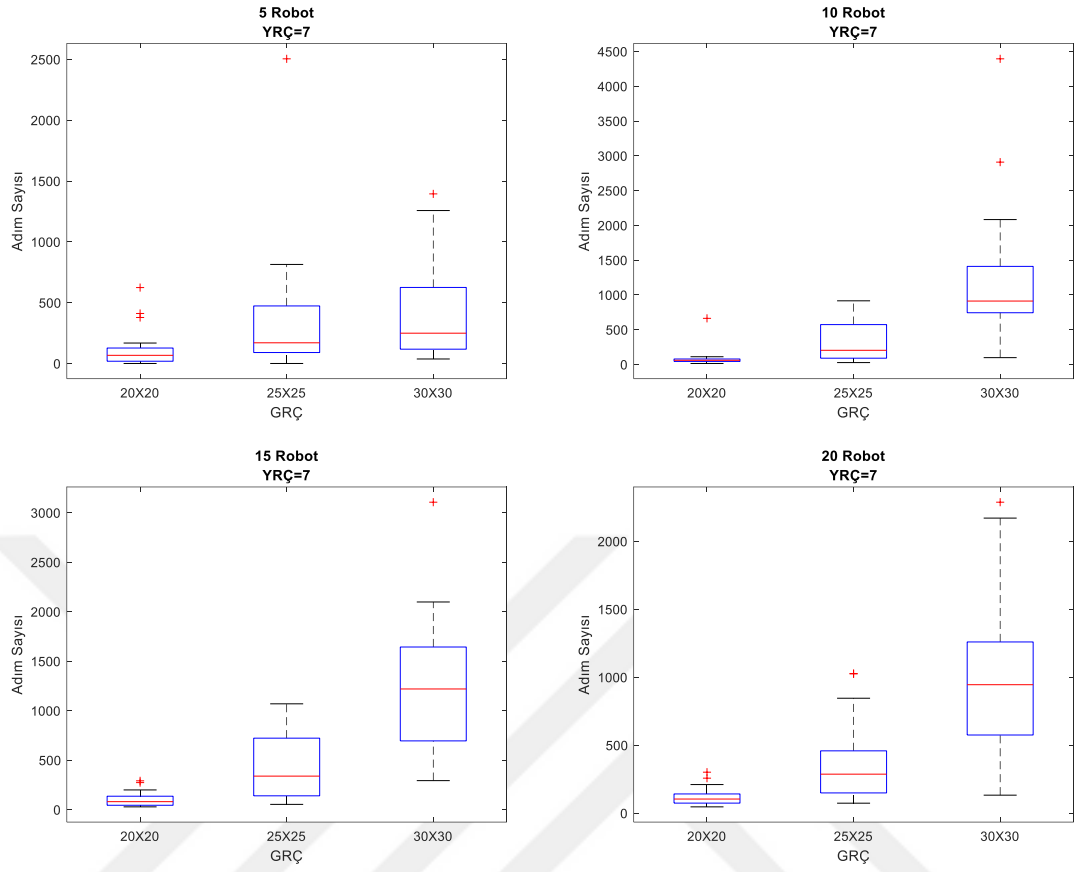
YRÇ algılama yarıçapı 6 birim için elde edilen sonuçlara göre robot sayısı aynı kalmak şartı ile arena boyutunun artması toplanma süresini artırmaktadır. Ayrıca arena boyutunun aynı kalması şartı ile robot sayısının artması da toplanma süresinin artmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4.16. BMD metodunun arena boyutlarına göre YRÇ 6 birim için toplanma süresi

YRÇ 6 birim yarıçapındaki uygulanan deneylerde en düşük medyan değeri 105 adım olarak 15x15 arena boyutunda 5 robotla, en yüksek medyan değeri ise 1424 adım olarak 30x30 arena boyutunda 20 robot ile gerçekleşmiştir. Uygulanan deneylerde sürü robotları deney başlangıcında arena boyutuna bağlı olarak rastgele dağıtılmaktadır. Arena boyutu büyüdükçe her bir sürü robotu arasındaki uzaklık artmakta ve sürü robotlarının bir araya gelmesi zaman almaktadır. Arena boyutunun büyümesinin dikkat çekici çıktılarından biri ise bir araya gelme davranışı tamamlanma sürelerinin daha geniş zaman aralıklarında tamamlanmasına sebep olmasıdır. Algılanan robot sayısı arttığında robotlar arasındaki etkileşimde artar ve her bir robotun birbirine çarpmadan organize bir şekilde bir araya gelmesi gerekir. Bu durum robot sayısına bağlı olarak artar ve süre alır.

Şekil 4.17’de YRÇ algılama yarıçapı 7 birim için 5, 10, 15, 20 robotun sırasıyla 20x20, 25x25, 30x30 arena boyutlarında uygulanan deney sonuçları kutu grafikleriyle ifade edilmektedir. YRÇ 7 birim yarıçapı için yapılan deneylerde robot sayısının artması ve arena boyutunun büyümesi bir araya gelme tamamlanma süresini arttırmaktadır.

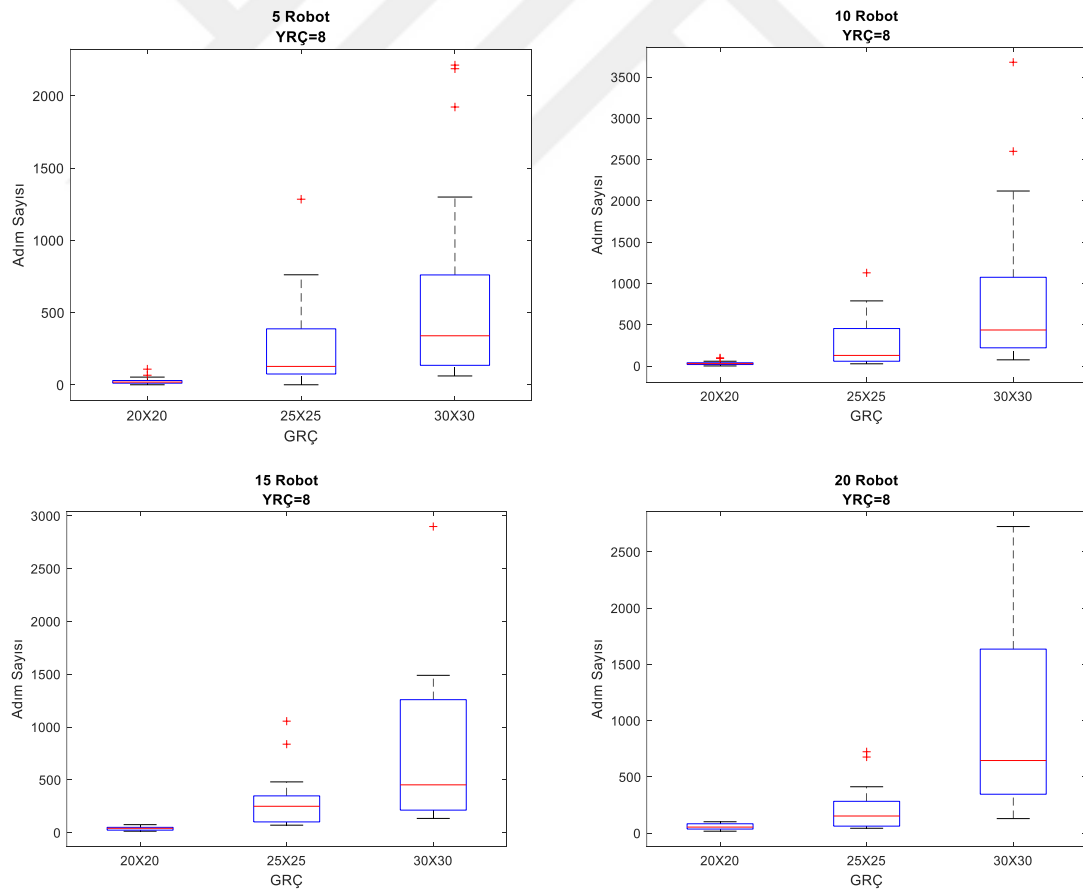


Şekil 4. 17. BMD metodunun arena boyutlarına göre YRÇ 7 birim için toplanma süresi

YRÇ 7 birim için uygulanan deneylerde bir araya gelme davranışı tamamlanma süresi YRÇ 6 birim için uygulanan deneylerde olduğu gibi arena boyutu arttıkça doğrusal bir artış göstermektedir. YRÇ 7 birim yarıçapındaki uygulanan deneylerde en düşük ortalama değeri 68 adım olarak 15x15 arena boyutunda 5 robotla, en yüksek medyan değeri ise 1220 adım olarak 15x15 arena boyunda 20 robot ile gerçekleşmiştir. YRÇ 7 birim için uygulanan deneylerde YRÇ 6 birime göre daha az sürede gerçekleştiği gözlemlenmektedir. YRÇ 7 birimde uygulanan sistematik deneylerin YRÇ 6 ya göre daha iyi performans göstermesinin temel sebebi algılama yarıçapının artmasıdır.

Robot sayısına göre toplanma süresini değerlendirdiğimizde, robot sayısı ve arena boyutun arttığında toplanma süresi artmaktadır. YRÇ 7 birim algılama yarıçapı için uygulanan deneylerde YRÇ 6 birim için uygulanan deneylerde olduğu gibi robot sayısının artmasına bağlı olarak toplanma süreleri doğrusal olarak artmıştır. Ek olarak YRÇ 7 birim için uygulanan deneylerde bir araya gelme tamamlanma süreleri YRÇ 6 birime göre daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Algılama yarıçapının artışı toplanma süresini kısaltmıştır. Bunun sebebi sürü robotunun algılama alanı içerisinde daha fazla robot algılayabilmesidir.

Şekil 4.17’de YRÇ algılama yarıçapı 8 birim için 5, 10, 15, 20 robotun sırasıyla 20x20, 25x25, 30x30 arena boyutlarında uygulanan deney sonuçları kutu grafiği ile ifade edilmektedir. YRÇ 8 birim yarıçaplı uygulanan deneylerde robot sayısının artması ve arena boyutunun büyümesi toplanma süresini arttırmaktadır.

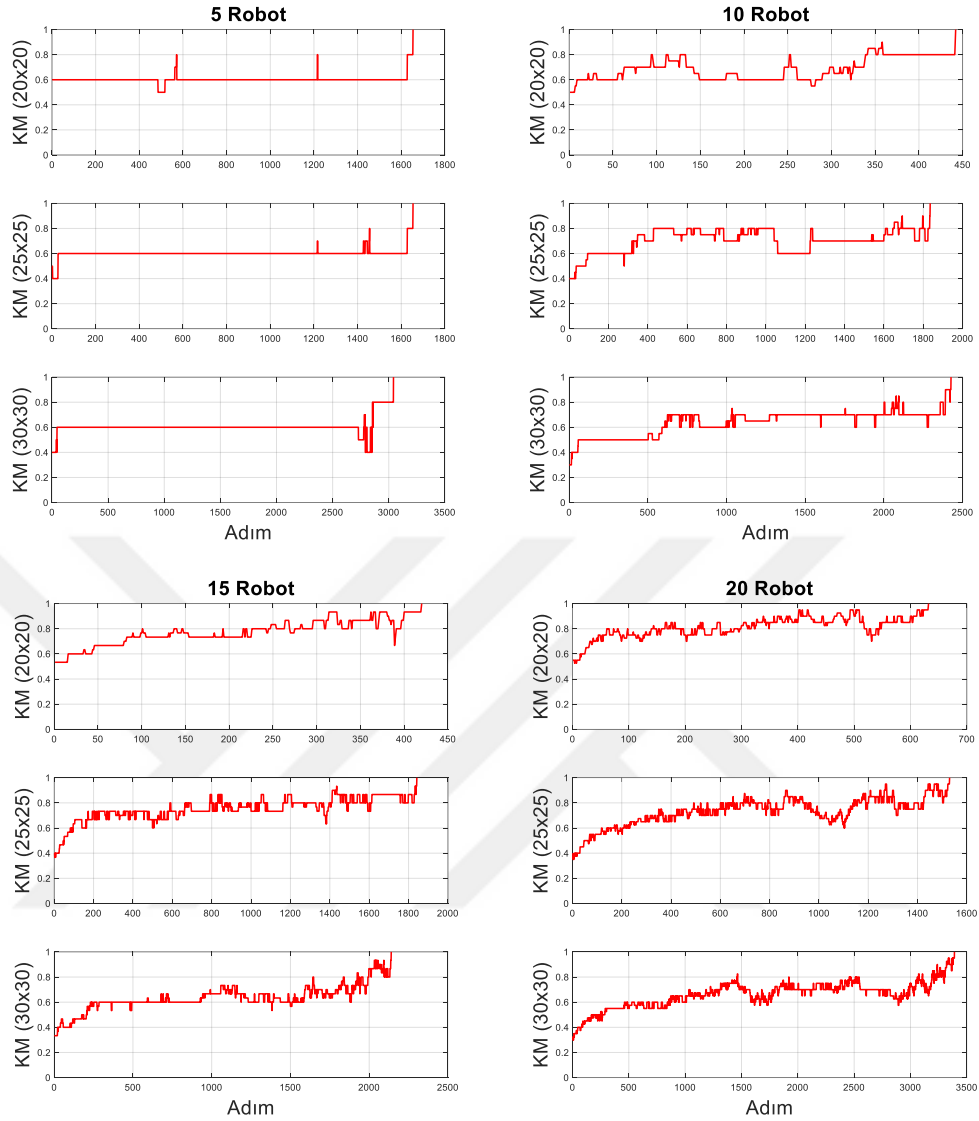


Şekil 4.18. BMD metodunun arena boyutlarına göre YRÇ 8 birim için toplanma süresi

YRÇ 8 birim için uygulanan deneylerde, YRÇ 6 ve YRÇ 7 birim için uygulanan deneylerde olduğu gibi arena boyutu arttıkça toplanma süreleri doğrusal bir artış göstermektedir. YRÇ 8 birim yarıçapındaki uygulanan deneylerde en düşük ortalama değeri 19 adım olarak 15x15 arena boyutunda 5 robotla, en yüksek ortalama değeri ise 646 adım olarak 30x30 arena boyunda 20 robot ile gerçekleşmiştir. YRÇ 8 birim için uygulanan deneylerde, YRÇ 6 ve YRÇ 7 birime göre uygulanan deneylerde daha az sürelerde gerçekleşmiştir. YRÇ 8 için uygulanan deneylerde robot sayısının artışına göre bir araya gelme performansı azalmıştır. YRÇ 8 birim için uygulanan deneyler, YRÇ 6 ve YRÇ 7 birime göre daha iyi performans göstermiştir. Algılama yarıçapının artışı uygulanan sistematik deneylerde beklediği gibi bir araya gelme performansını arttırmıştır.

Şekil 4.19’da 20x20, 25x25 ve 30x30 arena boyutlarında YRÇ 6 birim olan 5, 10, 15, 20 adet robot için uygulanan sistematik deneylerden elde edilen kümelenme ölçütleri (KM) verilmektedir. Şekil 4.19’da yatay eksen deney adımı (zamanı), dikey eksen ise kümelenme ölçütünü ifade etmektedir. Farklı robot sayısı ve farklı arena boyutları için uygulanan sistematik deneylerde KM 1’e eşit olduğunda bir araya gelme davranışı tamamlanmıştır. Kümelenme ölçütleri arena boyutu ve robot sayısına bağlı olarak verilmiştir.

YRÇ 6 birim için uygulanan deneylerde sürü robotları arena boyutuna bağlı olarak rastgele dağıtılmaktadır. Rastgele dağıtılan robotlardan bazıları birbirleri algılayabilecek konumlarda olmaktadır. KM t. adımıdaki en büyük kümenin sayısına bağlı olarak belirlendiğinden robot sayısı ve arena boyutu arttıkça uygulanan deneylerdeki KM değeri başlangıç anında azalmaktadır. Bunun ana sebebi deney başlangıcında sürü robotlarının arena boyutuna bağlı olarak dağıtılmasıdır.

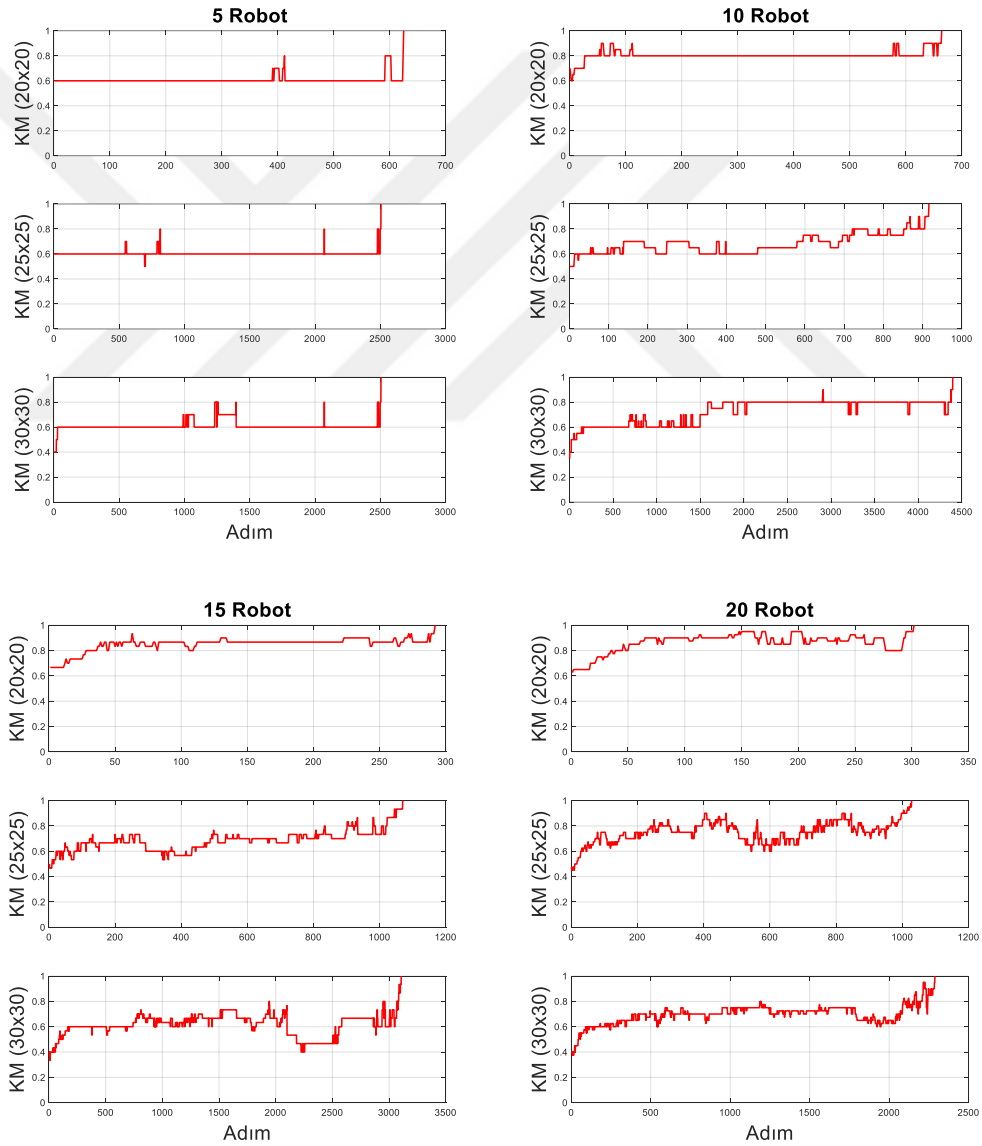


Şekil 4. 19. YRÇ 6 birim sürü robotları için KM sonuçları

Sürü robotları önerilen BMD ile birbirlerini algıladığı andan itibaren aralarında uyumlu bir şekilde grup hareketi yapar ve algılayamadığı diğer robotları arar. Tek başına hareket eden robotlar ve grup hareketi yapan robotlar birbirleri ile birleştiklerinde KM değeri artar. Sürü robotu algıladığı komşu robotlarla birleşme anında önerilen BMD'ye bağlı olarak en çok sayıdaki robotun yönüne doğru geçiş hareketi yapar. Bu geçiş hareketi anında her bir robot bulunduğu gruptan ayrılabilir. Bu durumda sürü robotu dahil olduğu gruptan, fazla sayıda başka bir robot grubuna geçer ise KM artar aksi durumda ise azalır.

Şekil 4.19’da uygulanan sistematik deneylerde gözlemlendiği gibi sürü robotlarının gruplar arası veya bireysel geçişleri KM değerinin alçalıp yükselmesine sebep olmaktadır. Uygulanan sistematik deneylerde gözlemlendiği gibi robot sayısının artması durumunda KM’deki dalgalanmalarda artmaktadır.

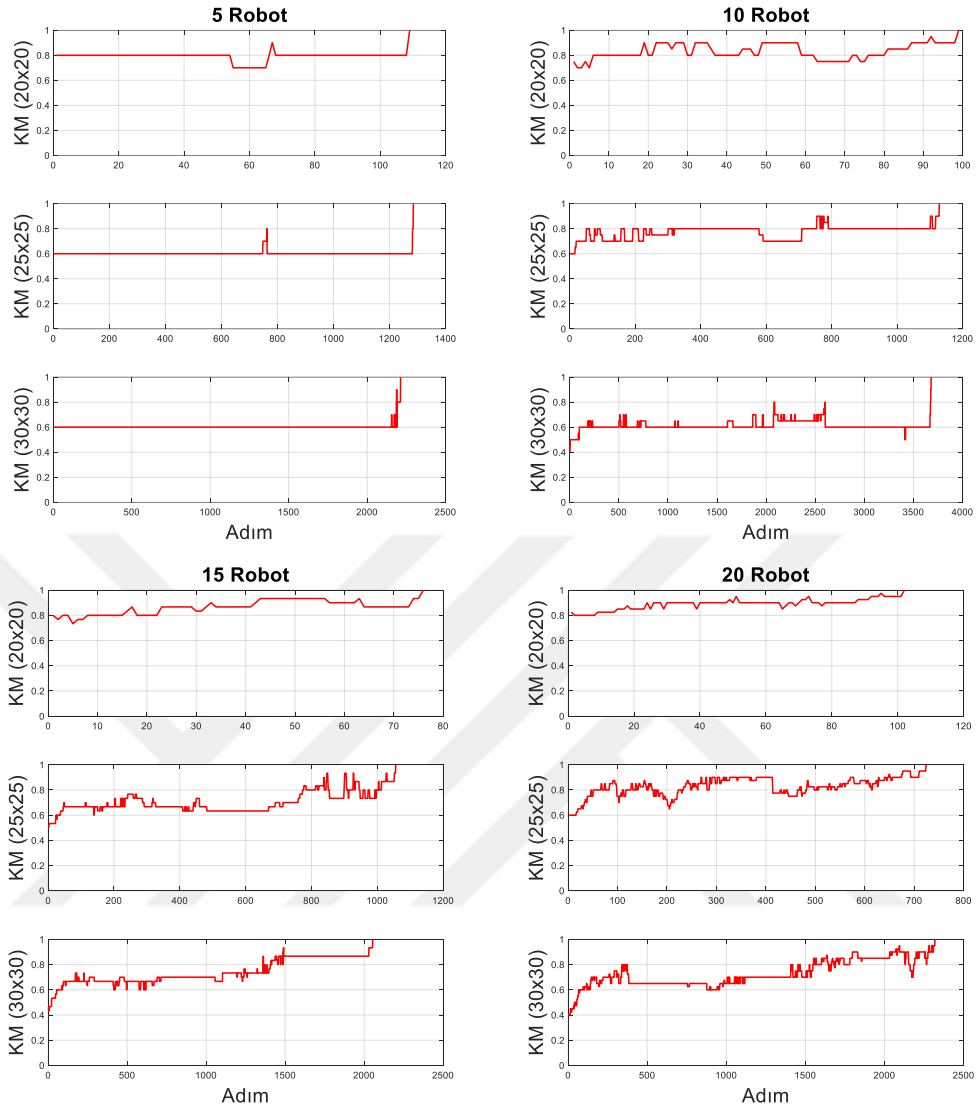
Şekil 4.20’de 20x20, 25x25 ve 30x30 arena boyutlarında YRÇ 7 birim olan 5, 10, 15, 20 adet robot için kümelenme süreci gösterilmektedir. Farklı robot sayısı ve arena boyutlarında toplanma gerçekleşmiştir. Kümelenme ölçütü robot sayısı ve arena boyutu değişse de benzer dalgalanmalar göstermektedir.



Şekil 4. 20. YRÇ 7 birim sürü robotları için KM sonuçları

YRÇ 7 birim yarıçapındaki sürü robotları için uygulanan sistematik deneylerde YRÇ 6 birim yarıçapındaki deneylerde olduğu gibi robot sayısının artmasıyla gruplar arası robot geçişleri de artar. Bu durum KM değerinde zamanla dalgalanmaların (yükselme ve alçalma) artmasına sebep olur. Ek olarak YRÇ 7 birim yarıçapındaki deneyler YRÇ 6 birim yarıçapındaki deneylere göre daha az robot geçişlerine sebep olur. Böylece KM grafiklerinde gözlemlendiği gibi KM değerinin iniş çıkışı azalır. Fakat YRÇ 7 birim yarıçapındaki deneylerde, YRÇ 6 birim yarıçapındaki deneylere göre KM değişiminin genliği artar. Bunun temel sebebi YRÇ'nin artmasıdır.

Şekil 4.21'de 20x20, 25x25 ve 30x30 arena boyutlarında YRÇ 8 birim olan 5, 10, 15, 20 adet robot için kümelenme ölçütleri süreci gösterilmektedir. Uygulanan deneylerde robotlar arenalara rasgele dağıtıldığından robotların kümelenme ölçütünün başlangıç ayarlamaları değişmektedir.



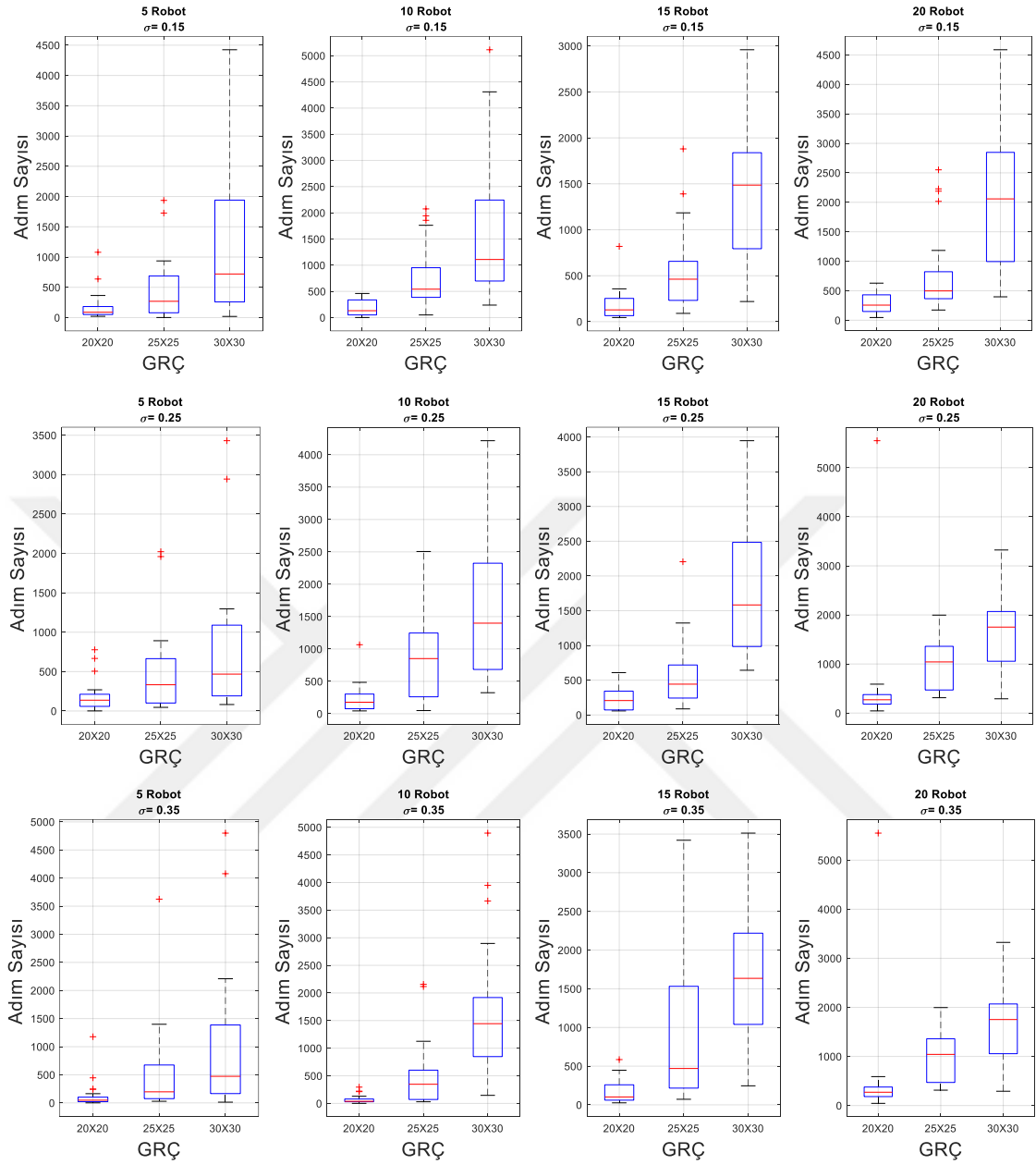
Şekil 4. 21. YRÇ 8 birim sürü robotları için KM sonuçları

YRÇ 8 birim için uygulanan sistematik deneylerde YRÇ 6 ve YRÇ 7 birim yarışapındaki deneylere göre KM’de daha az dalgalanma gözlemlenmektedir. Bunun temel sebebi algılama yarışapı büyüdükçe bir robotun algılayabileceği robot sayısının artmasıdır. Uygulanan sistematik deneylerde gözlemlendiği gibi birçok sayıda sürü robotu birleşerek farklı gruplar halinde hareket eder. Sürüdeki birbirinden bağımsız gruplar birleşerek bir araya gelmeye çalışırlar. Grupların birleşme sürecinde sürü robotlarının algıladığı robot sayısı değişir ve bu durumda KM değeri değişir.

4.2.3.Gürültü etkisi sonuçları

Bu bölümde, algılayıcı girişlerine uygulanan gürültünün oluşturduğu bozulmanın geliştirilen BMD tabanlı bir araya gelme yönteminin performansına olan etkisi incelenmektedir. Geliştirilen 3 aşamalı BMD'nin tüm girişlerine sıfır ortalamalı “Gaussian” dağılımında farklı standart sapma değerlerinde $\sigma=\{0.15, 0.25, 0.35\}$ gürültülü sistematik simülasyonlar uygulanmıştır.

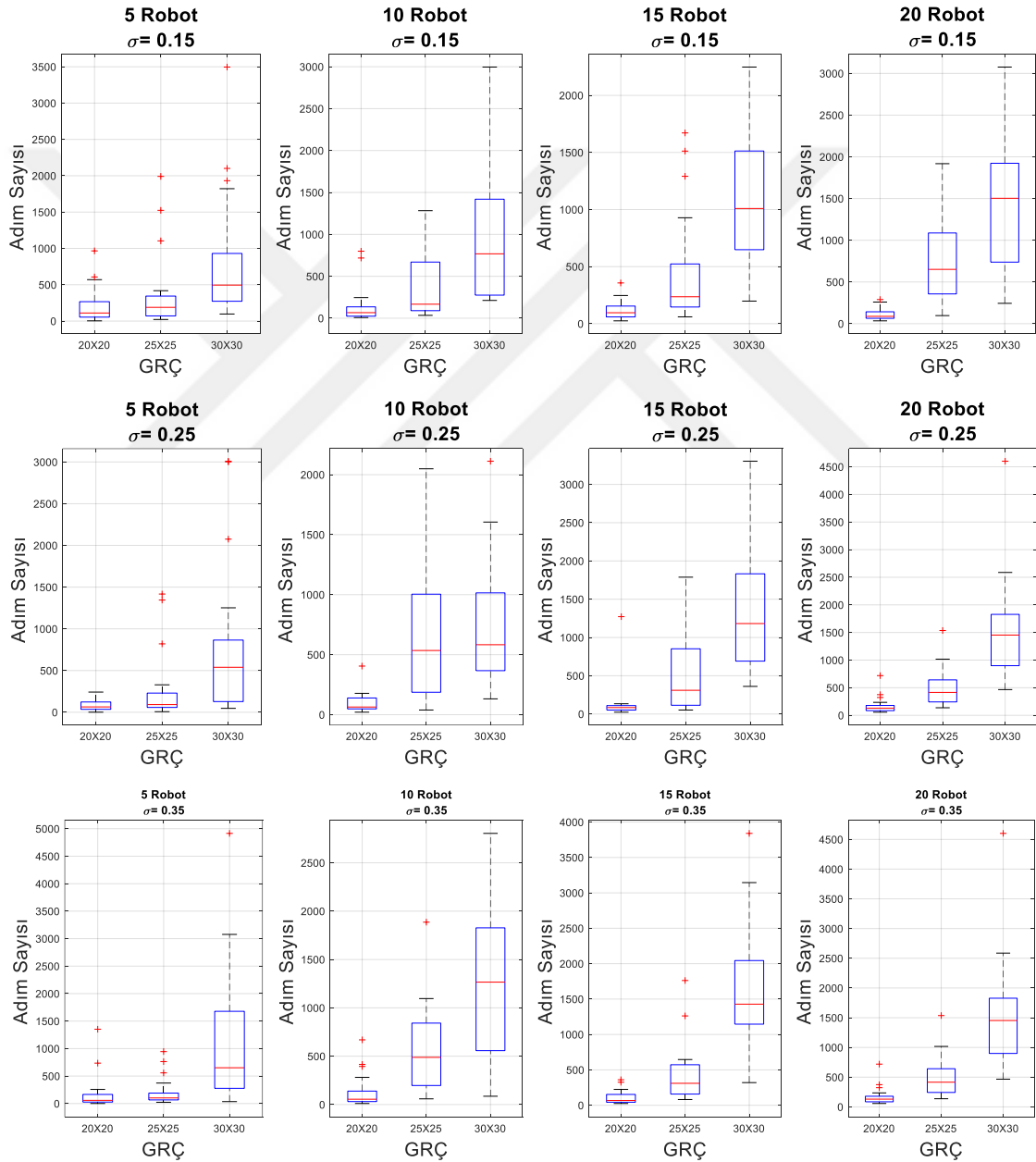
Şekil 4.22’de YRÇ algılama yarıçapı 6 birim için $N(0, \sigma)$ “gaussian” dağılımında sırasıyla $\sigma =0.15$, $\sigma =0.25$ ve $\sigma =0.35$ standart sapma değerlerinde gürültü uygulanan sistematik deney sonuçları gösterilmektedir. Sensör girişlerine gürültü uygulanan deneyler sistematik olarak 5, 10, 15 ve 20 adet robota sırasıyla 20x20, 25x25 ve 30x30 arena boyutlarında uygulanmıştır. Sistematik deneyler 20 kez tekrarlanmıştır. Kırmızı kesik çizgi ile tekrarlanan deney sonuçlarının toplanma sürelerinin ortanca değerini ifade etmektedir. YRÇ 6 birim için $N(0, \sigma)$ formunda sırasıyla $\sigma= \{0.15, 0.25, 0.35\}$ artan standart sapma değerinde sensör girişlerine uygulanan gürültü toplanma performansı doğrusal olmayan bir değişimle artmıştır. BMD denetleyicinin gürültü etkisinin artışına karşı göstermiş olduğu olumlu bir tepkidir. Robot sayısının artmasına bağlı olarak toplanma süresi doğal olarak artmıştır. Robot sayısının artması daha fazla robotun birbiri ile etkileşime girmesi sonucu toplanma süresi uzamıştır. Arena boyutu büyüdüğünde ise toplanma süresi de doğal olarak artmıştır. Arena boyutu büyüdükçe birçok robot, bulundukları arenada farklı bölgelerde gruplaşırlar ve bu gruplar birleşmek için diğer grupları ararlar. Bu durumda toplanma süresi de artar. Gürültü etkisi arttığında hem arena boyutu büyüdükçe hem de robot sayısı arttıkça toplanma süresi gürültüsüz deneylere göre artış göstermektedir.



Şekil 4. 22. YRÇ 6 için gürültü deney sonuçları

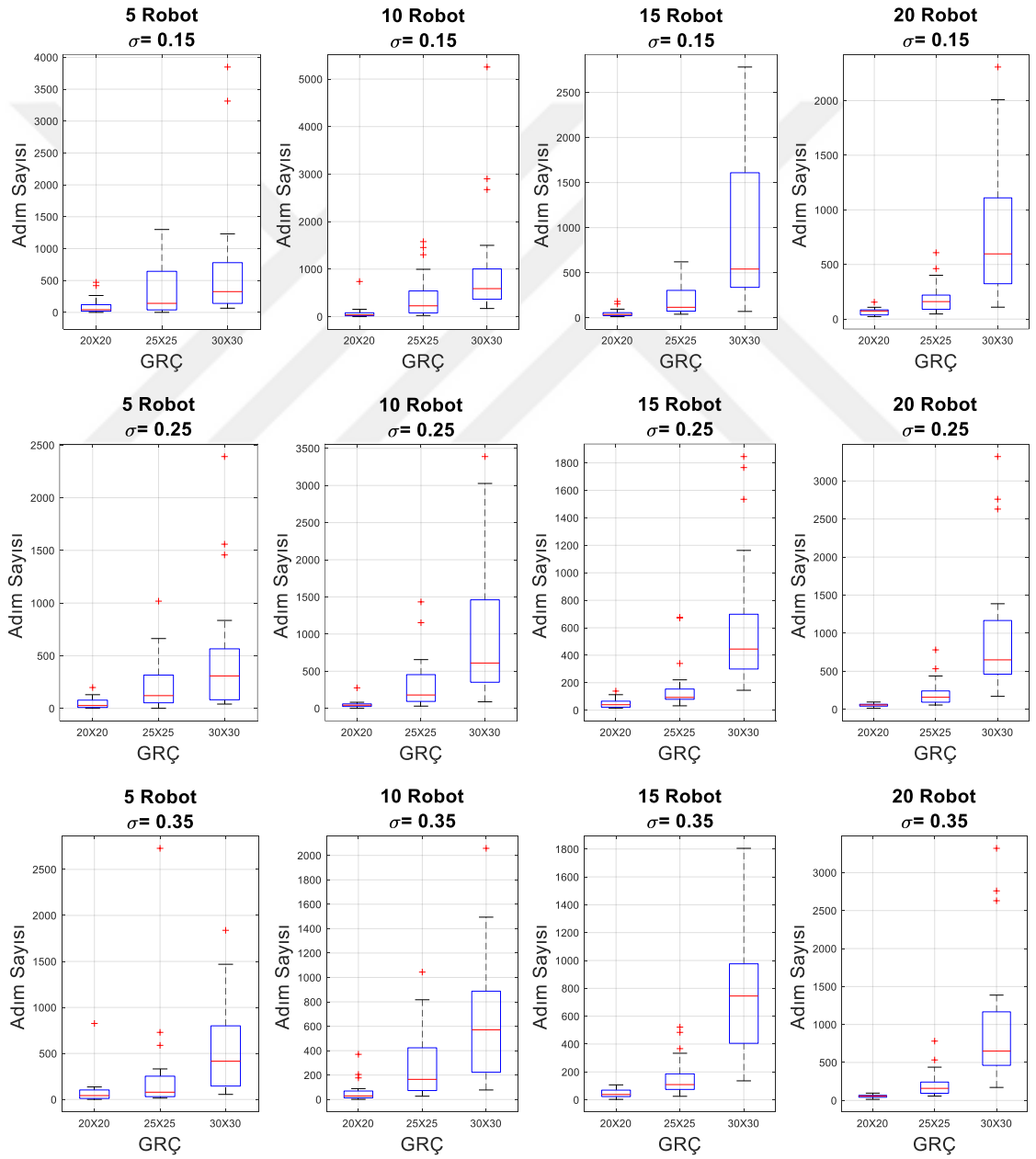
Şekil 4.23’de YRÇ 7 birim için $N(0, \sigma)$ formundaki “gaussian” dağılımda $\sigma = \{0.15, 0.25, 0.35\}$ değerlerinde gürültü uygulanan sistematik simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Sensör girişlerine gürültü uygulanan deneyler sistematik olarak 5, 10, 15 ve 20 adet robota sırasıyla 20x20, 25x25 ve 30x30 arena boyutlarında uygulanmıştır.

YRÇ 7 birim içi uygulanan sistematik deneylerde artan gürültü etkisinin farklı robot sayısı ve farklı arena boyutlarında toplanma süresinde doğrusal olmayan değişimler göstermektedir. Farklı robot sayısı ve farklı arena boyutlarında uygulanan gürültülü deneylerde, gürültü etkisinin artmasının toplanma sürelerinin minimum ve maksimum süre aralıklarında büyük değişimlere sebep olmadığı gözlemlenmektedir.



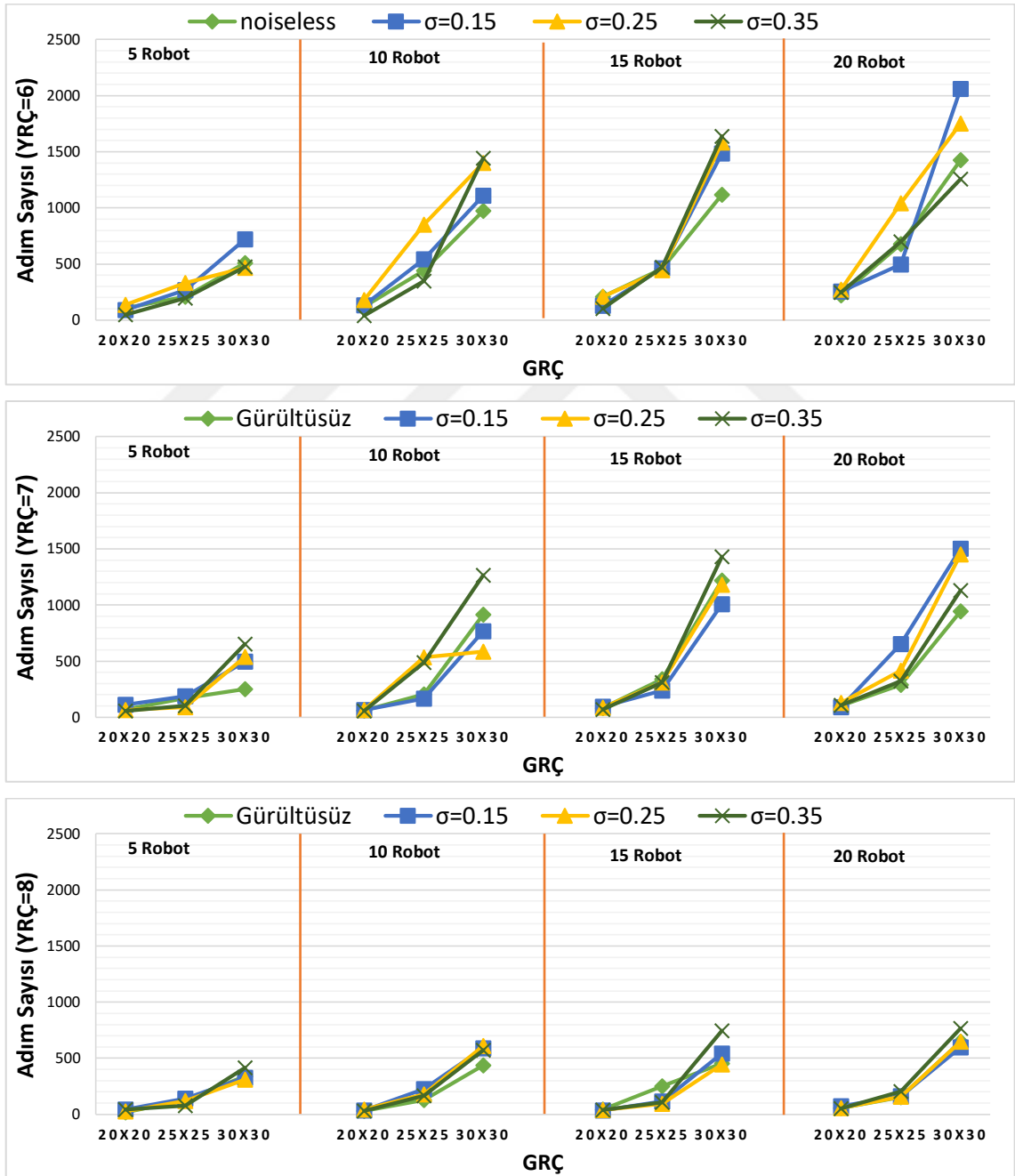
Şekil 4. 23. YRÇ 7 için gürültü deney sonuçları

Şekil 4.24’de YRÇ 8 birim için gürültü uygulanan sistematik simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Gürültüsüz deneylerde olduğu gibi gürültülü deneylerde de arena boyutu ve robot sayısı arttıkça toplanma süresi artmıştır. Gürültü etkisi arttıkça toplanma süresi doğrusal bir artış/değişim göstermemektedir. Bu durum önerilen yaklaşımda kullanılan BMD denetleyicisinin değişen gürültü etkisine göstermiş olduğu etkidir. Gürültü etkisinin artması, toplanma süresini kayda değer bir şekilde değiştirmemiştir.



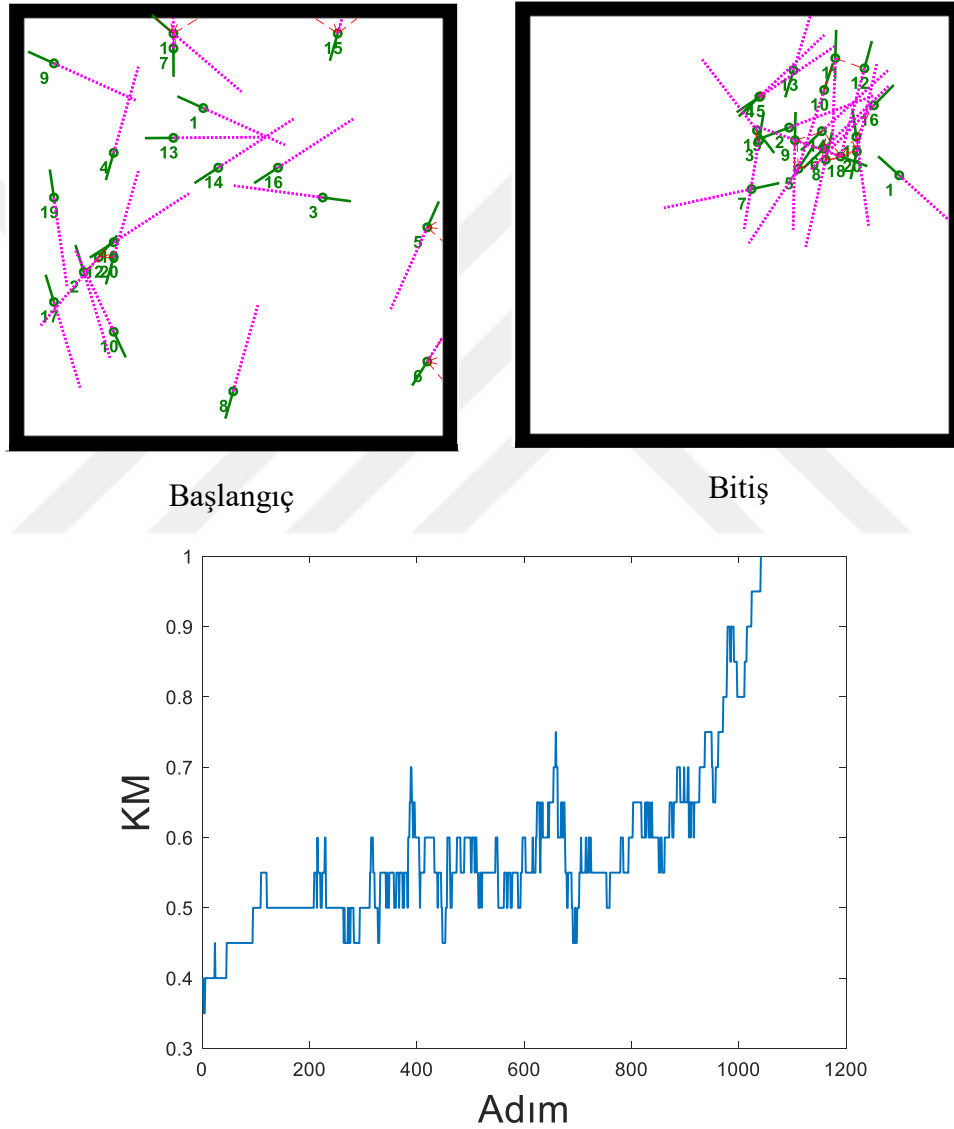
Şekil 4.24. YRÇ 8 için gürültü deney sonuçları

$N(0, \sigma)$ formunda sırasıyla $\sigma=\{0.15, 0.25, 0.35\}$ artan standart sapma değeri için yapılan deneylerde, Şekil 4.25’de gösterildiği gibi arena boyutunun ve robot sayısı artması toplanma süresini artırmıştır. Sensör girişlerine uygulanan artan gürültü etkisinin bir araya gelme davranışı performansını düşürdüğü ancak çok büyük değerlerde etkilemediği gözlemlenmektedir.



Şekil 4. 25. Gürültü ve gürültüsüz simülasyonların karşılaştırılması

Şekil 4.26'da 30x30 boyutundaki arenada 20 Robot için bir araya gelme örneği gösterilmektedir. Ayrıca bir araya gelme davranışı süreci boyunca kümelenme ölçütü gösterilmektedir. Bir araya gelme davranışı süresince zamana göre kümelenme ölçeği artmaktadır. Bir araya gelme davranışı 1041. adımda tamamlanmıştır. Bir araya gelme davranışı KM 1'e eşit olunca sona ermiştir.



Şekil 4.26. 30x30 boyutundaki arenada 20 robot için bir araya gelme örneği ve performans ölçümleri

4.3. Dinamik Etkileşimli Öz Örgütlenebilir Bir Araya Gelme Metodu Sonuçları

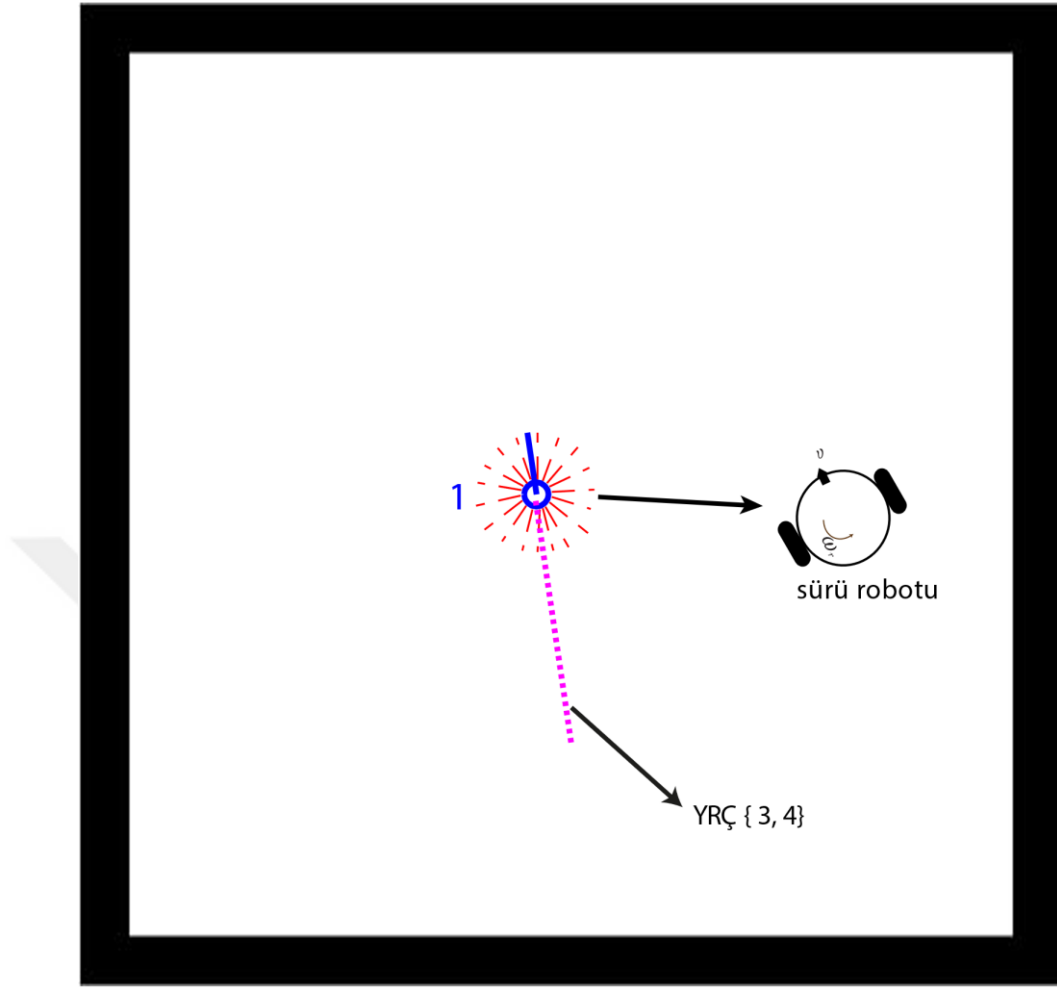
Bu bölüm DEB metodunun sonuçlarının literatürde önerilen diğer bir araya gelme metotlarıyla karşılaştırılarak incelenmesini içermektedir. Sonuçlar sistematik simülasyon deneylerinden elde edilen toplanma ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. Sonuçları karşılaştırmak için [1]. yöntem olarak (Khaldi ve ark., 2019) tarafından önerilen DM-KNN tabanlı “Distance-Minkowski” metodu, [2]. yöntem olarak (Martínez-Clark ve ark., 2018) tarafından önerilen komşu robotların uzaklık ve açı bilgilerine dayanan kontrol algoritması referans alınmıştır.

4.3.1. Simülasyon kurulumu

Şekil 4.27’de uygulanan deneylerde kullanılan sürü robotları için hareket platformu gösterilmektedir. Bu platformun boyutları değiştirilebilir ve içerisine farklı sayılarda sürü robotu yerleştirilebilir. Uygulanan deneylerdeki sürü robotlarının her biri benzer özelliklere sahiptir ve holonomik olmayan iki tekerden tahrikli bir mobil robot modelindedir. Sürü robotu 0.40 yarıçapında dairesel yapıdadır. Sürü robotunun maksimum hızı $v_{\max} = 3 \frac{\text{birim}}{\text{adım}}$ ’dır. Belirtilen k_1 katsayısı $v_{\max}$ ve YRÇ ye göre hesaplanmaktadır. k_1 Eşitlik 4.1’de ifade edildiği gibidir.

$$k_1 = \frac{v_{\max}}{YRÇ} \quad (4.1)$$

Şekil 4.27’de gösterildiği gibi, sürü robotunun engel algılayıcı için algılama sınırı kırmızı kesik çizgilerle 1 birim yarıçapında dairesel alana, robot algılayıcı için algılama sınırı ise YRÇ yarıçapında bir dairesel alana sahiptir.



Şekil 4. 27. DEB metodunun uygulandığı sürü robotunun hareket platformu

Geliştirilen DEB metodunun esneklik ve ölçeklenebilirliğinin incelenmesi için kullanılan simülasyon deney parametreleri Çizelge 9’da verilmektedir.

Çizelge 9. Sistemik simülasyon deney parametreleri

GRÇ	{40x40, 50x50, 60x60}
YRÇ	{3,4}
Robot Sayısı	{10, 25, 50}

Uygulanan sistematik simülasyon deneylerinde robotlar sınırlandırılmış arena boyutuna ve robot sayısına bağlı olarak sabit pozisyonlarda konumlandırılmıştır. Çizelge 10’da her bir arena boyutu ve robot sayısına göre belirlenmiş sabit iterasyon sayıları belirtilmektedir. Belirlenmiş sabit iterasyon sayılarındaki simülasyon deneyleri 50 kez tekrarlanmıştır.

Çizelge 10. Sistematik deneylerde uygulanan adım sayısı

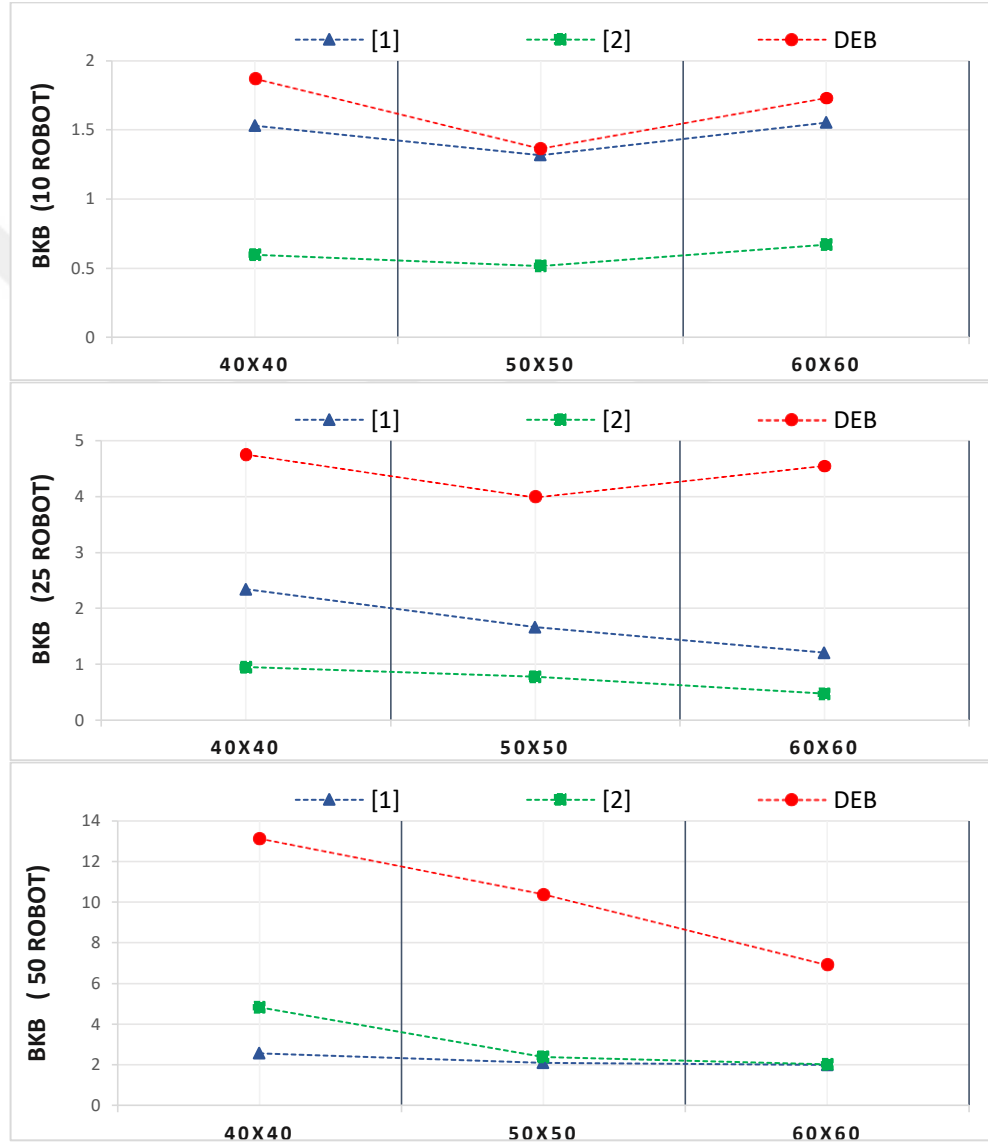
Robot Sayısı	GRÇ		
	40x40	50x50	60x60
10 Robot	1000	1200	1400
25 Robot	1500	1800	2100
50 Robot	2000	2400	2800

4.3.2 Beklenen kümelenme boyutu (BKB) ölçütü sonuçları

BKB ölçütü robotların mekânsal dağılımından daha çok robotların bulunduğu küme hakkında bilgi vermektedir (Soysal ve ark., 2007). BKB metriğinin incelenmesinde amaç, DEB metodunun karşılaştırılan diğer metotlarla, robotların kümelenme dağılımları hakkında değerlendirmeler yapmaktır. Bu metriği, ölçeklenebilirlik ve esneklik bakımından değerlendirebilmek için farklı arena boyutlarında ve farklı robot sayılarında uygulanan simülasyon deney sonuçlarından yararlanılmıştır. Ayrıca uygulanan simülasyon deneylerinde sürü robotlarının YRÇ yarıçapı değiştirilerek BKB ölçütü üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Şekil 4.28’de Çizelge 8’de belirtildiği gibi uygulanan sabit iterasyon sonrasında elde edilen BKB metrik sonuçları gösterilmektedir. Grafiklerde, 50 kez tekrarlanan deneylerin ortalaması referans alınmıştır. Uygulanan sistematik simülasyon deneylerinde robotlar sabit başlangıç pozisyonlarında konumlandırılmıştır.

Kırmızı işaretçi DEB metodunun sonuçlarını, mavi işaretçi [1] (Khaldi ve ark., 2019) ve yeşil işaretçi [2] (Martínez-Clark ve ark., 2018b) tarafından önerilen yöntemlerin sonuçlarını ifade etmektedir. Şekil 4.28’de sırasıyla 10, 25 ve 50 robot ile 40x40, 50x50 ve 60x60 arena boyutlarındaki YRÇ 3 birim BKB ölçütü sonuçları gösterilmektedir.



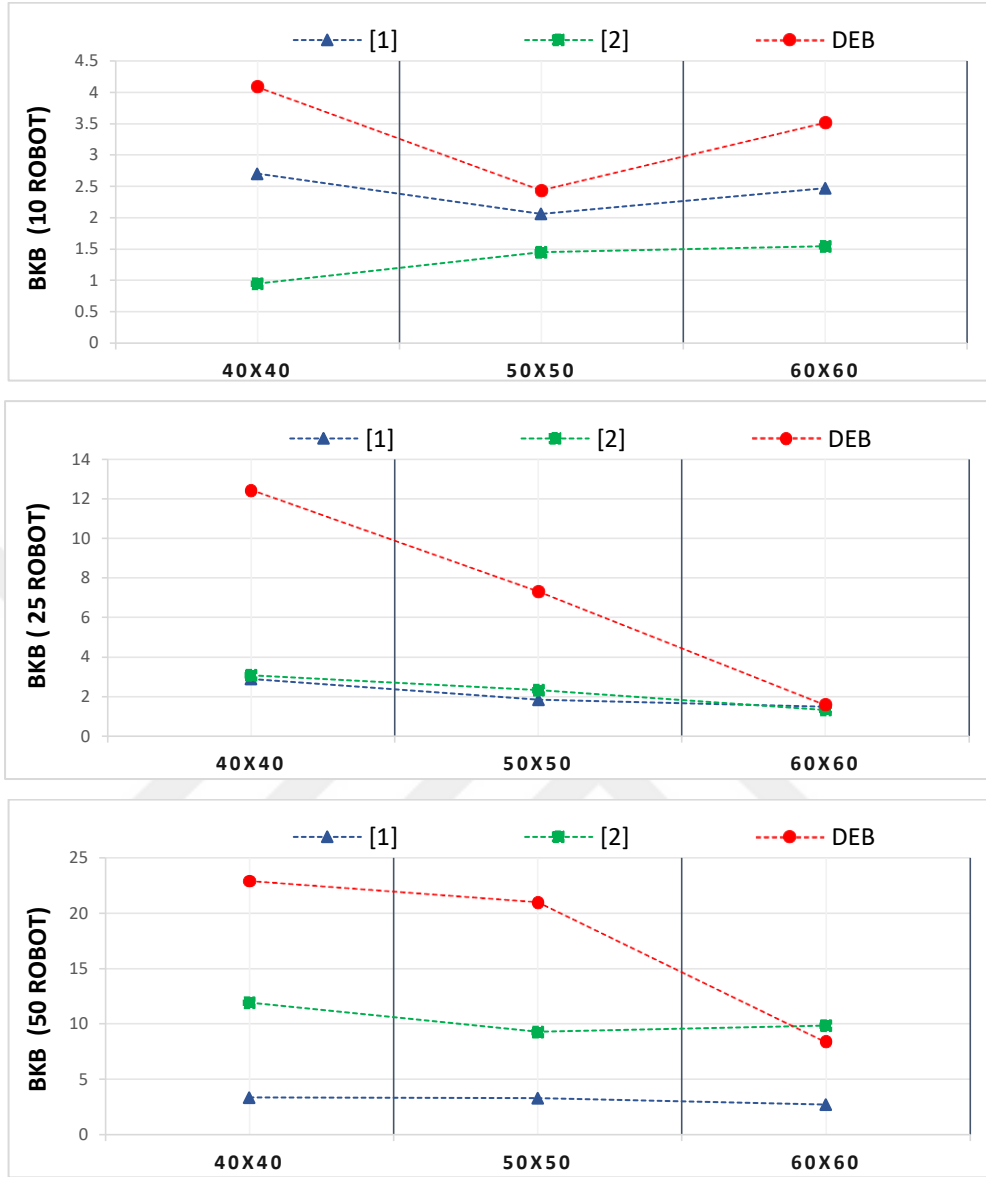
Şekil 4. 28. YRÇ 3 birim için BKB ölçütü karşılaştırılması

YRÇ 3 birim için elde edilen BKB ölçütü grafiklerinde görüleceği üzere DEB metodu diğer yöntemlere kıyasla, uygulanan 9 farklı sistematik deneyin tamamında daha yüksek BKB ölçütleri göstermiştir. BKB ölçüt değerleri robot sayısı değiştiğinde farklılıklar göstermektedir. Daha çok robot daha büyük BKB ölçütü gösterebilir. Benzer robot sayısına göre arena boyutunun artması, BKB ölçütünün değişiminde doğrusal bir artışı veya azalışı ifade etmemektedir. Bunun sebebi bir arenada birden fazla küme (farklı sayıda robot grupları) oluşumudur.

DEB metodundaki BKB değerleri daha yüksek olduğundan oluşan kümelenme sayısı daha azdır. Fakat daha küçük arenada daha çok robot ile kümelenme kurulmasının yüksek bir olasılık olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. DEB yönteminin diğer yaklaşımlardan daha yüksek değerlerde BKB ölçütü göstermesindeki ana faktör yöntemde kullanılan yaklaşma ve hizalama kontrolcüsünün dinamik etkileşim stratejisidir. BKB grafiklerinde görüldüğü gibi YRÇ 3 birim iken DEB metodunun en iyi BKB ölçütü, [1]. yöntemine göre 50 robot ile 40x40 arena boyutunda %21.07 daha iyi sonuç elde edilmiştir.

Şekil 4.29'da YRÇ 4 birim için sırasıyla 10, 25 ve 50 robot ile 40x40, 50x50 ve 60x60 arena boyutlarındaki BKB ölçüt grafikleri gösterilmektedir. YRÇ 4 birim için deney sonuçlarında 9 farklı deneyin 8'inde (%88.8 başarı) DEB metodu kıyaslanan yöntemlere göre daha yüksek BKB ölçütü göstermiştir. YRÇ 4 için elde edilen BKB ölçütlerinde en iyi ölçüt DEB yönteminin [1]. yöntemine göre %39.07 ile 40x40 arenada 10 robot ile uygulanan deneylerde gözlemlenmiştir.

YRÇ 4 için uygulanan deneylerdeki amaç YRÇ 3'e göre BKB ölçütünün farklılığının incelenmesidir. YRÇ yarıçapı BKB metriğindeki robotların komşuluk ilişkilerinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Grafiklerden görüldüğü üzere YRÇ yarıçapının artmasıyla daha yüksek BKB değerleri oluşmuştur. YRÇ'nin artmasıyla birlikte komşuluk ilişkisinin artmasının doğrudan ilişkili olduğu beklenen bir durumdur. Burada önemli olan sonuç, YRÇ yarıçapının artmasının DEB metodunun BKB ölçütündeki performansında kritik bir değişime sebep olmamasıdır. Bu durum DEB metodunun esnekliğinin önemli bir göstergedir.



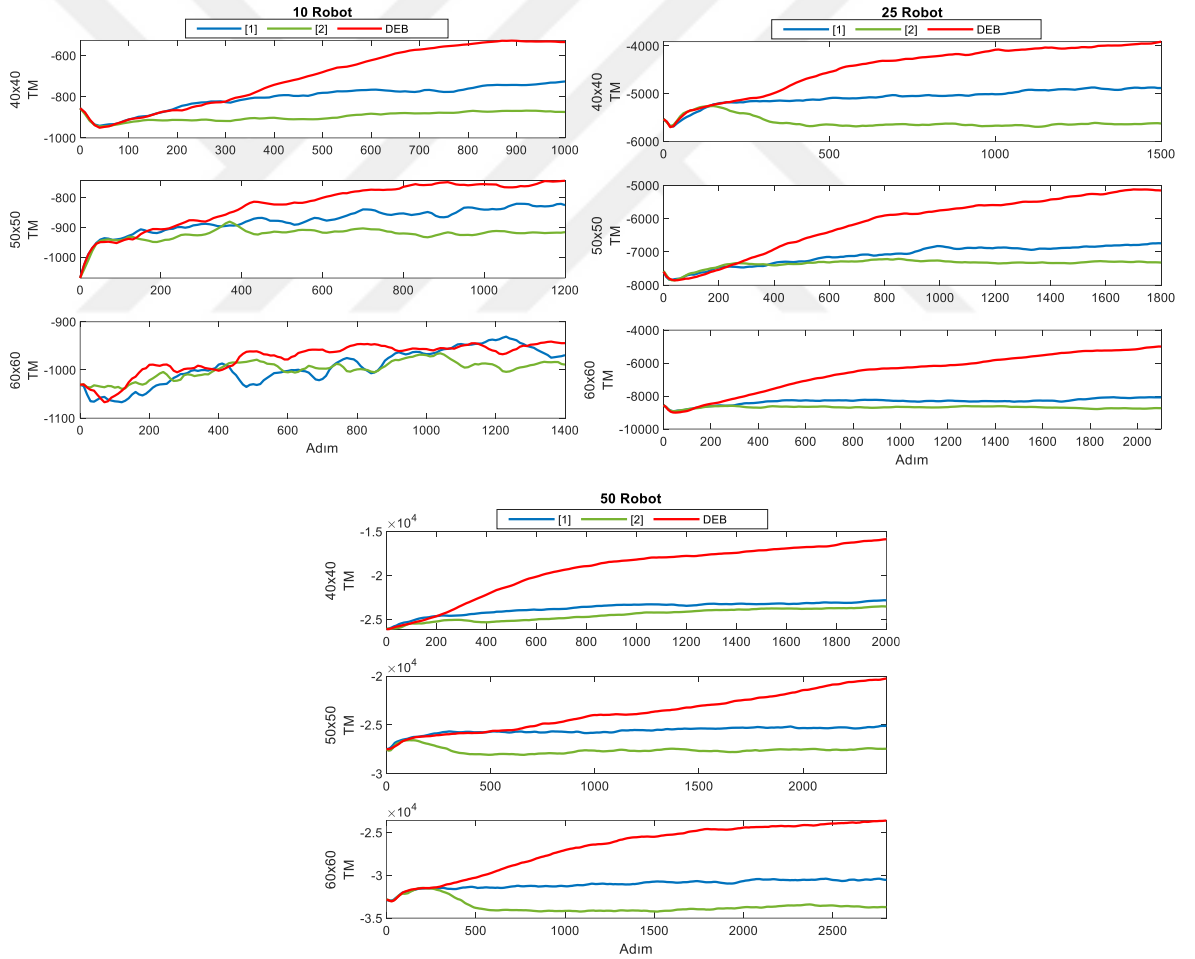
Şekil 4. 29. YRÇ 4 birim için BKB ölçütü karşılaştırılması

4.3.3. Toplam mesafe (TM) ölçütü sonuçları

Bu bölümde bir araya gelme davranışında sürü robotlarının mekânsal dağılımı hakkında daha açıklayıcı bilgi veren TM ölçütü sonuçları incelenmektedir. TM ölçütü bir araya gelme davranışı performansının değerlendirilmesinde önemli ve alternatif bir ölçüt olarak ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.30'da ve Şekil 4.31'de simülasyon adım sayısına bağlı olarak TM ölçütü sonuçları gösterilmektedir.

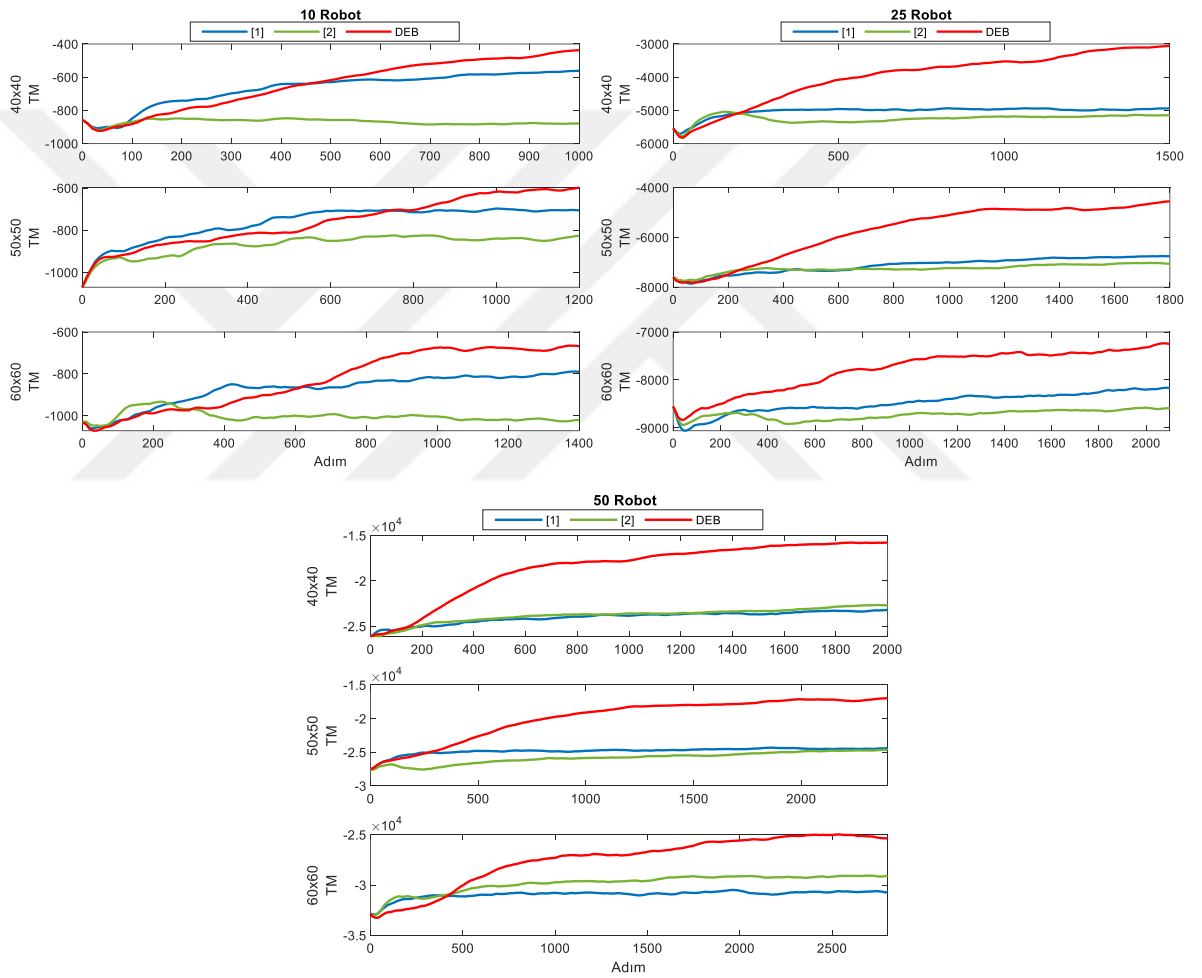
TM ölçütleri sistematik deneylerin 50 kez tekrarından elde edilen sonuçların ortalamasına göre verilmiştir. Kırmızı işaretçi DEB metodunun TM ölçütünü, mavi işaretçi [1] ve yeşil işaretçi [2] yöntemlerinin TM ölçütlerini belirtmektedir.

Şekil 4.30'da YRÇ 3 birim için TM sırasıyla 10, 25 ve 50 robot ile 40x40, 50x50 ve 60x60 arena boyutlarındaki ölçüt sonuçları gösterilmektedir. Uygulanan sabit adımlı deneylerde DEB metot [1]. yöntemle karşılaştırıldığında en iyi performansı 25 robotla 60x60 arenada %61.6, [2]. yöntemle karşılaştırıldığında ise yine aynı deneyde %74.8 daha iyi bir TM ölçütü görülmektedir. YRÇ 3 için uygulanan sistematik 9 farklı simülasyon deneylerinin tamamında DEB metodunun diğer yöntemlerden daha iyi TM ölçütü bulunmaktadır.



Şekil 4. 30. YRÇ 3 birim için TM ölçütü karşılaştırması

Şekil 4.31’de sırasıyla 10, 25 ve 50 robot ile 40x40, 50x50 ve 60x60 arena boyutlarındaki YRÇ 4 birim için TM ölçüt sonuçları gösterilmektedir. YRÇ’nin büyümesiyle TM ölçütünün daha iyi çıkmasında temel faktör daha büyük algılama alanına sahip olan robotların daha kolay komşuluk ilişkisi kurmasından kaynaklanmaktadır. Grafikler incelendiğinde robot sayısındaki artışla sunulan yöntemdeki TM ölçütünün, diğer metotlara göre kayda değer bir performans artışı görülmektedir.



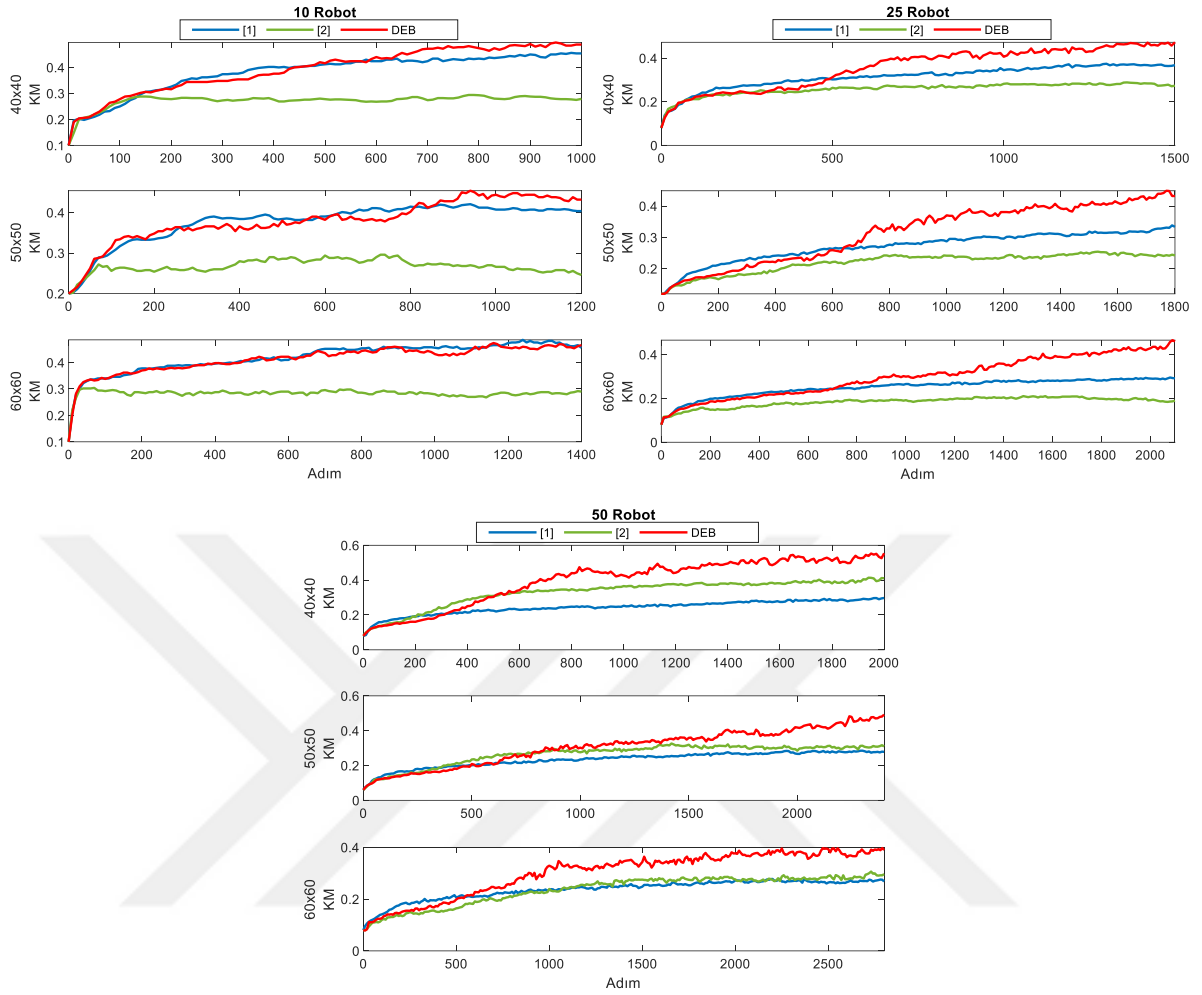
Şekil 4. 31. YRÇ 4 birim için TM ölçütü karşılaştırması

YRÇ 4 için uygulanan deneylerde DEB’in performansı [1]. yöntemine göre en iyi TM ölçüt performansı 25 Robot ile 40x40 arena boyutundaki deneyde %61, [2]. yöntemine göre 10 robot ile 40x40 arena boyutundaki deneyde 2 katı bir ölçüt farkı gözlemlenmiştir.

4.3.4. Kümelenme metriği (KM) sonuçları

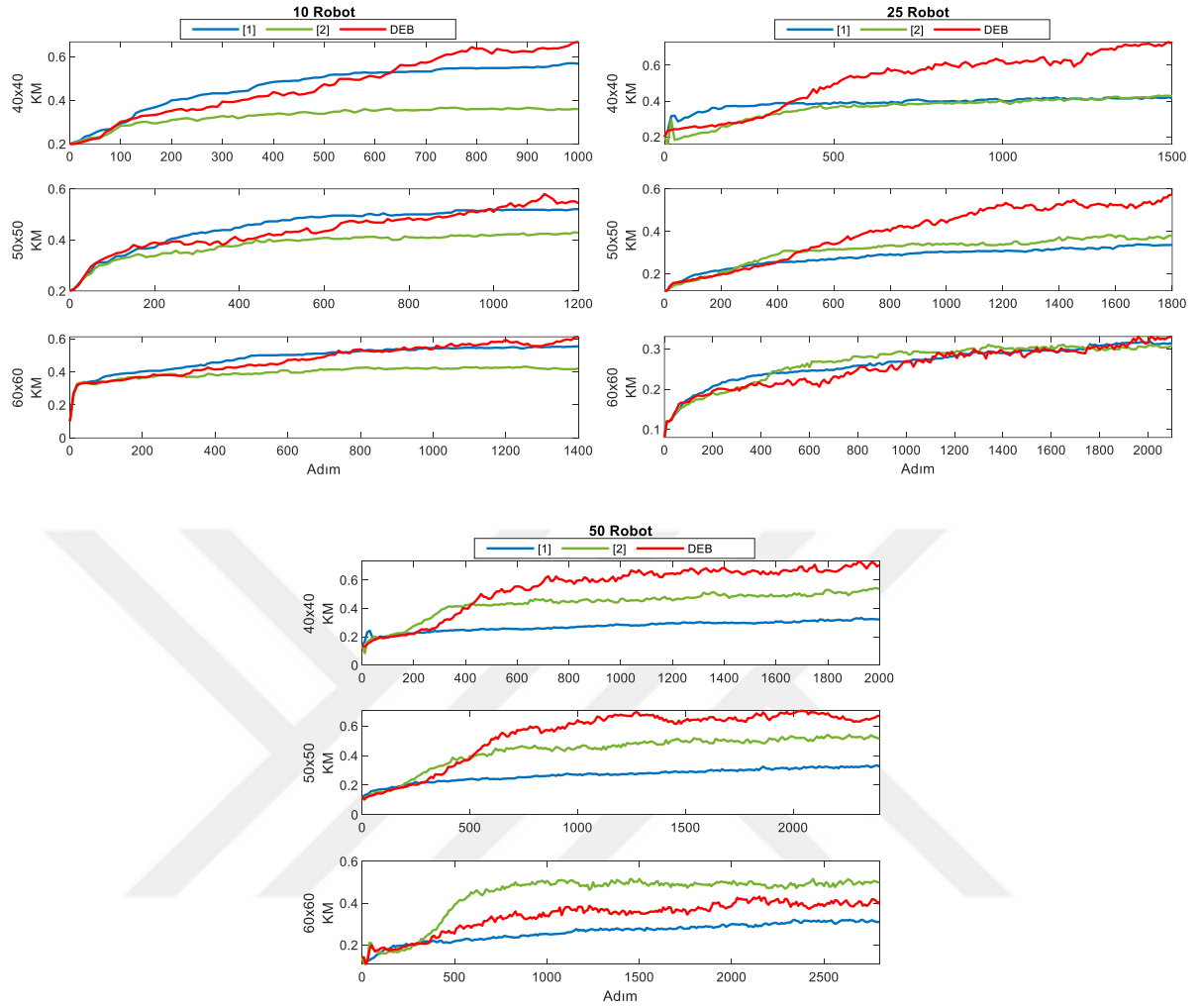
KM ölçütü bir araya gelme davranışının zamana bağlı performansının bir göstergesi olarak ortaya koyulmuştur. KM ölçeği bir araya gelme davranışı sürecindeki en büyük kümenin boyutu referans aldığından (ana küme) komşuluk ilişkileri ve kümelenme hakkında açıklayıcı bilgi vermektedir. DEB metodunun performansını farklı arena boyutlarında, farklı robot sayısında ve farklı YRÇ boyutlarında KM ölçeği 50 kez tekrarlanan sonuçlarının ortalaması referans alınarak karşılaştırma yapılmış, bu durum Şekil 4.32 ve Şekil 4.33.'de adım sayısına bağlı olarak gösterilmiştir.

Şekil 4.32'de YRÇ 3 birim için sırasıyla 10, 25 ve 50 robot ile 40x40, 50x50 ve 60x60 arena boyutlarındaki KM metrik sonuçları gösterilmektedir. YRÇ 3 için KM metriği incelendiğinde, 9 farklı deneyde DEB metodu [1]. ve [2].'ye göre daha yüksek KM değerleri göstermiştir. YRÇ 3 için KM değerleri [1]. metoda göre karşılaştırıldığında DEB metodu, farklı arena boyutlarındaki ortalamalara göre 10, 25 ve 50 robot için sırasıyla %2.4, %12.2 ve %19.7, [2]. metoda göre karşılaştırıldığında ise, 10, 25 ve 50 robot için sırasıyla %19.03, %21.9 ve %13.9 daha yüksek KM ölçeği göstermiştir.



Şekil 4. 32. YRÇ 3 birim için KM ölçütü karşılaştırması

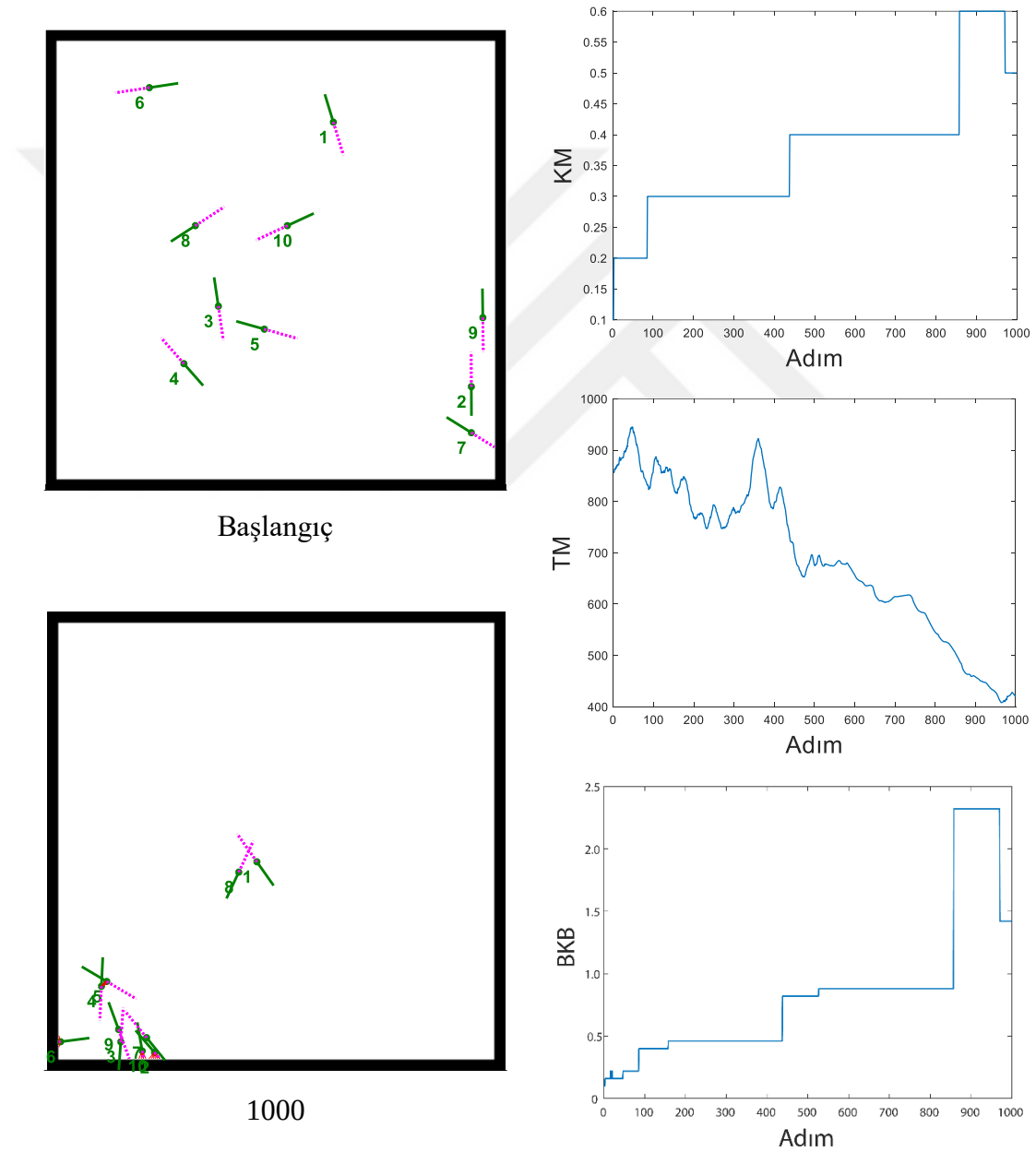
Şekil 4.33’de YRÇ 4 birim için KM metrik sonuçları gösterilmektedir. YRÇ’nin boyutunun büyümesi ile DEB metodunun KM ölçeğindeki performansı da artmıştır. DEB metodunun farklı arena boyutlarındaki ortalamalara göre YRÇ 4 birim için kümelenme ölçeğinin performansı [1]. metoda göre karşılaştırıldığında, 10, 25 ve 50 robot için sırasıyla %6.21, %18,48 ve %27.51, [2]. metoda göre karşılaştırıldığında ise 10, 25 ve 50 robot için sırasıyla %20.53, %16.83 ve %7.85 daha yüksek KM performansı göstermiştir. Fakat bu performans verileri içerisinde 50 robot için 60x60 uygulanan deneylerde [2]. metodun %9.22 daha iyi KM değeri gösterdiği göz ardı edilmemelidir.



Şekil 4. 33. YRÇ 4 birim için KM ölçütü karşılaştırması

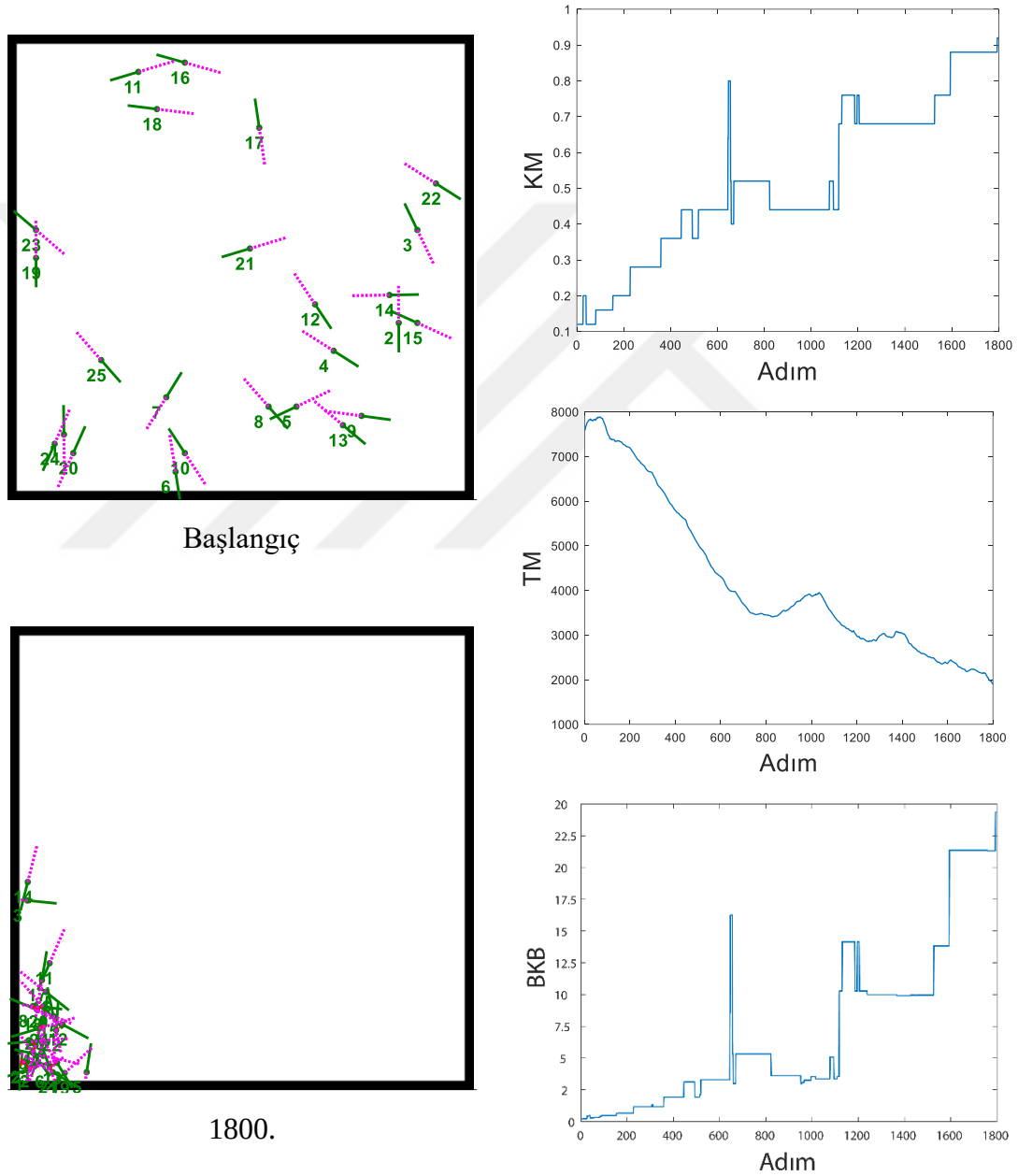
KM metriği için elde edilen grafiklerden gözlemlendiği gibi önerilen her bir metod için uygulanan deneylerde robot pozisyonları sabit olduğundan KM başlangıç değerleri aynıdır. Adım sayının artışı ile DEB metodu diğer yöntemlere kıyasla daha çok robot ile komşuluk ilişkisi kurmaktadır. KM ölçütü bunun en önemli göstergesidir. Robotların oluşturdukları kümelenmelerin daha fazla komşuluk ilişkisi kurmak için robot arayışı ön plana çıkmaktadır. Bu durum DEB metodunun dinamik etkileşim stratejisini ortaya koymaktadır.

Şekil 4.34'te DEB metodunun kullanıldığı YRÇ 3 birim algılama yarı çapına sahip sürü robotlarıyla 40x40 boyutu arenada simülasyon ortamında uygulanan örnek gösterilmektedir. Ayrıca bu örnek bir araya gelme davranışının KM, TM ve BKB ölçütleri gösterilmektedir. Uygulanan simülasyonda 1000. adımda KM ölçütü 0.5, TM ölçütü 455.9 ve BKB ölçütü 1.42 olmuştur.



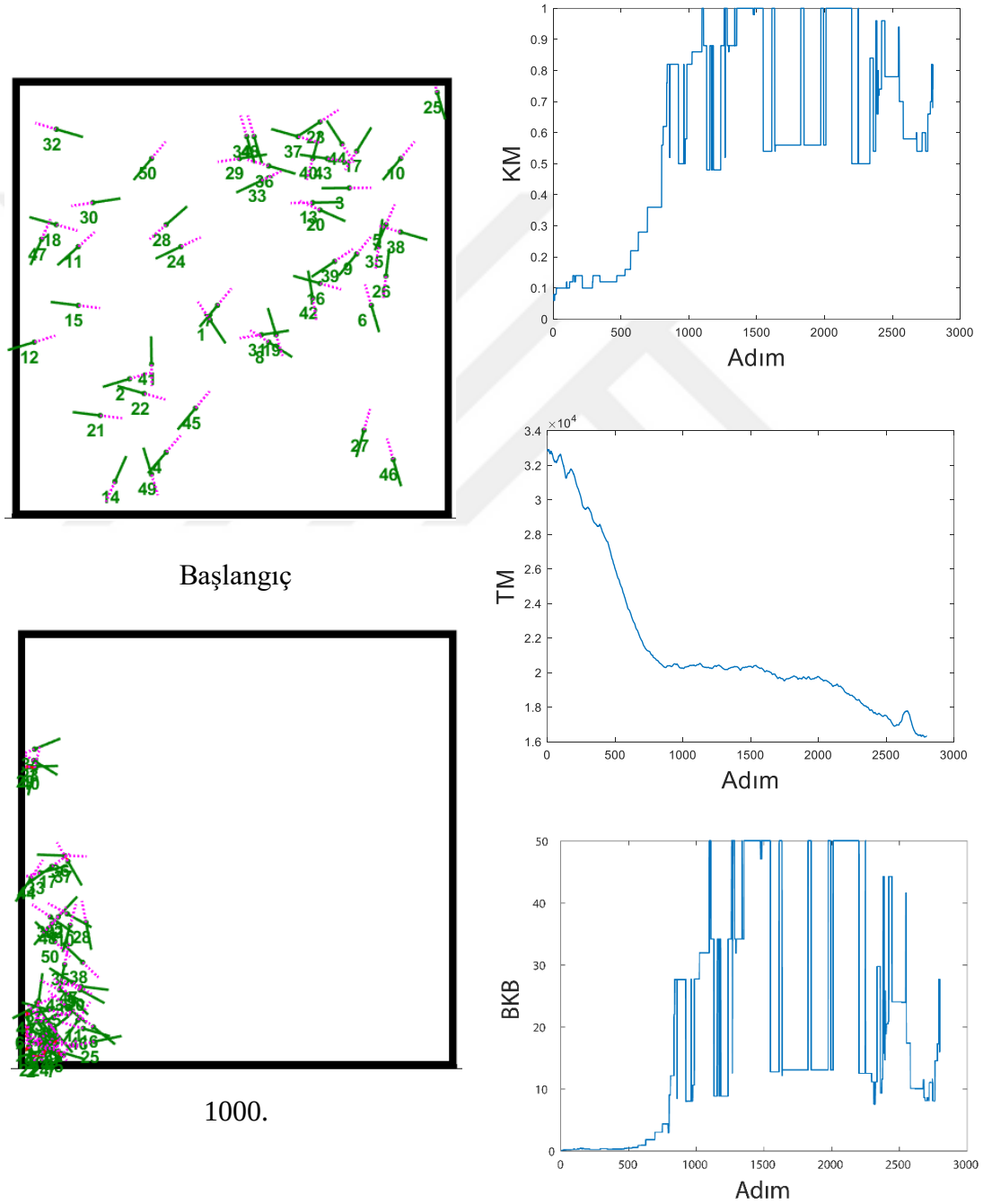
Şekil 4. 34. 50x50 arenada YRÇ 3 birim yarı çaplı sürü robotlarıyla uygulanan simülasyon

Şekil 4.35'te YRÇ 4 birim algılama yarı çapına sahip sürü robotlarıyla 50x50 boyutun arenada DEB metoduyla uygulanan bir araya gelme davranışının simülasyon ortamında uygulanan örneği ve sonuçları gösterilmektedir. Uygulanan simülasyonda 1800. adımda KM ölçütü 0.92, TM ölçütü 1933 ve BKB ölçütü 19.48 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. 35. 50x50 arenada YRÇ 3 birim yarı çaplı sürü robotlarıyla uygulanan simülasyon

Şekil 4.36’da YRÇ 4 birim algılama yarı çapına sahip sürü robotlarıyla 60x60 boyutunda arenada DEB metoduyla uygulanan bir araya gelme davranışının simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Simülasyonda 3000. adımda KM ölçütü 0.82, TM ölçütü 16280 ve BKB ölçütü 27.64 olarak sonuçlanmıştır.



Şekil 4. 36. 60x60 arenada YRÇ 4 birim yarıçaplı sürü robotlarıyla uygulanan simülasyon

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında sürü robotlarında öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı için bir algoritma ve iki farklı metot geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın ve metotların bir araya gelme davranışındaki performansları incelenmiştir.

İlk olarak, öz örgütlenebilir bir araya gelme davranışı için geliştirilen algoritma ile sürü robotlarının esnek ve ölçeklenebilir olarak bu davranışı sergilemeleri amaçlanmıştır. Algoritmanın performansını incelemek için sürü robotlarına farklı büyüklükte arena boyutunda, farklı sayıda robotlarla ve farklı uzunluktaki algılama yarıçaplarında sistematik simülasyon deneyleri uygulanmıştır. Uygulanan sistematik deneylerde sürü robotlarının sayısı değişse de bir araya gelme davranışı sergilenmiştir. Robot sayısının artmasına bağlı olarak sürü robotlarının toplanma süreleri farklılıklar göstermiştir. Uygulanan sistematik deneylerde 5 robot için uygulanan deneylerde en kısa sürede bir araya gelme davranışı gerçekleşmiştir. En uzun sürede toplanma davranışı ise 20 robot için uygulanan sistematik deneylerde elde edilmiştir. Sırasıyla 5, 10,15 ve 20 robot için elde edilen deney sonuçlarına göre bir araya gelme süresi uzamıştır.

Arena boyutunun büyüklüğünün değişimine bağlı olarak toplanma süresi farklılıklar göstermiştir. Uygulanan sistematik deneylerde 15x15, 20x20, 25x25 büyüklüklerdeki alanlarda elde edilen deney sonuçlarına göre arena boyutu büyüdükçe toplanma süresi uzamıştır. Sürü robotları arena büyüklüğüne bağlı olarak rasgele konumlandırılmıştır. Arena büyüklüğü arttıkça robotlar arasındaki uzaklık birbirlerini algılayamayacak derecede arttığından sürü robotları birbirlerini algılamak için hareket ederler. Bu durum sürü robotlarının arenada farklı gruplar oluşturmalarına sebep olur. Arena büyüklüğü arttıkça rasgele yerleştirilen sürü robotları daha çok sayıda grup oluşturabilmektedir. Farklı gruplar bir araya gelme davranışı uygulayarak kümeleşirler.

Algoritma sonuçları algılama yarıçapı için gözlemlendiğinde toplanma süresi değişmektedir. Algılama yarıçapı büyüdükçe toplanma süresi kısalmaktadır. Algılama yarıçapının uzunluğunun artması ile sürü robotları daha uzak mesafede birbirlerini algılamaktadır. Ayrıca deneyler tüm robotların her biri birbirinin algılama alanına girdiğinde deneyler sonuçlandırılmıştır. Algılama yarıçapı büyüdüğünden tüm robotların birbirlerini daha büyük bir algılama alanında algılaması toplanma süresini kısaltmıştır.

Uygulanan sistematik simülasyonlarda en kısa toplanma süresi 15x15 alanda 5 robot için 7 birim algılama yarıçapında 87 adım olarak elde edilmiştir. En uzun toplanma süresi ise 25x25 arena boyutunda 20 robot için 5 birim algılama yarıçapında 4366 adım olarak elde edilmiştir. Her bir sürü robotu özerk olarak toplanma metodunu uygulamıştır. Sürü robotlarının aralarında organize olabilmeleri için bir lidere ihtiyaçları yoktur.

İkinci olarak, BMD tabanlı öz örgütlenebilir bir araya gelme metodu ölçeklenebilirlik ve esneklik açısından 36 farklı sistematik deneye tabi tutulmuştur. BMD'nin performansını farklı arena boyutlarında, farklı algılama alanlarında ve farklı sayıda robotlarla sistematik simülasyonlar yoluyla incelenmiştir. Ayrıca BMD'nin gürültüye karşı tepkisini test etmek için her bir sistematik deneyde sürü robotlarının sensör girişlerine gürültü uygulanmıştır. Elde edilen sistematik deney sonuçlarını 3 farklı açıdan incelenmektedir. Bunlar; Robot sayısı, algılama alanı ve arena boyutudur.

Robot sayısının değişimine göre sistematik deney sonuçları incelendiğinde; robot sayısı arttığında gürültülü ve gürültüsüz deneylerde toplanma süreleri artmaktadır. Robot sayısının artmasıyla birlikte daha çok sayıda robot birbiri ile etkileşime girer. Robot sayısı arttıkça sürü robotunun karşılaştığı problem çözme karmaşası da artar. Gürültü şiddeti arttıkça bir araya gelme performansı dikkat çekici bir şekilde doğrusal olarak azalmamıştır. Bu durum önerilen 3 aşamalı BMD'nin gürültü etkisine karşı güçlülüğünü göstermektedir. Arena boyutunun değişimine göre sistematik deneyler incelendiğinde; arena boyutunun büyüdükçe gürültüsüz ve gürültülü deneylerde aggregation bir araya gelme süreleri artmaktadır. Sürüdeki birçok grup birleşmek için diğer grup veya robotları arar. Diğer grup veya robotları araması toplanma süresinin uzamasına sebep olur.

Robot algılama yarıçapının (YRÇ) değişimine göre sistematik deneyleri incelendiğinde; YRÇ algılama yarıçapı arttığında gürültüsüz ve gürültülü deneylerde toplanma süreleri azalmaktadır. Algılama alanı büyüklüğü arttıkça her bir sürü robotu daha fazla robot ile etkileşime girebilmektedir. Bu sayede toplanma süresi azalmaktadır. Gürültü şiddetinin artmasına göre elde edilen sonuçlarda BMD'nin gürültüye karşı etkisi sayesinde bir araya gelme performansını önemli ölçüde değiştirmediği gözlemlenmiştir. Bir araya gelme performansını ölçmek için kullanılan KM ölçeğinde, algılama yarıçapı arttıkça dalgalanma miktarı azalmıştır. KM ölçeğindeki inişlerin ve çıkışların (dalgalanmalar) azalmasındaki ana sebep sürü robotlarının algılama alanı büyüdükçe her bir robotun daha fazla robotu algılaya bilmesidir.

Son olarak, DEB metodunu ölçeklenebilirlik ve esneklik açısından incelemek için simülasyon ortamında sistematik deneyler uygulanmıştır. Sistematik deneyler, engellerle sınırlandırılmış farklı arena boyutlarında, farklı algılama mesafelerinde ve farklı sayıda robotlarla gerçekleştirilmiştir. DEB metodunun TM, KM ve BKB ölçütleri kullanılarak literatürdeki diğer aggregation metodlarıyla karşılaştırılmıştır.

DEB literatürde önerilen diğer bir araya gelme metodlarıyla 3 farklı metriğe göre karşılaştırarak daha başarılı olduğunu gösterilmiştir. Elde edilen 18 farklı sistematik simülasyon deneyleri sonucunda, DEB diğer metotlara göre BKB ve KM metriğinde %88, TM metriği ölçümlerin tamamında başarı elde edilmiştir. BKB ölçeğine göre sonuçlar değerlendirilmiş, YRÇ 3 birim için DEB metodunun en iyi performansı karşılaştırılan ilk yöntemle göre 40x40 arena boyutunda 50 robot ile %21.07 daha yüksek sonuç elde edilmiştir. YRÇ 4 birim için uygulanan deneylerde YRÇ 4 birim için en iyi performans %39.07 ile 40x40 arenada 10 robot ile uygulanan deneylerde elde edilmiştir. DEB metodunu TM ölçütüne göre değerlendirildiğinde, YRÇ 3 için en iyi performansı ikinci yöntemde %74.8 daha iyi bir TM ölçütü 25 robotla 60x60 arenada elde edilmiştir. YRÇ 4 birim için TM ölçeği incelendiğinde, en iyi TM ölçütü performansı 10 robot ile 40x40 arena boyutundaki deneyde iki kat daha yüksek bir ölçüt farkı elde edilmiştir. . Uygulanan sistematik deneylerde DEB metodunun KM ölçeği [1]. metoda göre karşılaştırıldığında; YRÇ 3 birim için, farklı arena boyutlarındaki ortalamalara göre 10 robotla %2.4, 25 robotla %12.2 ve 50 robotla %19.7 daha yüksek ölçek elde edilmiştir. İkinci ([2].) metoda göre karşılaştırıldığında 10, 25 ve 50 robot için sırasıyla %19.03,

%21.9 ve %13.9 yüksek KM ölçeği elde edilmiştir. YRÇ 4 birim için elde edilen sonuçlarda, ilk karşılaştırılan metoda göre 10, 25 ve 50 robot için sırasıyla %6.21, %18.48 ve %27.51, ikinci metoda göre 10, 25 ve 50 robot için sırasıyla %20.53, %16.83 ve %7.85 yüksek KM ölçeği elde edilmiştir.

Bu çalışmada geliştirilen tüm yöntemler, sürü robotiği uygulamalarında kullanılabilmesinin yanı sıra, iş birliği tabanlı robot uygulamalarında da tercih edilebilir. Sürü robotiği uygulamaları şimdilik küçük ölçekte çoklu robotlar üzerinde çeşitli görev ve davranışlarını gerçekleştirmek için kullanılmaktadır. Bu uygulamaların çoğunda sürü robotları benzer özelliklere sahip robotlarla homojen olarak yer almaktadır. Gelecekteki sürü robot uygulamalarında, gelişen teknoloji ile farklı yetenekteki robotların da heterojen olarak görevlerde yer alacağı beklenmektedir. Dorigo ve ark., (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, sürü robotları 2030'lu yıllarda su altı uygulamalarında ekolojik izleme ve gözetlemede, eğlence sektöründe, temizlik hizmetlerinde yer alacağı, 2040'lı yıllarda Ay ve Mars'ta keşif görevlerini üstleneceği, 2050'li yıllarda mikro seviyede medikal uygulamalarda kullanılacağını ön görülmektedirler.

6. KAYNAKLAR

- Anoop, A.S., Kanakasabapathy, P., 2018. Review on swarm robotics platforms, Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Technological Advancements in Power and Energy: Exploring Energy Solutions for an Intelligent Power Grid, TAP Energy 2017, Kollam.
- Arvin, F., Murray, J., Zhang, C., Yue, S., 2014a. Colias: An autonomous micro robot for swarm robotic applications. *Int. J. Adv. Robot. Syst*, 11(1), 113.
- Arvin, F., Samsudin, K., Ramli, A.R., Bekravi, M., 2011. Imitation of honeybee aggregation with collective behavior of swarm robots. *Int. J. Comput. Intell. Syst*, 4(4), 739–748.
- Arvin, F., Turgut, A.E., Bazyari, F., Arikan, K.B., Bellotto, N., Yue, S., 2014b. Cue-based aggregation with a mobile robot swarm: A novel fuzzy-based method. *Adapt. Behav.*, 22(3), 189–206.
- Arvin, F., Turgut, A.E., Krajník, T., Rahimi, S., Okay, I.E., Yue, S., Watson, S., Lennox, B., 2018. Phi Clust: Pheromone-Based Aggregation for Robotic Swarms, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Madrid.
- Arvin, F., Turgut, A.E., Krajník, T., Yue, S., 2016. Investigation of cue-based aggregation in static and dynamic environments with a mobile robot swarm. *Adapt. Behav.* 24(2), 102–118.
- Bandara, K.Y., Thakur, S., Breslin, J., 2021. Flocking-based decentralised double auction for P2P energy trading within neighbourhoods. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 129, 106766.
- Bayindir, L., 2016. A review of swarm robotics tasks, . *Neurocomputing*, 172, 292–321.
- Bayindir, L., Şahin, E., 2007. A review of studies in swarm robotics. *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 15(2), 115–147.
- Bayındır, L., Sahin, E., 2009. Modeling self-organized aggregation in swarm robotic systems, 2009 IEEE Swarm Intelligence Symposium, SIS 2009 - Proceedings, Nashville.
- Betzler, A.S., Almeida, R.S., Cerqueira, W.J., Araujo, L.A., Prazeres, C.J.M., Jesus, J.N., Bispo, P.A.S., Andrade, V.B., Freitas, Y.A.S., Betzler, L.B.S., 2017. An analysis of the BVRI colors of 22 active comets. *Adv. Sp. Res.*, 60(3), 612–625.
- Brambilla, M., Ferrante, E., Birattari, M., Dorigo, M., 2013. Swarm robotics: A review from the swarm engineering perspective. *Swarm Intell.* 7(1), 1–41.
- Camazine, S., Deneubourg, J.-L., Franks, N.R., Sneyd, J., Theraulaz, G., Bonabeau, E., 2001. Self-organization in biological systems.
- Cianci, C., Magnenat, S., Pugh, J., Alves, C.M.O., Raemy, X., Zufferey, J.-C., Mondada, F., Floreano, D., Klapotocz, A., Torres, P.J.D., Gonçalves, P.J.S., Martinoli, A., Bonani, M., 2009. The e-puck, a Robot Designed for Education in Engineering,

- Proceedings of the 9th Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, Castelo Branco.
- Cohen, E., 1997. Size-Estimation Framework with Applications to Transitive Closure and Reachability. *J. Comput. Syst. Sci.* 55(3), 441–453.
- Coppola, M., Guo, J., Gill, E., de Croon, G.C.H.E., 2019. Provable self-organizing pattern formation by a swarm of robots with limited knowledge. *Swarm Intell.* 13(1), 59–94.
- Dorigo, M., Theraulaz, G., Trianni, V., 2020. Reflections on the future of swarm robotics. *Sci. Robot.*
- Dorigo, M., Trianni, V., Şahin, E., Groß, R., Labella, T.H., Baldassarre, G., Nolfi, S., Deneubourg, J.L., Mondada, F., Floreano, D., Gambardella, L.M., 2004. Evolving self-organizing behaviors for a swarm-bot. *Auton. Robots* 17(2–3), 223–245.
- Dudek, G., Jenkin, M., Milios, E., Wilkes, D., 1993. Taxonomy for swarm robots, 1993 International Conference on Intelligent Robots and Systems.
- Ebert, J.T., Gauci, M., Nagpal, R., 2018. Multi-feature collective decision making in robot swarms, Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS, Stockholm.
- Erol, S., Ec, I., 2007. Aggregation in Swarm Robotic Systems : Evolution, Middle East 15(2), 199–225.
- Farias, G., Fabregas, E., Peralta, E., Torres, E., Dormido, S., 2017. A Khepera IV library for robotic control education using V-REP. *IFAC-PapersOnLine* 50(1), 9150–9155.
- Firat, Z., Ferrante, E., Gillet, Y., Tuci, E., 2020. On self-organised aggregation dynamics in swarms of robots with informed robots. *Neural Comput. Appl.* 32(17), 13825–13841.
- Garnier, S., Jost, C., Gautrais, J., Asadpour, M., Caprari, G., Jeanson, R., Grimal, A., Theraulaz, G., 2008. The embodiment of cockroach aggregation behavior in a group of micro-robots. *Artif. Life* 14(4), 387–408.
- Gasparri, A., Priolo, A., Ulivi, G., 2012. A swarm aggregation algorithm for multi-robot systems based on local interaction, Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications, Dubrovnik.
- Gauci, M., Chen, J., Li, W., Dodd, T.J., Groß, R., 2014. Self-organized aggregation without computation. *Int. J. Rob. Res.* 33(8), 1145–1161.
- Gomes, J., Urbano, P., Christensen, A.L., 2013. Evolution of swarm robotics systems with novelty search. *Swarm Intell.* 7(2–3), 115–144.
- Groß, R., Bonani, M., Mondada, F., Dorigo, M., 2006. Autonomous self-assembly in swarm-bots. *IEEE Trans. Robot.* 22(6), 1115–1130.

- Gutiérrez, Á., Campo, A., Dorigo, M., Donate, J., Monasterio-Huelin, F., Magdalena, L., 2009. Open E-puck range & bearing miniaturized board for local communication in swarm robotics, *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe.
- Heinrich, M.K., Soorati, M.D., Kaiser, T.K., Wahby, M., Hamann, H., 2019. Swarm robotics: Robustness, scalability, and self-X features in industrial applications. *IT - Inf. Technol.* 61(4), 159–167.
- Hendzel, Z., Wiech, J., 2019. Robotic Swarm Self-Organisation Control. *Acta Mech. Autom.* 13(2), 130–134.
- Hu, D., Zhong, M., Zhang, X., Yao, Y., 2014. Self-organized aggregation based on cockroach behavior in swarm robotics, *Proceedings - 2014 6th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, IHMSC 2014, Hangzhou*.
- Jeanson, R., Rivault, C., Deneubourg, J.L., Blanco, S., Fournier, R., Jost, C., Theraulaz, G., 2005. Self-organized aggregation in cockroaches. *Anim. Behav.* 69(1), 169–180.
- Katada, Y., 2018. Evolutionary design method of probabilistic finite state machine for swarm robots aggregation. *Artif. Life Robot*, 23(4), 600–608.
- Kernbach, S., Thenius, R., Kernbach, O., Schmickl, T., 2009. Re-embodiment of honeybee aggregation behavior in an artificial micro-robotic system. *Adapt. Behav.*, 17(3), 237–259.
- Khalidi, B., Cherif, F., 2016. A virtual viscoelastic based aggregation model for self-organization of swarm robots system, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Thermodyn, 1091–1102.
- Khalidi, B., Harrou, F., Cherif, F., Sun, Y., 2017. A distance weighted-based approach for self-organized aggregation in robot swarms, *2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes, ICEE-B 2017*.
- Khalidi, B., Harrou, F., Cherif, F., Sun, Y., 2018. Self-organization in aggregating robot swarms: A DW-KNN topological approach. *BioSystems*, 165, 106–121.
- Khalidi, B., Harrou, F., Cherif, F., Sun, Y., 2019. Flexible and Efficient Topological Approaches for a Reliable Robots Swarm Aggregation. *IEEE Access* 7, 96372–96383.
- Leccese, A., Gasparri, A., Priolo, A., Oriolo, G., Ulivi, G., 2013. A swarm aggregation algorithm based on local interaction with actuator saturations and integrated obstacle avoidance, *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe.
- Lerman, K., Martinoli, A., Galstyan, A., 2005. A review of probabilistic macroscopic models for swarm robotic systems, *Lecture Notes in Computer Science*.

- Ligot, A., Kuckling, J., Bozhinoski, D., Birattari, M., 2020. Automatic modular design of robot swarms using behavior trees as a control architecture. *PeerJ Comput., Sci.* 6, e314.
- Martínez-Clark, R., Cruz-Hernández, C., Pliego-Jimenez, J., Arellano-Delgado, A., 2018. Control algorithms for the emergence of self-organized behaviours in swarms of differential-traction wheeled mobile robots. *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 15(6), 172988141880643.
- Mayya, S., Wilson, S., Egerstedt, M., 2019. Closed-loop task allocation in robot swarms using inter-robot encounters. *Swarm Intell.* 13(2), 115–143.
- McLurkin, J., Lynch, A.J., Rixner, S., Barr, T.W., Chou, A., Foster, K., Bilstein, S., 2012. A low-cost multi-robot system for research, teaching, and outreach, *Springer Tracts in Advanced Robotics*.
- Mısıır, O., Gokrem, L., 2020. Sürü Robotları için Esnek ve Ölçeklenebilir Toplanma Davranışı Metodu. *Eur. J. Sci., Technol.* 100–109.
- Mısıır, O., Gökrem, L., Serhat Can, M., 2020. Fuzzy-based self organizing aggregation method for swarm robots. *BioSystems* 196, 104187.
- Mondada, F., Pettinaro, G.C., Guignard, A., Kwee, I.W., Floreano, D., Deneubourg, J.L., Nolfi, S., Gambardella, L.M., Dorigo, M., 2004. Swarm-bot: A new distributed robotic concept. *Auton. Robots*, 17(2–3), 193–221.
- Nedjah, N., Junior, L.S., 2019. Review of methodologies and tasks in swarm robotics towards standardization. *Swarm Evol. Comput.*, 50, 100565.
- Nemec, D., Janota, A., Hruboš, M., Gregor, M., Pirník, R., 2017. Mutual acoustic identification in the swarm of e-puck robots. *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 14(3), 172988141771079.
- Oh, H., Ramezan Shirazi, A., Sun, C., Jin, Y., 2017. Bio-inspired self-organising multi-robot pattern formation: A review, . *Rob. Auton. Syst.* 91, 83–100.
- Olaronke, I., Rhoda, I., Gambo, I., Oluwaseun, O., Janet, O., 2020. A Systematic Review of Swarm Robots. *Curr. J. Appl. Sci. Technol.*, (1), 79–97.
- Parhizkar, M., Di Marzo Serugendo, G., Nitschke, J., Hellequin, L., Wade, A., Soldati, T., 2020. First-order agent-based models of emergent behaviour of Dictyostelium discoideum and their inspiration for swarm robotics: A selection of aggregation phase behaviour with biological illustrations. *Artif. Life Robot.* 25(4), 643–655.
- Patil, M., Abukhalil, T., Sobh, T., 2013. Hardware Architecture Review of Swarm Robotics System: Self-Reconfigurability, Self-Reassembly, and Self-Replication, . *ISRN Robot.* 2013, 1–11.
- Prasetyo, J., De Masi, G., Ferrante, E., 2019. Collective decision making in dynamic environments. *Swarm Intell.*, 13(3–4), 217–243.

- Reynolds, C.W., 1987. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model, Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1987.
- Rubenstein, M., Ahler, C., Nagpal, R., 2012. Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors, Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul.
- Rubenstein, M., Cornejo, A., Nagpal, R., 2014. Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm. *Science*, 345(6198), 795–799.
- Sadeghi Amjadi, A., Raoufi, M., Turgut, A.E., 2021. A self-adaptive landmark-based aggregation method for robot swarms. *Adapt. Behav.* 105971232098554.
- Şahin, E., 2005. Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application, Lecture Notes in Computer Science.
- Sathiya, V., Chinnadurai, M., 2019. Evolutionary Algorithms-Based Multi-Objective Optimal Mobile Robot Trajectory Planning, *Robotica* 37(8), 1363–1382.
- Seeja, G., Arockia Selvakumar, A., Berlin Hency, V., 2018. A Survey on Swarm Robotic Modeling, Analysis and Hardware Architecture, *Procedia Computer Science*.
- Song, Y., Fang, X., Liu, B., Li, C., Li, Y., Yang, S.X., 2020. A novel foraging algorithm for swarm robotics based on virtual pheromones and neural network. *Appl. Soft Comput.* J., 90, 106156.
- Soysal, O., Şahin, E., 2005. Probabilistic aggregation strategies in swarm robotic systems, Proceedings - 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium, SIS 2005, Pasadena.
- Soysal, O., Şahin, E., 2007. A macroscopic model for self-organized aggregation in swarm robotic systems, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics).
- Talamali, M.S., Bose, T., Haire, M., Xu, X., Marshall, J.A.R., Reina, A., 2020. Sophisticated collective foraging with minimalist agents: a swarm robotics test. *Swarm Intell.*, 14(1), 25–56.
- Tan, Y., Zheng, Z. yang, 2013. Research Advance in Swarm Robotics, *Def. Technol.*
- Tang, Q., Ding, L., Li, J., Zhang, Y., Yu, F., 2018. A stigmergy-based aggregation method for swarm robotic system, 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2017 - Proceedings.
- Trianni, V., Groß, R., Labella, T.H., Şahin, E., Dorigo, M., 2003. Evolving aggregation behaviors in a Swarm of robots, Lecture Notes in Artificial Intelligence (Subseries of Lecture Notes in Computer Science), Berlin, https://doi.org/10.1007/978-3-540-39432-7_93.
- Trianni, V., Nolfi, S., Dorigo, M., 2006. Cooperative hole avoidance in a swarm-bot, *Robotics and Autonomous Systems*.
- Turgut, A.E., Çelikkanat, H., Gökçe, F., Şahin, E., 2008. Self-organized flocking in mobile robot swarms. *Swarm Intell.* 2(2–4), 97–120.

- Vanualailai, J., Sharma, B., 2010. A Lagrangian-based Swarming Behavior in the Absence of Obstacles. *Work. Math. Control Theory* (2003), 1–17.
- Virágh, C., Vásárhelyi, G., Tarcai, N., Szörényi, T., Somorjai, G., Nepusz, T., Vicsek, T., 2014. Flocking algorithm for autonomous flying robots. *Bioinspiration and Biomimetics* 9(2), 025012.
- Vitanza, A., Rossetti, P., Mondada, F., Trianni, V., 2019. Robot swarms as an educational tool: The Thymio's way. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 16(1), 172988141882518.
- Yan, X., Liang, A., Guan, H., 2011. An algorithm for self-organized aggregation of swarm robotics using timer, *IEEE SSCI 2011 - Symposium Series on Computational Intelligence - SIS 2011: 2011 IEEE Symposium on Swarm Intelligence*, Paris.
- Yang, H. an, Cao, S., Bai, L., Zhang, Z., Kong, J., 2019. A distributed and parallel self-assembly approach for swarm robotics. *Rob. Auton. Syst.* 118, 80–92.
- Zhang, S., Liu, M., Lei, X., Huang, Y., Zhang, F., 2018. Multi-target trapping with swarm robots based on pattern formation. *Rob. Auton. Syst.* 106, 1–13.
- Zhao, H., Liu, H., Leung, Y.W., Chu, X., 2018. Self-Adaptive Collective Motion of Swarm Robots. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 15(4), 1533–1545.