

**BİYOLOJİK TABANLI ENİYİLEME YÖNTEMLERİ KULLANILARAK  
ÇOKLU ROBOTLAR İLE BİLİNMEYEN BİR ORTAMIN GERÇEK  
ZAMANLI KİMYASAL GAZ YOĞUNLUĞU HARİTALANMASI**

**MİRBEK TURDUEV**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AĞUSTOS 2010**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

---

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

---

Prof.Dr. M. Önder EFE

Anabilim Dalı Başkanı

Mirbek Turduev tarafından hazırlanan BİYOLOJİK TABANLI ENİYİLEME YÖNTEMLERİ KULLANILARAK ÇOKLU ROBOTLAR İLE BİLİNMEYEN BİR ORTAMIN GERÇEK ZAMANLI KİMYASAL GAZ YOĞUNLUĞU HARİTALANMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Doç. Dr. Veysel GAZİ

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Mehmet Önder EFE

Üye : Doç. Dr. Veysel GAZİ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nilay SEZER UZOL

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Mirbek Turduev

**Üniversitesi** : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
**Enstitüsü** : Fen Bilimleri Enstitüsü  
**Anabilim Dalı** : Elektrik ve Elektronik Mühendisliği  
**Tez Danışmanı** : Doç. Dr. Veysel GAZİ  
**Tez Türü ve Tarihi** : Yüksek Lisans - Ağustos 2010

**MİRBEK TURDUEV**

**BİYOLOJİK TABANLI ENİYİLEME YÖNTEMLERİ KULLANILARAK  
ÇOKLU ROBOTLAR İLE BİLİNMEYEN BİR ORTAMIN GERÇEK  
ZAMANLI KİMYASAL GAZ YOĞUNLUĞU HARİTALANMASI**

**ÖZET**

Bu tez çalışmasında bilinmeyen bir ortamda kimyasal gaz yoğunluğunun yüksek olduğu bölgenin tespiti ve bu kimyasal ortamın gerçek zamanlı üç boyutlu haritalanması gezgin robotlar kullanarak biyolojik tabanlı eniyileme yöntemleri yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Kimyasal ortamın en yoğun olduğu bölgesini arama ve ortamı haritalama işlemleri için “*kheNose*” donanımı ile donatılmış Khepera III gezgin robotlar kullanılmıştır. Arama işlemi Eşzamansız Parçacık Sürü Eniyileme, Bakteri Beslenmesi Tabanlı Eniyileme ve Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı Eniyileme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üstelik uygulanan yöntemlerin tutarlılığın denetlemek amacı ile Süpürme yöntemi kullanılmıştır. Arama ve haritalama sırasında robotlar pozisyon bilgilerini ve algılayıcı verilerini kablosuz ağ üzerinden diğer robotlar ile paylaşmakta ve aynı zamanda kumanda merkezine aktarmaktadırlar. Kumanda merkezine gelen veriler birleştirilmiş, süzölmüş ve ortamın kimyasal gaz yoğunluğunun gerçek zamanlı 3 boyutlu haritalanması çıkarılmıştır. Ayrıca *Kriging* ve süzgeçleme yöntemi kullanarak elde edilen verilere aradeğerleme, dışdeğerleme ve pürüzsüzleştirme yapılarak daha pürüzsüz harita elde edilmiştir. Uygulanan yöntemlerin verimliliği elden edilen kimyasal harita kalitesi ve kimyasal kaynağın başarılı biçimde bulabilme özellikleri bakımından karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Biyolojik Tabanlı Eniyileme Yöntemleri, Parçacık Sürü Eniyileme Yöntemi, Eşzamansız Parçacık Sürü Eniyileme Yöntemi, Bakteri Beslenmesi Eniyileme Yöntemi, Karınca Kolonisi Beslenmesi Eniyileme Yöntemi, Kimyasal Gaz Yoğunluğu Haritalaması

**University** : TOBB University of Economics and Technology  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Electrical and Electronics Engineering  
**Supervisor** : Associate Professor Veysel GAZI  
**Degree Awarded and Date** : M.S. - August 2010

**MİRBEK TURDUEV**

**REAL-TIME CHEMICAL GAS CONCENTRATION MAP BUILDING OF  
UNKNOWN ENVIRONMENT BY MULTIPLE MOBILE ROBOTS USING  
BIO-INSPIRED ALGORITHMS**

**ABSTRACT**

In this thesis implementations of various bio-inspired algorithms for obtaining high concentration regions of the chemical gas and real time chemical gas concentration mapping of an environment filled with a contaminant by using mobile robots are described. Khepera III miniature mobile robots equipped with the “*kheNose*” transducer are used to search and determine the high concentration regions of the chemical gas contaminant and to build 3D map of the chemical gas concentration in the environment. The search and mapping process is achieved by using the Particle Swarm Optimization (PSO), Bacterial Foraging Optimization (BFO), and Ant Colony Optimization (ACO) algorithms. Moreover, we perform Sweeping algorithm as base case to compare with implemented algorithms. During the experiments at each step the robots share their sensor readings and position data through a wireless network among each other and also send to a remote computer where the data are combined, filtered, and interpolated to form the chemical concentration 3D map of the environment in real time. In order to obtain smoother chemical concentration map the *Kriging* method is used and an extrapolation and an interpolation algorithms are applied. The performance of the implemented algorithms are also compared in terms of the quality of the maps obtained and success of locating the contaminating gas sources.

**Keywords:** Bio-inspired Search Algorithms, Particle Swarm Optimization, Asynchronous Distributed Particle Swarm Optimization Algorithm, Bacterial Foraging Optimization Algorithm, Ant Colony Optimization Algorithm, Chemical Gas Concentration Map Building

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimin süresi boyunca bazen babam gibi davranıp doğru yolu gösterdiği için, bazen en yakın arkadaşım gibi davranıp zorluk çektiğim zamanlarımda desteklerini benden esirgemediği için, hatta bazen sert iş patronu gibi davranıp her şeyin zamanında bitmesini istediği için ve daha fazla çalışmamızı teşvik ettiği için hayatımdaki unutmayacağım değerli hocam Doç. Dr. Veysel GAZİ'ye ve yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım değerli hocalarım Prof. Dr. Mehmet Önder EFE'ye ve Yrd. Doç. Dr. Nilay Sezer Uzol'a,

Her türlü zorluğa birlikte göğüs gerdiğim Sürü Sistemler Araştırma Laboratuvarı'ndaki çalışma arkadaşlarım olan Murat İter Köksal, Salih Burak Akat, Ömer Çayırpunar, Engin Karataş, Abdel-Razzak Merheb, Esmâ Gül ve Sabahat Duran'a ve her zaman çok çalışkan, çalışmalarım da beraber kafa yordüğümüz Bilkent Üniversitesi öğrencisi arkadaşım Murat Kırtay'a

Ve her zaman beni destekleyen ve bugünlere getiren aileme ve eşime teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Avrupa Komisyonu tarafından 045269 sözleşme numaralı 6. Çerçeve Programı özel amaçlı araştırma projesi kapsamında ve TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından 104E170 ve 106E122 sayılı projeler kapsamında desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
1. GİRİŞ	2
2. PROBLEM TANIMI VE DENEYSEL DÜZENEK	8
2.1. Problem Tanımı	8
2.2. Deneysel Düzenek	9
2.2.1. Laboratuar Ortamı ve Robotlar	9
2.2.2. Yapay Potansiyel Fonksiyonlar ve Robot Denetimi	11
2.2.3. Kimyasal Algılayıcılar ve KheNose	15
3. EŞZAMANSIZ VE DAĞINIK PARÇACIK ENİYİLEME YÖNTEMİ İLE ORTAMIN KİMYASAL GAZ YOĞUNLUĞU HARİTALANMASI	17
3.1. Temel Parçacık Sürü Eniyileme Yöntemi	17
3.2. Eşzamansız ve Dağıtık Parçacık Sürü Eniyileme Algoritması	22
3.3. Uygulama Sonuçları	24
4. BAKTERİ BESLENMESİ TABANLI ENİYİLEME YÖNTEMİ İLE KİMYASAL GAZ YOĞUNLUĞU HARİTALANMASI	31
4.1. Bakteri Beslenmesi Tabanlı Eniyileme Yönteminin Genel Özellikleri	31
4.2. Bakteri Beslenmesi Eniyileme Yönteminin Robotlar Üzerinde Uygulanması	33
4.3. Uygulama Sonuçları	35

5. KARINCA KOLONİSİ BESLENMESİ TABANLI ENİYİLEME YÖNTEMİ İLE KİMYASAL GAZ YOĞUNLUĞU HARİTALANMASI	43
5.1. Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı Eniyileme Alogritmasının Genel Özellikleri	43
5.2. Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı Eniyileme Yönteminin Çok Robotlu Arama Sisteminde Uygulanması	45
5.3. Uygulama Sonuçları ve Tartışma	47
6. SONUÇ	52
6.1. Yorumlar	52
6.2. Gelecek Çalışmalar	54
KAYNAKLAR	55



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Temel Parçacık Sürü Eniyileme Yönteminin Sözde Kodu.	18
Çizelge 3.2. Eşzamansız ve Dağıtık Parçacık Sürü Eniyileme Yöntemin Sözde Kodu.	30
Çizelge 4.1. Bakteri Beslenmesi Eniyileme Yönteminin Sözde Kodu.	35
Çizelge 4.2. Yüzme Fonksiyonunun Sözde Kodu.	36
Çizelge 5.1. Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı Eniyileme Yöntemin Sözde Kodu.	46

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kapalı deneysel düzenek.	9
Şekil 2.2. KheNose algılayıcı sistemi ve 3DM GX2 Microstrain IMU ile donatılmış Khepera III gezgin robotlar.	10
Şekil 2.3. Hız-kısıtlı robot yapısı.	11
Şekil 2.4. Kalibrasyon düzeneği.	16
Şekil 3.1. Parçacık Sürü Eniyileme yönteminin çoklu robotlar üzerinde görselleştirilmesi.	24
Şekil 3.2. Eşzamansız ve Dağıtık Parçacık Sürü Eniyileme yöntemi ile haritalama.	26
Şekil 3.3. Temel Parçacık Sürü Eniyileme yöntemi ile haritalama.	27
Şekil 3.4. Temel Parçacık Sürü Eniyileme yöntemi ile bir robotun diğer robotlar ile haberleşemediği durumdaki haritalama.	28
Şekil 3.5. Eşzamansız ve Dağıtık Parçacık Sürü Eniyileme yöntemi ile bir robotun diğer robotlar ile haberleşemediği durumdaki haritalama.	29
Şekil 4.1. <i>E.coli</i> bakterisinin besin bulmak amacıyla yaptığı hareketlerinin görselleştirilmesi.	31
Şekil 4.2. Robotların Bakteri Beslenmesi Eniyileme yönteminde yön seçme görselleştirilmesi.	34
Şekil 4.3. Bir birine yakın olan üç farklı kaynaktan yayılan gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.	37
Şekil 4.4. Bir birine yakın olan üç farklı kaynaktan yayılan gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.	38
Şekil 4.5. Bir birinden uzakta olan üç farklı kaynaktan yayılan gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.	39
Şekil 4.6. Matlab yazılımı ile gerçek zamanlı elde edilen 3 boyutlu ara zamanlarda kimyasal gaz yoğunluğu haritası.	40
Şekil 4.7. Ortamın Golden Surfer9 yazılımı ile gerçek zamanlı elde edilen 3 boyutlu ara zamanlarda kimyasal gaz yoğunluğu haritası.	41
Şekil 4.8. Ortamın Golden Surfer9 yazılımı ile gerçek zamanlı elde edilen ara zamanlarda kimyasal gaz yoğunluğu kontür haritası.	42
Şekil 5.1. Karınca Kolonisi Beslenmesi Yönteminin Görselleştirilmesi.	45
Şekil 5.2. Sweeping yöntemi ile kimyasal gaz yoğunluğu haritalanması.	48
Şekil 5.3. Karınca Kolonisi Eniyileme yöntemi ile kimyasal gaz yoğunluğu haritalanması.	49
Şekil 5.4. Karınca Kolonisi Eniyileme yöntemi ile kimyasal gaz yoğunluğu haritalanması.	50

## BÖLÜM 1

### 1. GİRİŞ

Doğada yaşayan canlıların hareketlerinden esinlenerek geliştirilen biyolojik tabanlı algoritmaların varolan problemlere çözüm üretmek için kullanılması sürü robotik sistemler uygulamaları açısından son yıllarda önem kazanmıştır. Sürü robotik sistemler konusu yeni olmasına rağmen hızla gelişen bir konudur. Bu tip sistemlerin faydalı yanları esnek, gürbüz, merkezi olmayan ve kendi kendine örgütlenme özellikleridir. Tek bir robot için fazla karmaşık olan bazı görevler sürü robotlarla başarılabilir. Bir kutunun itilmesi tek bir robot için imkansız bir görev olabilir ancak sürü robotlar eşgüdümlü çalışarak aynı kutuyu rahatlıkla itebilir. Basit özelliklerle üretilen robotlar karmaşık bir robota göre daha ucuz, daha sağlam, daha esnek, daha yüksek hata toleransına sahip ve daha güvenilir olurlar. Sürüyü oluşturan robotlardan bir veya birkaçı bozulsa dahi sürünün geri kalanı görevi sürdürebilir. Sürünün üyeleri arasındaki etkileşimin doğrudan değil de sürüyü çevreleyen ortam vasıtasıyla olması robotlar arasındaki iletişim yükünü de azaltabilir. Sürü robotik sistemlerin sorunları olarak yerel bilgi kullanımından kaynaklanan yerel minimum problemi ve bu robotların çok basit olmaları sebebiyle özel görevler için nasıl programlanacakları sayılabilir [1, 2].

Literatürde sürü robotların birçok uygulaması vardır. Bu uygulamalardan burada değinilebilecek bazıları, öncül çalışmalardan biri olan ve kuş sürüsü benzetiminin yapıldığı [3], böcek sürünlerinden esinlenilerek geliştirilmiş mühendislik uygulamalarının yer aldığı [2], Starlogo isimli nesne yönelimli bir programla dili ile cıvık mantar<sup>1</sup>, karınca, trafik sıkışıklığı, termit vb. benzetimlerinin yapıldığı [4], hedef en az bir robotun görüş açısında olacak şekilde sürüye hedef gözlemi yaptırılan [5], insanlarla karşılaşma hedefli robot futbolu [6], işbirlikli nesne taşıma [7], askeri uygulama olabilecek [8], hava araçları ve mikro hava araçları ile ilgili [9–11], hareketli algılayıcılar ile ilgili [12], insanlara yardımcı robotlarla ilgili [13], uzay araçlarının hareket denetimi ile ilgili [14], mini denizaltılarda iletişim ile ilgili [15], konumlanma ve harita çıkarma [16, 17], hareketli robotlar ve mikro robotlar [18, 19] ve “NP-Hard” seviyesinde gerçek hayat problemleri çözen algoritmalar [20] olarak sayılabilir.

Sürü robotik sistemleri belirtilen avantajları nedeniyle birçok mühendislik projesinde kullanılmaktadır. “Swarm-bots” projesinden “s-bots” adlı küçük ve maliyeti

---

<sup>1</sup>ing: slime mold

düşük erkinlerin kendini örgütlemesi ile “Swarm-bot” adlı tek bir sistemi meydana getirmesine odaklanılmıştır [26]. Küçük erkinlerden oluşan tek büyük erkinin küçük erkinlerin tek başına gerçekleştiremeyecekleri ağır bir yükü taşıma ve engebeli bir arazide gezinme gibi görevlerde kullanılması amaçlanmıştır. Öte yandan çevrenin durumuna göre küçük erkinler büyük erkinin farklı geometrik şekillerde oluşturması da amaçlanmıştır. Sürü robotların tek bir robot sistemi oluşturması istenen projelerin dışında bu tip sistemlerin arama kurtarma işlemlerinde kullanılmaya amaçlandığı projelerde mevcuttur. “Guardians” projesi özerk erkinlerden oluşan bir sürünün bilinmeyen endüstriyel bir binadaki yangın ortamında (ortam çeşitli zararlı kimyasalların olduğu) arama ve kurtarma görevlerinde kullanılmasına odaklanılmıştır [28]. Projenin asıl amacı özerk bir sürünün ortamda bulunan bir itfaiyeciye arama sırasında yardım etmesi ve onu olası tehlikelerden uzak tutmasıdır. Sürü sistemlerin arama ve kurtarma görevlerinde kullanılmasının amaçlandığı bir başka proje olan “View-Finder” projesinde yarı özerk robot sürüsünün yangın ortamının haritasını çıkarması ve veri toplaması amaçlanmıştır [29]. Böylece itfaiyeciler arama kurtarma görevlerinde ortam hakkında gerekli bilgilere önceden sahip olacaktır.

Son yıllarda robotik uygulamalarında robot koku algılama çalışmalar sayısı önemli ölçüde artmıştır. Kimyasal sensörler ile donatılmış gezgin robotlar birçok uygulamalarda yer almıştır: insan hayatı emniyeti, güvenlik ve çevre keşif. Kimyasal madde sızıntısı dolayı kapalı kirlenmiş bir alanın sürekli biçimde gözlemlemek ve kirlen maddeyi sınıflandırmak amacı ile insanların hayatını tehlikeye atmadan insanların yerine çoklu robotlar arama görevinde kullanılabilir. Robotlar arama işbirliğini paralel biçimde yapabildiğinden arama performansı daha yüksektir. Robotların arama görevini başarılı biçimde tamamlayabilmeleri için robotlar arası verimli kordinasyon olmasının yanı sıra robotların alanı kapsama, keşif etme ve alana dağılma gibi yöntemlere ihtiyacı vardır. Bu hedeflere başarılı biçimde ulaşabilmek için en uygun olan yöntemler Biyolojik Tabanlı Eniyileme yöntemleridir. Doğadaki yaşayan canlıların davranışlarından esinlenerek ortaya atılan Parçacık Sürü Eniyileme yöntemi, Yapay Bağışlık Sistemi, Bakteri Beslenmesi Tabanlı Eniyileme yöntemi, Karınca Kolonisi Tabanlı Eniyileme yöntemi bir çok kimyasal gaz yoğunluğu haritalanması [65], gezgin robot güzergah planlaması [66], iş dağıtımını planlaması [67], gezgin satıcı problemi [56] gibi uygulamalarda kullanılmıştır.

Gezgin robotlar ile koku kaynağı tespiti ve konumlandırması deneyleri bir çok çalışmalarda incelenmiştir [60, 62]. Yapılan çalışmaların çoğunda tek kaynak tercih edilmiştir ve robotlar koku kaynağı tespit etmek ve alanı aramak için

önceden belirlenmiş güzergahı takip etmek zorundadır. Gaz yoğunluğunun haritalanması çalışmasında [60] koku ve gaz dağılımı sınıflandırması lazer ve ses ötesi algılayıcılardan elde edilen veriler ile birleştirilip kullanılmıştır. Başka bir çalışmada ise Gauss ağırlıklı fonksiyonları ve grid haritaları kullanılarak bilinmeyen bir ortamın gaz yoğunluğu haritası elde edilmiştir [68]. Koku kaynağının konumlandırılması probleminde bu çalışmaların yanı sıra da başka bir çalışmada gezgin sürü robotları da kullanılmıştır [61,62]. Fakat yukarıda bahsedilen çalışmaların çoğu kimyasal gaz yoğunluğunun sabit olduğu ortamlarda daha uygundur çünkü çoğu çalışmada arama tek bir robotla gerçekleştirilmiştir ve dinamik bir ortamda birden fazla gaz kaynağını bulmak için önerilen yöntemlerin uygulama sırasında zorluklar ile karşılaşacaktır.

Bir ortamda bulunan gazın yoğunluğunun haritalanması önemli bir problemdir. Bina yangınlarında veya radyoaktif veya kimyasal sızıntı olan afet bölgelerinde karşımıza çıkabilmektedir. Gaz yoğunluğunun bilinmesi yangının veya gaz kaçağının olduğu bölgenin konumunu tahmin edilmesinin yanı sıra karar almada da yardımcı olacak bilgidir. Bu tür bölgelere genelde insanların girmesi sağlıkları açısından sakıncalı olabileceğinden robotların kullanılması daha uygun gözükmektedir. Bu alanda literatürde çeşitli çalışmalar vardır [57,58,60–64]. Yapılan çalışmaların büyük bölümü benzetim ortamında veya tek robotlu ve önceden belirlenmiş seyrüsefer algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir [60–64]. Gerçek gaz ve gerçek robotlar ile biyolojik eniyileme yöntemi kullanan çalışmalar da olmuştur [57,58]. Bu çalışmalardan [57]’te Parçacık Sürü Eniyileme yöntemi kullanılırken, [58]’te ise Bakteri Beslenmesi Tabanlı Eniyileme yöntemi kullanılmıştır.

Parçacık sürü eniyileme yöntemi Eberhart ve Kennedy tarafından 1995’te doğrusal olmayan sürekli fonksiyonu eniyilemede ilk defa kullanılmıştır [69]. Daha sonra, Marques ve çalışma arkadaşları [70,71] tarafından PSO yöntemi çoklu robotlar ile koku kaynağının aranması problemine uyarlanmıştır, yöntemin büyük ve bilinmeyen bir alanda koku kaynaklarını tespiti için hem teorik hem de deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmalara ek olarak PSO yöntemi ile başka eğitim tabanlı arama yöntemlerinin de arama performansları karşılaştırılmıştır. Hereford çalışmasında Parçacık Sürü Eniyileme yöntemin çok erkinli arama uygulamalarında uyarlanmıştır ve [72,73] PSO’nun Dağıtık PSO [74] adlı ve Fiziksel-Gömülü PSO [75] adlı farklı çeşitlerini ortaya sunmuştur. Yapılan çalışma yöntemin çoklu robot sistemlerinde ölçeklenebilirliği ve robotlar arasında iletişim yükünün azaltılmasında odaklanmıştır. Diğer bir çalışmada Pugh ve Martinoli [72] PSO yöntemin uyarlamada iki farklı yaklaşım kullanmışlardır, PSO yöntemi çoklu robot arama sistemine uyarlanması

ve çoklu robot sistemin PSO arama yöntemine uyarlanmasını sağlamışlardır. Aynı zamanda Jatmiko [59] tarafından geliştirilen uyarlamada ise koku aramada dış etkenlerin de göz önünde bulundurulduğu bir deneysel çalışma yapılmıştır. Dağıtık PSO yöntemi başka bir çalışmada [73] bakteri beslenmesi tabanlı arama yöntemi ile beraber kullanılarak robotların konum güncellenmesinde kullanılmıştır. Robotların konum güncellenmesi dağıtık PSO kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Doctor ve çalışma arkadaşları birden fazla hedefin çoklu robot sistemi ile aranmasında PSO yöntemi kullanmışlardır [76]. Yapılan çalışmadan yöntemin performansını etkileyen parametrelerini eniyilemek üzerinde odaklanmışlardır.

Yapılan bir diğer çalışmada ise Kevin M. Passino tarafından geliştirilen Bakteri Beslenmesi Eniyileme yöntemi kullanılmıştır [77]. Bakteri Beslenmesi Eniyileme yönteminin ana özelliği doğada fazla sayıda bulunan *E.coli* adlı bakterinin besin bakımından zengin bölgeleri aramak için gerçekleştirdiği kemotaktik davranışı taklit etmesidir [77–80]. *E.coli* bakterisi kemotaksi adı verilen ve bazı özel kimyasal maddelere yönelme ya da tam tersine onlardan uzaklaşma şeklinde olabilen bir davranış ile ortamda besin maddesi arar. Bu davranış bakterilerin besin kaynaklarını bulmakta ve ortamdaki zehirli maddelerden kaçarken kullandıkları temel davranış biçimidir. Bakteri Beslenmesi Eniyileme yöntemi bir çok çoklu gezgin robot uygulamalarında kullanılmıştır. Örneğin, Tang ve meslektaşları [82] parçacıklar arası çekim özelliğinden esinlenerek Bakteri Beslenmesi Eniyileme yönteminin arama performansını arttırmak için yöntemin farklı Hücre-Hücre Çekimli Bakteri Beslenmesi Tabanlı Eniyileme adlı versiyonun ortaya sunmuştur. Dhariwal çalışmasında [81] gaz ile kirlenmiş bir ortamı gözlemlemek için çoklu robotlar üzerinde bakteri sürüsünün kemotaktik davranışını kullanmıştır. Geliştirilen yöntem önyargılı rastgele arama ve gaz yoğunluğunun eğiminin değişimini esas alarak karar mekanizmasından oluşmaktadır. Ayrıca çalışmada ışık tabanlı arama küçük robotlar kullanılarak yapılmıştır. Benzer biçimde Oyekan ve arkadaşları [65] bakteri davranışlarından esinlenerek bilinmeyen bir ortamda koku kaynağının tespiti için bir denetleyici tasarlamışlardır. Geliştirilen denetleyici bakterilerin kemotaktik davranışı ve sürü davranışının birleşimidir. Denetleyici robot sürüsünün kaynağa doğru gitmesini ve kaynak tespiti için geliştirilen denetleyicisinin parametrelerinin değiştirerek robotların verimli biçimde arama alanına dağılmasını sağlar. Ancak, bu alanda çalışan uzmanlara göre geliştirilen denetleyicinin dinamik ortamda yeterli verimi alamayacağı öngörülmektedir.

En son olarak uygulanan Karınca Kolonisi Eniyileme algoritması doğada yaşayan

karıncaların sosyal davranışları ve besin arama hareketlerinden esinlenilerek geliştirilmiş biyolojik tabanlı algoritmadır [54]. Doğal ortamda karınca kolonisi yaşama şansını arttırmak, türün devamlılığını sürdürmek ve karşılaşılan problemleri hızlı ve etkin biçimde çözmek için koloni üyeleri arasında belirli bir hiyerarşi ve iş bölümü var olacak şekilde evrimleşmiştir. Bu hiyerarşi genel olarak üremeyi sağlayan kraliçe, yuvayı koruyan asker, besin aramakla görevli öncü ve besin taşımakla görevli işçi karıncalardan oluşmaktadır [55]. Besin arama sırasında karıncalar arasında iletişim dolaylı biçimde gezdikleri güzergah üzerine bıraktıkları feromon adı verilen uçucu kimyasal madde sayesinde sağladığı gözlemlenmiştir.<sup>2</sup> Karınca Kolonisi Eniyileme algoritması 1992’de Dorigo tarafından geliştirildiğinden bu yana farklı disiplinlerarası gezgin satıcı probleminin çözümü, görev çizelgelemesi, makina öğrenmesi problemleri ve güzergah planlama uygulamalarında kullanılmıştır [56].

Karınca Kolonisi Eniyileme algoritması kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda [63, 64] bilinen bir ortamda varolan gaz yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde varolduğu düşünülen kaynakların bulunmasını amaçlayan uygulamalar robotlar arasında yoğunluk ölçümleri ve iletişim hatalarının olmadığını varsayarak pürüzsüz grafiğe sahip olan fonksiyon kullanılarak benzetim ortamında gerçekleştirmişlerdir.

Bu tez biyolojik tabanlı eniyileme yöntemleri kullanarak çoklu robotlar ile bilinmeyen bir ortamın gerçek zamanlı kimyasal gaz yoğunluğunun haritalanması üzerinde odaklanmıştır. Dağıtık ve Eşzamansız Parçacık Sürü Eniyileme yöntemi, Bakteri Beslenmesi Tabanlı Eniyileme yöntemi, ve Karınca Kolonisi Tabanlı Eniyileme yöntemli çoklu robot aramasında kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasının robotik, kimyasal gaz yoğunluğu haritalaması ve kaynak tespiti alanında bulunan başka çalışmalardan önemli farkları vardır. İlk olarak, robotlar gerçek kimyasal (etanol gazı) bir ortamda arama yapmaktadırlar. Önceden bahsedilen çalışmalarda robotlar pürüzsüz deneysel olmayan veriler üzerinde [71, 84] veya önceden toplanmış ve işlenmiş veriler üzerinde arama yapmaktadırlar [71, 84]. Ayrıca kimyasal bir ortamdan farklı olan farklı ışıklandırma kullanılan ve ışık kaynağını bulma görevini içeren çalışmalarda yapılmıştır (örneğin [65] ve [81]). Bu tez çalışmasında ise kullanılan robotlar kimyasal algılayıcı ile donatılmıştır halbuki literatürdeki çalışmalarda [72, 74, 76] robotlar üzerinde kimyasal algılayıcıların var olduğu varsayılmıştır ve çalışmalar çoğunlukla benzetim ortamında gerçekleşmiştir. Dahası gaz yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerin tespitine ek olarak ortamı kirleten

<sup>2</sup>Bu tür dolaylı iletişim ingilizcede stigmergy denir.

kimyasal gazın 3 boyutlu haritası gerçek zamanlı elde edilmiştir ve elde edilen harita kumanda merkezinde görüntülenmiştir.



## BÖLÜM 2

### 2. PROBLEM TANIMI VE DENEYSEL DÜZENEK

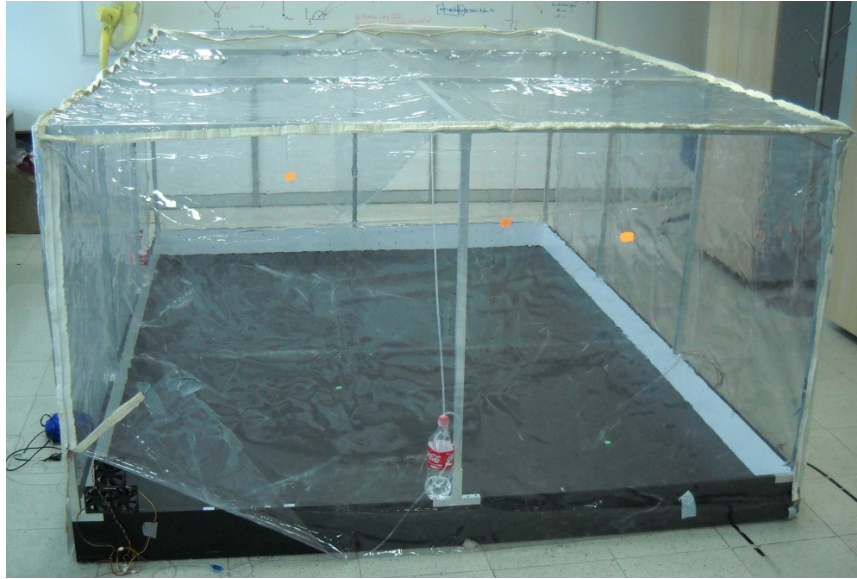
#### 2.1. Problem Tanımı

İnsan sağlığına olumsuz yönde etki eden kimyasal maddeler barındıran herhangi bir ortamda arama işlemleri için özerk gezgin robotları kullanmak mümkündür. Birden fazla robotun yardımlaşmalı olarak görev yapması performans açısından kazanımlar sağlayacaktır. Kimyasal gaz yoğunluk haritasının bilinmesi bir uzman açısından hayati öneme sahiptir çünkü önemli kararlar alınmasına ve bu şekilde insan hayatları kurtarılmasına/korunmasına veya maddi zararların önlenmesine yardımcı olabilir. Arama ve haritalandırma sürecinde ortamda bulunan kimyasal bileşikler belirlenebilir ve yüksek yoğunluğa sahip bölgelerden faydalanarak çevreyi kirleten sızıntı kaynağının konum bilgisi elde edilebilir. Uygulama alanı olarak farklı kimyasal maddeleri barındıran bina yangınlarındaki tehlike seviyesi örnek gösterilebilir. Kimyasal maddelerin alev alması daha büyük yangınlara ve patlamalara neden olabilir. Bu gibi durumlarda yanan maddenin cinsini veya kimyasal maddenin yoğunluğunun tehlikeli (mesela patlamaya neden olabilecek) boyutlarda olup olmadığını belirlemek için gezgin robotlar tarafından elde edilen veriler itfaiye görevlilerinin kendi hayatlarını tehlikeye atmaksızın kritik kararlar almasına yardımcı olabilir. Bunları göz önünde bulundurarak bu tezde ele alınan problem şu şekilde ifade edilebilir: birden fazla gezgin robot yardımlaşmalı olarak kimyasal gaz bulunan bir ortamın gaz yoğunluk haritasını çıkarmalıdır. Arama görevini yerine getirmek için robotlar kendi aralarında algılayıcı verilerini ve ihtiyaç duyulan diğer bilgileri paylaşmalı ve kablosuz ağ üzerinden kumanda merkezine göndermelidirler. Kumanda merkezine gelen veriler işlenerek istenilen görsel bilgiler ve kimyasal gazın üç boyutlu yoğunluk haritası gerçek zamanlı olarak operatöre sağlanmalıdır. Belirlenen görevin içeriğine göre bilinmeyen ortamın kimyasal gaz yoğunluğunu haritalanması sırasında özerk gezgin robotların güzergahlarının planlanması ve gaz yoğunluğunun en yüksek veya en düşük noktalarına hareket etmesi Eşzamansız Parçacık Sürü Eniyileme, Bakteri Beslenmesi Tabanlı Eniyileme ve Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı Eniyileme yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir.

## 2.2. Deneysel Düzenek

### 2.2.1. Laboratuvar Ortamı ve Robotlar

Bu bölümde uygulama düzeneği ve kullanılan robotların özellikleri hakkında  zet bilgiler verilecektir. Uygulamada Coimbra  niversitesinde geliştirilmiş *KheNose* donanımı ( Şekil 2.2.(b)'de g r ld ği gibi) ve üzerine takılan Figaro firması tarafından üretilen TGS2620 alkol algılayıcısı ile donatılmış Khepera III gezgin robotları kullanılmıştır. Deney düzeneği ( Şekil 2.1.'de g r ld ği gibi) 3.40m x 2.40m x 1.35m boyutlarında engelsiz alandır. Algılayıcılar, *KheNose* arayüz kartı kullanılarak robotlar üzerine monte edilmiştir. Sonraki bölümde algılayıcı hakkında daha detaylı açıklamalara yer verilecektir. Kullanılan kimyasal gazı uygulama alanında hapsetmek için düzenek Őeffaf plastik örtü ile kaplanmıştır. Deneyde kimyasal gaz olarak uçucu, renksiz sıvı etanol kullanılmıştır. Sıvı etanol ile doldurulan 2 plastik tüpe hava pompalanmış ve bu sayede buharlaşan etanolun uygulama alanına gönderilmesi sağlanmıştır. Bu uygulamada Şekil 2.2.'de

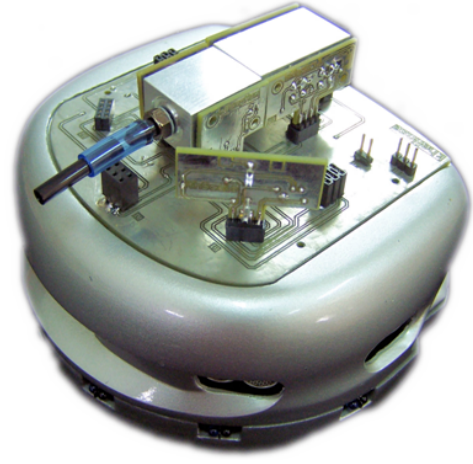


Şekil 2.1. Kapalı deneysel düzenek.

görünen Khepera III gezgin robotlar kullanılmıştır. Robotlar  zerinde 400 MHz hızında  alışan Intel PXA255 işlemcisi yer almaktadır. Robota hareket kabiliyetini sağlayan 2 adet fırçalı DC servo motor bulunmaktadır. Robot üzerinde 11 adet kızıl ötesi ve 5 adet ses ötesi algılayıcı bulunmaktadır. Kızıl  tesi algılayıcılar robotun yan yüzeyinde 9 adet ve alt yüzeyinde 2 adet olacak Şekilde konumlandırılmıştır.



(a) Khepera III Gezgin Robotları.



(b) Khepera III ve KheNose.

Şekil 2.2.: KheNose algılayıcı sistemi ve 3DM GX2 Microstrain IMU ile donatılmış Khepera III gezgin robotlar.

Motorlar *PIC16F4431* mikrodenetleyicisinin üzerinde çalışan PID denetleyici ile denetlenmektedir. Bu mikrodenetleyiciler Kör Konumlandırma<sup>1</sup> ölçüm bilgilerini almak için de kullanılmaktadır. Motor kontrol blokları *I<sup>2</sup>C* haberleşme hattına bağlı elemanlar olarak çalışmaktadırlar. Algılayıcılardan gerekli ölçümlerin alınması için ise 60 MHz'de çalışan bir adet *DSPIC30F6011* mikrodenetleyicisi bulunmaktadır. Ana işlemci ile mikrodenetleyiciler arasındaki iletişim *I<sup>2</sup>C* haberleşme hattı üzerinden gerçekleşmektedir. Robotların konumlandırma verilerini düzeltilmesi için Şekil 2.2.(a)'da gösterilen MicroStrain şirketi tarafından üretilen Ataletsel Ölçüm Birimi<sup>2</sup> kullanılmıştır. Yönelim hataları kör konumlandırma sistemlerinde zaman içinde büyük konumlanma hatalarına yol açmaktadır. Sıklıkla görülen bu tür hataların oranını azaltmak ve kör konumlandırma güvenilirliğini iyileştirmek amacıyla Khepera III gezgin robotlar üzerine ataletsel ölçüm birimi yerleştirilmiştir. İyileştirilmiş yönelim hataları oranı konumlandırma tutarlılığıyla ters orantılıdır. Ataletsel Ölçüm Birimi verilerinin kör konumlandırma yöntemine entegre etmek için *Eşik değeri* yöntemi kullanılmıştır. Robotun yönelimindeki değişim önceden belirlenmiş eşik değerinin üstünde ise ataletsel ölçüm birimi verileri açısız dönüş hızını belirlemekte kullanılmıştır, tersi durumda ise kör konumlandırma verileri kullanılmıştır. Robotların gezinme ve engelden kaçınma davranışları ve robotların alt seviye denetimi için yapay potansiyel fonksiyonlar kullanılmıştır. Bu amaçla robotun ulaşacağı bir

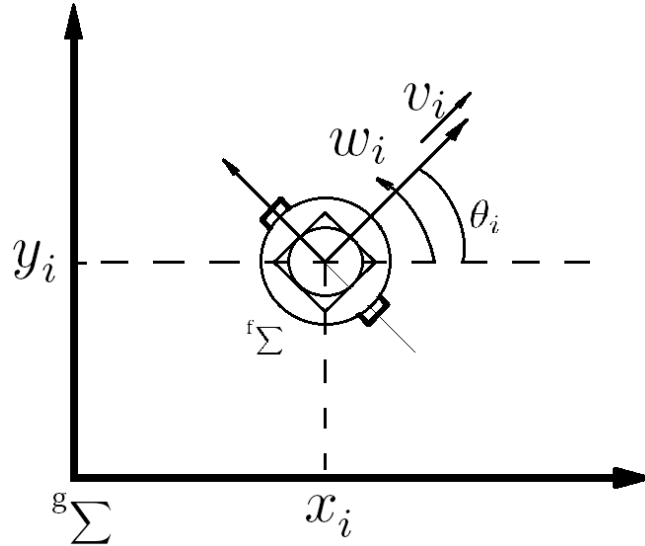
<sup>1</sup>ing: Odometry

<sup>2</sup>ing: IMU (Inertial Measurement Unit)

sonraki noktalar için karesel çekim potansiyel fonksiyonu kullanılmış ve robotun bu fonksiyonun eğiminin negatif yönüne doğru hareket etmesi sağlanmıştır. Robotlar arasında mesafe önceden belirlenmiş bir sabit değerden küçük olduğunda olası çarpışmaları engellemek için potansiyel itim fonksiyonu kullanılmıştır. Potansiyel itim kuvvetleri kızıl ötesi algılayıcılardan elde edilen veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Robotların kızıl ötesi algılayıcılarından alınan veriler gürültülü olduğundan dolayı potansiyel itim fonksiyonuna ek olarak öncelik tabanlı engellerden kaçınma yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde iki robot karşılaştığında kimlik numarası daha küçük olan robot hareketini durdurarak kimlik numarası daha büyük olan robotun kendisinin etrafında dolaşarak çarpışmadan kaçınması beklenmektedir ve çarpışma durumundan kurtulduktan sonra yoluna devam etmektedir.

### 2.2.2. Yapay Potansiyel Fonksiyonlar ve Robot Denetimi

Bu çalışmada kullanılan iki boyutta hareket edebilen ve hareket dinamikleri Denklem 2.1'de gösterilen hız kısıtlı gezgin robotlar kullanılmıştır. Hız kısıtlı erkinler düzlemdeki bir konumda herhangi bir yönelimde bulunabilir ancak hız vektörü iki ana tekerleğin ortasındaki bağlayan eksene her zaman diktir (bakınız Şekil 2.3.). Deneysel uygulamalarda biyolojik tabanlı arama yöntemlerinde sistemdeki  $i$ 'inci robot



Şekil 2.3. Hız-kısıtlı robot yapısı.

arama görevi olan erkin sürüsündeki  $i$ 'inci erkin olarak düşünülebilir. Sürekli zamanda

$\mathbb{R}^2$  alanında hareket eden her  $i = 1, \dots, N$  hız kısıtlı robotun dinamikleri

$$\begin{aligned}\dot{x}_i(t) &= v_i(t) \cos(\theta_i(t)), \\ \dot{y}_i(t) &= v_i(t) \sin(\theta_i(t)), \\ \dot{\theta}_i(t) &= w_i(t)\end{aligned}\tag{2.1}$$

Denklem 2.1’de  $P_i(t) = [x_i(t), y_i(t)]$   $i$ ’nci robotun  $t$  zamanındaki konum vektörünü,  $\theta_i(t)$  ise yönelim açısını göstermektedir.  $v_i(t)$  doğrusal hız girdisini,  $w_i(t)$  ise açısız hız girdisini göstermektedir.

Robotun  $t_k$  zamanındaki  $k$ ’inci ara noktası (bulduğu konum)  $p_i(t_k) = [x_i(t_k), y_i(t_k)] \in \mathbb{R}^2$  olsun; bu durumda biyolojik tabanlı yöntemleri bir sonraki ara noktanın  $p_i(t_{k+1})$  bulunması için kullanılmaktadır. Örneğin Eşzamansız PSO yöntemi üst seviyede robotların gidecekleri yolların planlanmasını, robotun arama boyunca gitmesi gereken ara noktaların belirlenmesi, için kullanılmaktadır. Robotun  $k$ ’inci ara nokta olan  $p_i(t_k)$ ’dan  $k + 1$ ’inci ara nokta olan  $p_i(t_{k+1})$ ’e gitmesi için yapay potansiyel fonksiyonlar alt seviye denetleme algoritması olarak kullanılmıştır. Yapay potansiyel fonksiyonlar kullanılarak robotlara etkin gezinim sağlandığı birçok çalışma bulunmaktadır [30–32]. Robotun takip etmesi istenen yol, iki ara noktayı birleştiren bir doğru olarak tanımlanmış ve robotun  $\bar{p}(t_k) = p_i(t_k) - p_i(t_{k+1})$  vektörü doğrultusunda engellerden sakınarak  $p_i(t_{k+1})$  ara noktasına doğru hareket ettirilmiştir. Bu amaçla karesel bir çekim potansiyel fonksiyonu tanımlanmış ve robotun fonksiyonun eğiminin azaldığı yöne doğru hareket etmesi sağlanmıştır. Robotlar arasındaki çarpışmaları engellemek için robotlar arasında bir itim potansiyel fonksiyonu kullanılmış ve bu fonksiyon iki robot arasındaki mesafenin  $D$  gibi önceden belirlenmiş bir mesafeden daha az olduğu durumlarda göz önünde bulundurulmuştur.

$G_{çekim}^i(t)$ ,  $t \in [t_k, t_{k+1})$  zamanında çekim potansiyel fonksiyonunun eğimini,  $G_{itim}^{ij}(t)$  ise  $i$  robotunun yakınında bulunan  $j$ ’nci robot ile arasındaki itim potansiyel fonksiyonunun eğimini gösterir. Bu çalışmada potansiyel alan olan itim ve çekim potansiyel fonksiyonlarının eğimini aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır

$$G_{çekim}^i(t) = -a\bar{p}_i(t),$$

ve

$$G_{itim}^{ij}(t) = \begin{cases} b\bar{p}_{ij}(t) \left( \frac{1}{\|\bar{p}_{ij}(t)\|^2} - \frac{D}{\|\bar{p}_{ij}(t)\|^3} \right), & \|\bar{p}_{ij}(t)\| \leq D \\ 0, & \|\bar{p}_{ij}(t)\| > D \end{cases}$$

Burada  $\bar{p}_i(t) = (p_i(t) - p_i(t_{k+1}))$  ve  $\bar{p}_{ij}(t) = (p_i(t) - p_j(t))$  olmaktadır. Robotun  $t \in [t_k, t_{k+1})$  zaman aralığındaki konumu  $p_i(t)$ , robotun arama alanındaki bir sonraki ara noktası  $p_i(t_{k+1})$  olarak gösterilmiştir. Sabit  $a > 0$  katsayısı çekim katsayısı,  $b > 0$  katsayısı ise itim katsayısı olarak alınmıştır. Bu tasarımda robotun gideceği ara noktalar arasında doğrusal bir çekim kuvveti varken,  $i$ 'inci robotun yakınlığında  $D$  mesafesinden daha yakın bir mesafede bulunan  $j$ 'nci robotunun olduğu durumlarda etkin olan doğrusal olmayan ve mesafe azalınca sınırsız artan bir itim kuvveti vardır. Belirtilen potansiyel kuvvetler hesaplanırken robotların yerel koordinat sistemleri dikkate alınmıştır.

Yukarıdaki belirtilen itim ve çekim potansiyel kuvvetleri kullanılarak, toplam potansiyel kuvvet (potansiyel alan)  $G^i(t)$ 'nin değeri

$$G^i(t) = G_{cekim}^i(t) + \sum_{j=1}^N G_{itim}^{ij}(t) \quad (2.2)$$

gibi hesaplanabilir. Denklem (2.2)'de  $i$ 'inci robot üzerindeki itim potansiyel kuvvetinin sistemdeki bütün robotlar tarafından oluşturduğu gösterilmesine karşın,  $G^i(t)$  toplam potansiyel kuvveti hesaplanırken sadece  $i$ 'inci robotun yakınlığındaki robotlar dikkate alınmaktadır.

Sistemdeki robotların hız kısıtlı olması nedeniyle ve o andaki yönlerinin potansiyel vektör yönünde olmaması olasılığına karşın robotların istenen hareket yönü

$$\theta_d^i(t) = \text{atan2}\left(G_y^i(t), G_x^i(t)\right), t \in [t_k, t_{k+1}), \quad (2.3)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada  $G_x^i(t)$  ve  $G_y^i(t)$  sırasıyla potansiyel alanın  $x$  ve  $y$  bileşenleri olarak tanımlanmıştır

Robotun üzerindeki potansiyel kuvvetler yerel koordinatlar göz önüne alınarak hesaplanmasına karşın, robotun evrensel koordinatlardaki çekim açısı göz önünde bulundurulmuştur. Bu durumda  $i$ 'inci robotun arama alanındaki evrensel koordinatlara göre gitmesi için gereken yönelim açısı

$$\theta_{ida}(t) = \text{atan2}\left(G_{cekimY}^i(t), G_{cekimX}^i(t)\right), t \in [t_k, t_{k+1}),$$

olarak hesaplanır. Burada  $G_{cekimX}^i(t)$  ve  $G_{cekimY}^i(t)$  sırasıyla çekim potansiyel alanın  $x$  ve  $y$  bileşenleri olarak tanımlanmıştır. Robotun yerel koordinatlarına göre arama

alanındaki belirli bir konuma olan çekim açısı

$$\theta_{rel}(t) = \text{mod}\left[\left((\theta_{ida}(t) - \theta_i(t)) + \pi\right), 2\pi\right] - \pi, t \in [t_k, t_{k+1}),$$

olarak hesaplanabilir. Burada  $\theta_i(t)$   $i$ 'inci robotun  $t$  anındaki yönelimini,  $\theta_{ida}(t)$  ise robotun  $t$  anında bütünsel koordinatlarda arama alanındaki belirli bir konuma olan çekim açısını göstermektedir. Bu çalışmada ele alınan açılar  $(-\pi, \pi]$  aralığında değer aldıkları kabul edilmiştir. Bu nedenden dolayı açılar arasındaki toplama veya çıkarma işlemleri mod  $2\pi$  olarak ve açı farklarının  $(-\pi, \pi]$  aralığında olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu işlem ayrıca iki vektör arasındaki küçük açıyı vermektedir. Gerektiği durumlarda robotun üzerindeki itim kuvveti hesaplanırken robotun üzerindeki algılayıcı değerleri dikkate alınmıştır ve kuvvetin  $x$  ve  $y$  bileşenleri hesaplanırken algılayıcıların robottaki konumlarına göre açıları belirlenmiştir. Bu açılar robotun yerel koordinatlarında belirlendiği için herhangi bir çevrim işlemi yapılmamaktadır.

Robotun yön dinamiklerinin denetlenmesi için

$$w_i(t) = -\alpha \left( \text{mod}((\theta_i(t) - \theta_{id}(t)) + \pi, 2\pi) - \pi \right), t \in [t_k, t_{k+1}), \quad (2.4)$$

gibi basit bir oransal denetleyici tasarlanmıştır. Burada  $\theta_i(t)$   $t$  zamanında robotun yönü ve  $\alpha > 0$  oransal denetleyicinin kazanç katsayısı olarak alınmıştır. Daha önceden de belirtildiği gibi iki vektör arasındaki küçük açıyı belirlemek için toplama veya çıkarma işlemleri mod  $2\pi$  olarak gerçekleştirilmiştir. Doğrusal hızın denetlenmesi için ise

$$\bar{v}_i(t) = \min\{\|G_i(t)\|, v_{enyukseke}\}, t \in [t_k, t_{k+1}), \quad (2.5)$$

şeklinde bir denetleyici kullanılmıştır. Burada  $v_{enyukseke}$  robotun doğrusal hızının üst sınırı olarak belirlenmiştir.

Yapılan uygulamalar sırasında robotlar algılayıcı verilerini ve konum bilgilerini *TCP/IP* protokolü üzerinden kablosuz *tasarsız*<sup>3</sup> ağı aracılığıyla kendi aralarında ve kumanda merkezi ile paylaşmaktadırlar. Belirlenen ilk iki adımdan sonra robotlar güzergah belirleme ve bir sonraki hareket noktalarını belirlemede kendilerinin ve ortamdaki diğer robotların algılayıcı verileri ve edindikleri diğer bilgileri biyolojik tabanlı eniyileme yöntemlerin yardımı ile belirlemişlerdir. Kumanda merkezinde robotlardan elde edilen veriler MATLAB ve *Golden Surfer9* yazılımının deneme

---

<sup>3</sup>ing: Ad-hoc

sürümü ile işlenerek kimyasal gaz yoğunluğunun gerçek zamanlı 3 boyutlu haritası çıkarılmıştır.

### 2.2.3. Kimyasal Algılayıcılar ve KheNose

*KheNose*, arayüz kartı ve işlem yeteneğine sahip anakart, sıcaklık ve nem algılayıcıları ile donatılmış koku delikleri dizisi ve üç adet ısı yelölçer kartları üzerinde taşımaktadır. Algılayıcı kartları *EEPROM* belleklerinde Dönüştürücü Elektronik Veri Fişi<sup>4</sup> içermektedir [85]. Bu dönüştürücüler ile ilgili çeşit, (kullanılan) hedef gaz, alt-üst sınır ve kalibrasyon verilerini içermektedir. Anakart algılayıcılardan elde ettiği dijital ve analog verileri *Microchip dsPIC33F* denetleyici yardımı ile işleyip *I<sup>2</sup>C* arabirimi ile Khepera III ana işlemcisinin bulunduğu KoreBot kartına gönderir. Kullanılan sistemin yapısı *IEEE1451.4 akıllı* algılayıcı standartlarından esinlenmiştir. Sistem koku pusulası gibi davranışı göstererek kokunun yönü ve hava akımının şiddeti belirlemek yeteneklerine sahip olacak şekilde donatılmıştır. Kokuyu ayırt etme işleminde ileri beslemeli yapay sinir ağları kullanılmıştır. Bu çalışmada bu özelliklerin tamamı kullanılmamıştır. Sadece donanımına takılan Figaro TGS2620 alkol algılayıcılardan ölçülen veriler kullanılmıştır. Her algılayıcının kendine has özelliği olabileceğinden ve aynı ortamda farklı algılayıcılar farklı ölçümler yapabileceğinden sistemin kalibre edilmesi gerekmektedir.

Kalay oksit gaz sensörünün iletkenliği  $G$  ile ortamda var olan azalan gaz konsantrasyonu  $C$  arasındaki ilişki

$$G = G_1 P_R^n \quad (2.6)$$

denklemden gösterildiği gibidir [86]. Denklem (2.6)'da yer alan  $G_1$  değeri azalan gazın  $C_1$  düşük yoğunluğa denk gelen iletken değeridir.  $P_R$  değeri gazın göreceli yoğunluğunu göstermektedir ve  $P_R = C/C_1$  denklemi ile hesaplanmıştır ve  $n$  sabiti gaz ve algılayıcının özelliklerine bağlı olarak belirlenen bir parametredir.

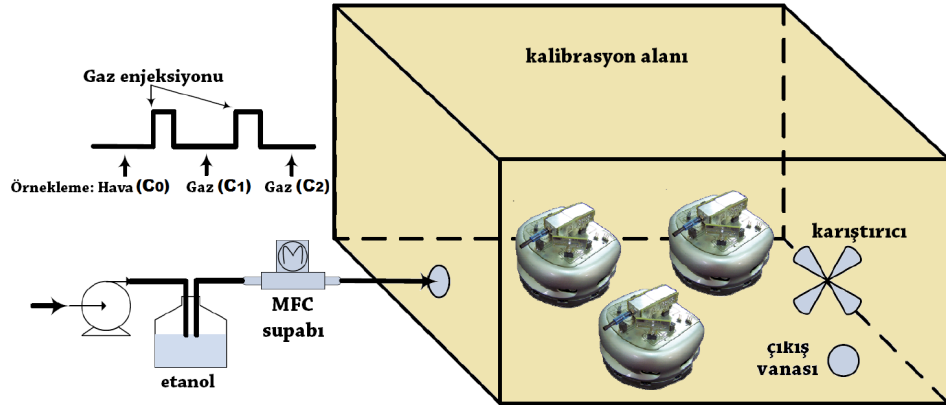
Çoklu robot sistemlerinin kullanıldığı gaz algılayıcısı kullanılan deneylerde algılayıcıların aynı standart değerlere göre kalibre edilmesi, algılayıcılardan ölçülen değerlerin aynı haritada birleştirilmesi için esastır. Bu deneyde her KheNose için tek metal oksit gaz algılayıcısı kullanıma sunulmuştur ve aşağıda belirtilen hızlı kalibrasyon yöntemi uygulanmıştır.

<sup>4</sup>ing: TEDS (Transducer Electronic Data Sheet)



1. Uygulamaya sunulan bütün sistemler ortamdaki yalıtılmış ve ortama sabit miktarda, Etanol buharı eklenmiştir.
2. Havanın iletimini belirten değeri için  $G_{hava}$  değişkeni kullanılmıştır.
3. Düşük miktarda Etanol buharı uygulama alanına gönderilmiş, algılayıcılar kararlı duruma geldikten sonra, havada var olan gaz yoğunluğunu belirten  $C_1$  değeri  $G_1$  değişkenine atanmıştır.
4. Aynı miktarda Etanol gazı uygulama düzeneğine tekrar eklenmiş ve  $G_2$  değerine karşılık gelen değer  $C_2 = 2C_1$  olarak atanmıştır.

Kimyasal algılayıcılarının kalibrasyonu için Şekil 2.4.'te görüldüğü gibi sabit miktarda etanol buharı kalibrasyon ortamına pompa ile ya da Kütle Akış Denetleyicisi ile gönderilir. Şekil 2.4.'te robotlar akrilik cam kalibrasyon kutusu içindedir ve ortamı homojenleştirmek amacıyla fan kullanılmıştır.



Şekil 2.4. Kalibrasyon düzeneği.

Son adım olarak,  $n$  sabiti algılayıcıların her biri için belirlenmiştir. İşlem sırasında  $C_1$  değerinden yüksek yoğunluk değerleri için Denklem (2.6)'da işleme sunulmuş, düşük yoğunluk değerleri için hava çıkışı ve  $C_1$  değeri girdilerinin doğrusal ara değerlendirme kestirimi kullanılmıştır.

## BÖLÜM 3

### 3. EŞZAMANSIZ VE DAĞINIK PARÇACIK ENİYİLEME YÖNTEMİ İLE ORTAMIN KİMYASAL GAZ YOĞUNLUĞU HARİTALANMASI

#### 3.1. Temel Parçacık Sürü Eniyileme Yöntemi

Parçacık sürü eniyileme yöntemi (PSO) Kennedy ve Eberhart tarafından 1995 yılında [33, 69] çalışmalarında geliştirilmiş bir hesaplama ve arama yöntemidir. Parçacık sürü eniyileme yöntemi topluluk tabanlı<sup>1</sup> bir yöntem olup parçacık adı verilen rasgele çözüm kümeleri ile ilklendirilir. Yöntem doğrudan bir arama yöntemidir<sup>2</sup>, arama sırasındaki eğitim bilgisi doğrudan kullanılmamaktadır ve yinelemeler boyunca sürüdeki parçacıklar paralel olarak arama yapmaktadırlar. Parçacıkların arama uzayında hareket etmeleri için belirli hızları vardır ve parçacıkların hızları arama sırasındaki davranışlarına göre dinamik olarak değişmektedir. Böylece parçacıklar arama yapılan uzayda istenilen en iyi noktalara ulaşmaktadır.

Parçacık sürü eniyileme yönteminin temel biçimi basitleştirilmiş toplumsal model benzetimlerinde ortaya çıkmıştır. Yöntem, kuş ve balık sürülerinin toplumsal davranışlarından ve sürü teorisinden<sup>3</sup> esinlenerek geliştirilmiştir. Yöntem ilk olarak belirli bir alanda besin bulmaya çalışan kuş sürüsünün davranışının benzetimi için kullanılmıştır. Tek bir kuş çevresindeki diğer kuşlar (komşuları) ile toplumsal işbirliği yaparak alandaki besini bulabilmektedir. Sonraki çalışmalarda yöntem çok boyutlu uzaylarda eniyileme probleminde kullanılmış ve parçacıkların bir komşuluk yapısında yer aldığı düşünülmüştür. Çok boyutlu bir uzayda  $f(x), x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  gibi bir uyumluluk fonksiyonu ele alınmıştır ve parçacıkların uzayda arama yaparak belirlenen fonksiyonun bütünsel minimum veya bütünsel maksimum noktasının bulunması amaçlanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda temel parçacık sürü eniyileme algoritması her  $i = 1, \dots, N$  parçacığı için

$$\begin{aligned} v_i(t+1) &= v_i(t) + \varphi_1^i(t) \left( b_i(t) - p_i(t) \right) + \varphi_2^i(t) \left( g_i(t) - p_i(t) \right) \\ p_i(t+1) &= p_i(t) + v_i(t+1) \end{aligned} \quad (3.1)$$

şeklindeki denklem takımı olarak belirlenmiştir [33, 69]. Burada  $p_i(t) \in \mathbb{R}^n$

<sup>1</sup>ing: Population based

<sup>2</sup>ing: Direct search method

<sup>3</sup>ing: Swarm theory

$i$ 'inci parçacığın  $t$  zamanında uzaydaki konumunu (parçacığın eniyilenmekte olan fonksiyonun en küçük/en büyük noktası hakkında  $t$  zamanındaki tahmini),  $b_i(t) \in \mathbb{R}^n$   $i$ 'inci parçacığın  $t$  zamanına kadar elde ettiği en iyi konumunu bir başka deyişle  $t$  zamanına kadar elde ettiği en iyi fonksiyon değerine karşılık gelen konumu,  $g_i(t) \in \mathbb{R}^n$   $i$ 'inci parçacığın komşularının  $t$  zamanına kadar elde ettiği en iyi konumu bir başka deyişle parçacığın komşularının  $t$  zamanına kadar elde ettiği en iyi fonksiyon değerine karşılık gelen konumu belirtmektedir (bakınız Çizelge 3.1.). Parçacık arama sırasında hızını o andaki hızını, o andaki konumunu, o ana kadar elde ettiği en iyi konumunu ve komşularının o ana kadar elde ettiği en iyi konumu kullanarak dinamik olarak belirlemektedir. Öğrenme katsayıları olan  $\varphi_1^i(t) \in [0, \bar{\varphi}_1]^n$  ve  $\varphi_2^i(t_k) \in [0, \bar{\varphi}_2]^n$  düzgün dağılımlı  $n$  boyutlu rastgele vektörlerdir. Bu rastgele vektörler döngüdeki bilişsel<sup>4</sup> ve toplumsal/sosyal bileşenlerin görelî önemlerini/ağırlıklarını belirlemektedir. (Çizelge 3.1.'de parçacıkların bütünsel bir komşuluk yapısında bulunduğu kabul edilmiştir.)

Çizelge 3.1. Temel Parçacık Sürü Eniyileme Yönteminin Sözde Kodu.

Her  $i$  parçacığı için konum,  $p_i(t)$ , ve hız,  $v_i(t)$ , vektörlerinin ilklendirilmesi  
 Komşuluğun en iyi uyumluluk değerinin,  $evrensel_{eniyi}$ , ve her parçacık için en iyi uyumluluk değerinin,  $kisisel_{eniyi}$ , ilklendirilmesi  
 Komşuluğun en iyi konumunun,  $g_i(t)$ , ve her parçacığın için en iyi konumunun,  $b_i(t)$ , ilklendirilmesi  
**while** Durma koşulu sağlanmıyor ise **do**  
 Her parçacığın uyumluluk değerinin,  $f(p_i(t))$ , hesaplanması  
**for**  $i = 1$ :Parçacık sayısı **do**  
   **if**  $f(p_i(t)) < kisisel_{eniyi}$  **then**  
      $kisisel_{eniyi} = f(p_i(t))$   
      $b_i(t) = p_i(t)$   
   **end if**  
**end for**  
 En küçük uyumluluk değeri,  $min_{kisisel_{eniyi}}$  ve bu değere sahip olan parçacık,  $min_i$  seçilir  
**if**  $min_{kisisel_{eniyi}} < evrensel_{eniyi}$  **then**  
    $evrensel_{eniyi} = min_{kisisel_{eniyi}}$   
    $g_i(t) = p_{min_i}(t)$   
**end if**  
**for**  $i=1$ :Parçacık sayısı **do**  
    $v_i(t+1) = v_i(t) + \varphi_1^i(t)(b_i(t) - p_i(t)) + \varphi_2^i(t)(g_i(t) - p_i(t))$   
    $p_i(t+1) = p_i(t) + v_i(t+1)$   
**end for**  
**end while**

<sup>4</sup>ing: cognitive

Denklem (3.1) sürüdeki parçacıkların çok boyutlu bir uzaydaki hareketlerini betimlemektedir. Denklem (3.1)'de bulunan ilk denklem parçacık hızların dinamik olarak nasıl değiştiğini, ikinci denklem ise sürüdeki parçacıkların arama uzayındaki konumlarını nasıl güncellendiklerini göstermektedir. Denklem (3.1)'de bulunan ilk denklem üç kısma ayrılabilir. Birinci kısım devinirlik (momentum) bileşenidir. Bu kısım güncellenen hızın o zaman anındaki hız değerini göz önüne alarak güncellenmesini sağlar, böylece güncellenen hızın ani olarak değişimi önlenir. İkinci kısım olan bilişsel bileşen bir başka deyişle parçacıkların hafızası olduğunu ve geçmiş tecrübelerinden yararlanabilme yeteneğini gösterir. Üçüncü kısım olan toplumsal bileşen ise toplumsal işbirliği, parçacıkların komşularının tecrübelerinden yararlanarak karar verebilme özelliğini göstermektedir.

Parçacık sürü eniyileme yöntemi rastgele ilklendirilen ve diğer topluluk üyeleriyle etkileşimin olduğu topluluk tabanlı bir arama yöntemidir. Evrimsel programlama yöntemlerinin aksine Parçacık Sürü Eniyileme yönteminde herhangi seçme işleci<sup>5</sup> bulunmamaktadır. Parçacıklar arama uzayında hareket edebilir ve nesilden nesile parçacıklar elde ettikleri en iyi konum bilgisini kullanma yetisine sahiplerdir [47, 48]. Öte yandan evrimsel programlama yöntemleri ise sadece bir nesildeki üyelerden en iyi çözüme sahip olanları bir sonraki nesle aktarılır. Ayrıca PSO yönteminde çaprazlama işleci<sup>6</sup> bulunmamakta ve bu nedenden dolayı parçacıklar hem kendi elde ettikleri bilgileri hem de bütün komşularında elde ettikleri bilgileri kullanarak arama uzayındaki hareketlerini belirlemektedirler [49]. Parçacık sürü eniyileme yönteminde birçok evrimsel programlama yöntemlerinde kullanılan mutasyon işleci kullanılmamaktadır, ancak parçacığın uzaydaki hareketini belirlerken kendi bilgisini ve komşularının bilgilerini kullanması parçacığın uygun çözümler bölgesine doğru yönelmesini sağlamaktadır. Bu durumda parçacık sınırlı sayıda arama yönünde uygun çözümlerin olduğu bölgede arama yapmakta ve bu durum bir mutasyon işleci olarak kabul edilmektedir [36]. Parçacık sürü eniyileme yöntemi ve evrimsel algoritmaların başarımının karşılaştırıldığı çalışmalarda yöntemin uygun çözümlerin olduğu bölgelere evrimsel algoritmalarından daha hızlı yakınsadığı ancak bu bölgelerdeki detaylı arama yeteneğinin evrimsel algoritmalarından daha düşük olduğu gösterilmiştir [47, 50].

Denklem (3.1)'de bulunan ilk denklemde belirtilen üç kısım arasındaki denge yöntemin evrensel ve yerel arama yeteneklerini belirlemede, dolayısıyla yöntemin

---

<sup>5</sup>ing: selection operator

<sup>6</sup>ing: crossover operator

başarımını etkilemektedir. Dikkat edilirse denklemde bulunan düzgün dağılımlı  $n$  boyutlu vektörler olan bilişsel  $\varphi_1^i$  ve toplumsal  $\varphi_2^i$  öğrenme katsayılarının rastgele olmaları nedeniyle yöntemin evrensel ve yerel arama kabiliyetlerini önemli ölçüde belirlemektedirler. Bir parçacık için bilişsel öğrenme katsayısının,  $\varphi_1^i$ , değerinin artırılması yerel arama kabiliyetini artırırken, toplumsal öğrenme katsayısının,  $\varphi_2^i$ , değerinin artırılması evrensel arama kabiliyetini artırmaktadır. Öğrenme katsayılarını rasgele olarak seçilmesi yöntemin arama kabiliyetini geliştirmesine karşın; bu katsayılara göre güncellenen parçacık hızlarının istenmeyen değerler alması ve arama uzayındaki parçacıkların yüksek hızlarla hareket ederek uzayda saçılması olası bir durumdur. Bu durum yönteminin “patlama” davranışı olarak adlandırılmıştır ve parçacıkların uzayda bir noktaya/bölgeye yakınsayamaması olarak belirlenmiştir. Belirtilen sorunun çözülmesi veya en aza indirgenmesi için birçok çalışma gerekçeleştirilmiş ve yöntemin farklı biçimleri ortaya konulmuştur. “Patlama” davranışının ilk çözümü parçacıkların her boyutta bulunan hız değerlerinin istenen bir aralığa sabit  $\pm V_{enyukse}$  sınır değerleri kullanılarak sınırlandırılması olarak belirlenmiştir. Yöntemin verimliliği açısından  $V_{enyukse}$  hız sınırının dinamik olarak değiştiği bir durum daha uygun olabileceği [35] çalışmasında gösterilmiştir.

Öte yandan parçacık hızlarının her boyutta sınırlandırılması yöntemin arama kabiliyetini düşürebilmektedir. Parçacık hızlarının sınırlandırılmadan patlama davranışının engellenmesi için yöntemin dinamik denklemlerine çeşitli katsayılar eklenmiştir. Dinamik denklemlere eklenen ilk katsayı eylemsizlik ağırlık katsayısıdır<sup>7</sup>. Bu katsayı ile yöntemin dinamik denklemleri

$$\begin{aligned} v_i(t+1) &= wv_i(t) + \varphi_1^i(t)(b_i(t) - p_i(t)) + \varphi_2^i(t)(g_i(t) - p_i(t)) \\ p_i(t+1) &= p_i(t) + v_i(t+1) \end{aligned} \quad (3.2)$$

biçimini almıştır [36, 37]. Eylemsizlik ağırlık katsayısı, yöntemin yerel ve evrensel arama kabiliyetlerini dengelemek amacıyla ortaya konulmuştur. Eylemsizlik ağırlık katsayısının büyük değerler alması yöntemin evrensel arama kabiliyetini artırırken, küçük değerler alması yöntemin yerel arama kabiliyetini artırır. Eylemsizlik ağırlık katsayısının doğrusal olarak artırılarak [38] veya azaltılarak [36] yöntemin başarımını inceleyen çalışmalar sonucunda yöntem için en iyi başarıyı sağlayan katsayının değeri belirlenememiştir. Bulanık mantık ile eylemsizlik ağırlık katsayısının ayarlandığı [39] çalışmasında ve katsayının zaman ile parçacıkların ivmesine göre değiştiği [40] çalışmasında yöntemin başarımının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. [46]

---

<sup>7</sup>ing: inertia weight parameter

çalışmasında Denklem (3.2) benimsenmiş ve parçacıkların davranışı ayrık zamanlı sistem kuramından yararlanılarak incelenmiş ve yöntem için parametre seçiminde önerilerde bulunulmuştur.

Parçacık sürü eniyileme yönteminin patlama olgusunun engellenmesi için bir başka katsayı olan kısıtlama katsayısı<sup>8</sup>  $\chi$  çeşitli çalışmalarda ortaya konulmuştur [42, 87]. Yeni parametre için yöntemin dinamik denklemleri

$$\begin{aligned} v_i(t+1) &= \chi \left[ v_i(t) + \varphi_1^i(t) (b_i(t) - p_i(t)) + \varphi_2^i(t) (g_i(t) - p_i(t)) \right] \\ p_i(t+1) &= p_i(t) + v_i(t+1). \end{aligned} \quad (3.3)$$

biçiminde tanımlanmıştır. Kısıtlama katsayısı bilişsel ve sosyal öğrenme katsayıları olan  $\varphi_1$  ve  $\varphi_2$  fonksiyonu

$$\chi = \begin{cases} \frac{2\kappa}{\varphi - 2 + \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} & \text{eğer } \varphi > 4, \\ \sqrt{\kappa} & \text{aksi takdirde,} \end{cases} \quad (3.4)$$

biçiminde tanımlanmıştır [87]. Bu tez çalışmasında yöntemin Denklem (3.3)'te öne sürülen kısıtlama katsayılı biçimi kullanılmaktadır. Burada  $\varphi_1 + \varphi_2 = \varphi$  ve  $\kappa \in [0, 1]$ .

Denklem (3.2)'de bulunan eylemsizlik ağırlık katsayısı kısıtlama katsayısına eşitlenir ve öğrenme katsayıları  $\varphi_1$  ve  $\varphi_2$   $\varphi_1 + \varphi_2 = \varphi$ ,  $\varphi > 4$  koşulunu sağlayacak şekilde seçilirse, eylemsizlik ağırlık katsayılı yöntem ile kısıtlama katsayılı yöntem birbirine eşdeğer olurlar. Bu nedenden dolayı kısıtlama katsayılı yöntem, eylemsizlik ağırlık katsayılı yöntemin özel bir durumu olarak görülebilir. Yöntemin eylemsizlik katsayılı biçimi ve kısıtlama katsayılı biçimi [43] çalışmasında karşılaştırılmış ve arama uzayının boyutlarının iyi ayarlandığı takdirde kısıtlama katsayılı yöntemin daha hızlı yakınsadığı gözlemlenmiştir. Yöntemin Denklem (3.3)'teki biçimi benimsenerek yöntem için en iyi sonucu verecek parametre kümesini (parçacık sayısı, parçacık komşuluğunun büyüklüğü, kısıtlama ve ağırlık eylemsizlik katsayılarının değerleri, öğrenme katsayılarının üst değerleri) bulunması amacı ile çeşitli çalışmalar yapılmıştır ancak genel bir sonuca varılamamıştır [44,45]. [87] çalışmasında öne sürülen kısıtlama katsayılı denklemde öğrenme katsayısının ( $\varphi$ ) üst sınırının 4.1 olarak alınması ve Denklem (3.4)'de bulunan  $\kappa$  değerinin 1 alınması ile parçacıkların yakınsamalarının yavaş olacağı, böylece parçacıkların arama uzayını daha iyi bir biçimde arayacağı belirtilmiştir.

---

<sup>8</sup>ing: constriction factor

### 3.2. Eşzamansız ve Dağıtık Parçacık Sürü Eniyileme Algoritması

Parçacık sürü eniyileme yöntemi ile ilgili çalışmalarda genel olarak yöntemin eşzamanlı çalışan biçimi ele alınmıştır. Bu tür uygulamalarda sürüdeki bütün parçacıklar konumlarını/tahminlerini,  $p_i(t)$ , aynı anda günceller ve ardından aynı anda komşuluğun en iyi uyumluluk değerini ( $evrensel_{eniye}$ ) belirlemek için bilgi alışverişinde bulunurlar ve bütünsel bir komşuluk yapısında buldukları için her zaman anında birbirleri ile komşulardır. Fakat doğada genelde sürüler dağıtıktır/merkezi değildir ve dinamik ve karşılıksız komşuluklara sahiptir.

Bu bölümde geliştirilen algoritmanın eşzamansız ve dağıtık biçiminin sözde kodunu göstermektedir. Geliştirilen algoritmanın literatürde ele alınan eşzamanlı, sıralı eşzamansız ve merkezi paralel eşzamanlı/eşzamansız parçacık sürü eniyileme algoritmalarından önemli farkları bulunmaktadır. İlk olarak geliştirilen algoritma tamamen dağıtık/merkezi olmayan bir biçimde çalışmakta ve merkezi bir işlemcinin bütün verileri toplaması ve yinelemelerini gerçekleştirmesine ihtiyaç duyulmamaktadır. Dikkat edilmelidir ki anlatılan dağıtık yapıya sahip sistem merkezi yapıya sahip sistem ile karşılaştırıldığında hatalara karşı (robot bozulması, haberleşmenin kesilmesi gibi) daha gürbüz olabilmektedir. Bu nedenden dolayı algoritmanın eşzamansız ve dağıtık biçimi paralel uygulamalar ve dolayısıyla çok robotlu sistemler ile gerçekleştirilen uygulamalar için uygun olduğuna inanılmaktadır.

Önceden bahsedildiği gibi robotik arama ile PSO arama arasında büyük bir fark vardır. Çizelge 3.2.'de bulunan sözde koddan da görüldüğü üzere, robot arama alanında arama noktasına doğru ilerlerken, diğer robotlardan bilgi alabilmek için (diğer robotlar ara noktalarına erken ulaştıkları zaman, kendi en iyi uyumluluk değerlerini paylaşmaktadırlar) diğer robotları sürekli dinlemekte ve bu bilgiyi daha sonra  $evrensel_{eniye}$  değerinin güncellenmesi için kullanmaktadır. Robot kendi ara noktasına ulaştıktan sonra kendi en iyi uyumluluk değeri olan  $kisisel_{eniye}$  değerini diğer robotlar ile paylaşmaktadır. Daha sonra diğer robotlardan elde ettiği değerleri, kendi hız vektörünü, kendi en iyi konumunu ve komşuluğunun en iyi konumunu (diğer robotlardan elde edilen bilgiler kullanılarak bulunmaktadır) kullanarak arama alanında bir sonraki gitmesi gereken ara noktayı belirlemektedir (bakınız Denklem (3.3)). Eğer robot kendi ara noktasına ulaştığı anda sistemdeki diğer robotlar ara noktalarına ulaşmamışsa bir başka deyişle robot sistemdeki diğer robotlardan bilgi almamışsa, bir sonraki ara nokta belirlenirken robot sadece kendi bilgisini ve daha önceki adımlarda haberleştiği robotların bilgilerini kullanmaktadır. Başka robotlardan bilgi alındığı

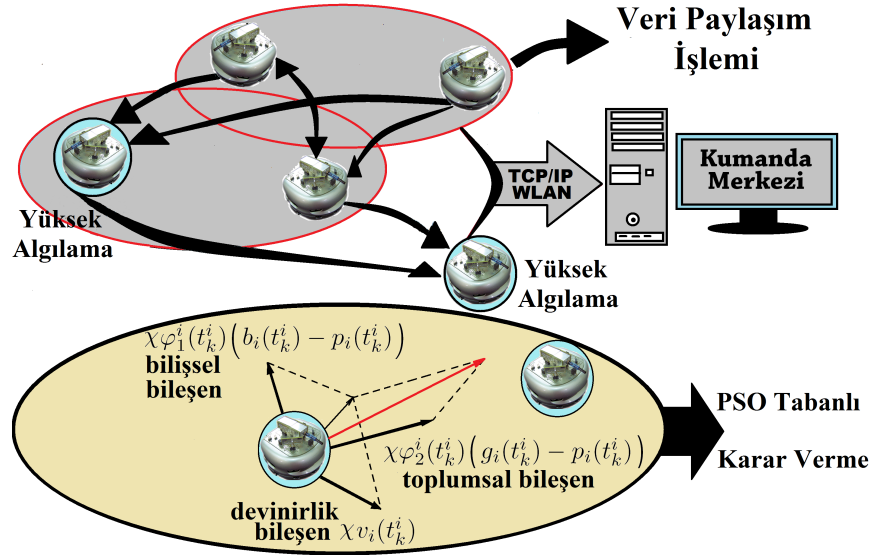
durumda ise bu bilgi de  $evrensel_{eniye}$  değerinin güncellenmesinde kullanılmaktadır. Sürüdeki robotlar arama alanında ara noktalarına farklı zamanlarda ulaştıkları için robotun haberleşebildiği ve bilgi alabildiği robotlar zaman ile değişmektedir.

Sistemdeki robotlar birbirlerini beklemek zorunda kalmayıp, eşzamansız ve özerk olarak işlemlerini gerçekleştirerek arama görevini daha hızlı ve etkin bir biçimde gerçekleştirebilecekleri düşünülmüştür. Öte yandan sistemdeki herhangi bir robotun devre dışı kalması durumunda sistemdeki diğer robotlar işlemlerini özerk ve eşzamansız biçimde gerçekleştirdikleri için sistem arama görevine devam edebileceği öngörülmektedir. Ayrıca haberleşen robotların komşuluk yapısının dinamik olarak değişmesinden ötürü sistemdeki bütün robotların her zaman anında haberleşerek hareketlerini planlama ihtiyacı ortadan kaldırılarak, sistem geçici veya kalıcı haberleşme hatalarına karşı daha gürbüz hale geldiğini inanılmaktadır. Bu problemleri göz önünde bulundurarak Dağıtık ve Eşzamansız PSO tabanlı çoklu robot arama yöntemi [84] yöntemi Gazi ve çalışma arkadaşları tarafından ortaya sunulmuştur (önceki çalışmalardan [88, 89] esinlenerek). Çizelge 3.2.'deki sözde kodunda  $S(b_i)$  robotun kendi algılayıcısından okunan kişisel en iyi değerinin konumu ve  $S(g_i)$  ise evrensel en iyi değerinin konumunu gösterir.

Uygulanan Dağıtık ve Eşzamansız PSO yönteminde yukarıda bahsedilen problemlerden dolayı robotlar çalışmasının durdurmuyorlar çünkü robotlar arası veri değişimi eşzamanlı olarak gerçekleşmemektedir ve mevcut olan bir önceki bilgileri ile aramasını devam ettirebilmektedirler (daha fazla bilgi için [84] bakın). Üstelik Çizelge 3.2.'de gösterildiği gibi PSO arama yöntemi başlamadan önce arama alanını daha iyi kapsamak için robotlar önceden belirlenmiş ve bir birinden uzak noktalara gitmektedirler. Bu adımda robotların gezinme sırasında kimyasal algılayıcıdan elde edilen değeri sürekli kumanda merkezine göndermektedirler. Çoklu robotlar ile PSO arama yöntemini daha açıklayıcı şekilde tanıtan örnekleme Şekil 3.1.'de verilmiştir.

Uygulama iki adımda gerçekleştirilmiştir. Bunlar: robotların alana dağılması ve alanı PSO yöntemi ile araması. İlk olarak robotlar deney alanının girişinden aramayı başlamışlardır. Robotların ilk gideceği noktalar arama alanını daha iyi kapsamak için önceden belirlenmiş ve bir birinden uzak konumlardadır. Sonraki noktası ise rastgele atanmıştır. İlk adımın asıl amacı arama alanında olduğu kadar robotları yaymak ve bu şekilde alanı kapsamaktır. Böylece deneyin ilk adımında alanın kimyasal gaz yoğunluğu haritasını daha iyi biçimde elde etmiş ve Eşzamansız PSO yöntemini daha verimli biçimde kullanılmıştır. Robotlar Şekil 3.1.'de gösterildiği





Şekil 3.1.: Parçacık Sürü Eniyileme yönteminin çoklu robotlar üzerinde görselleştirilmesi.

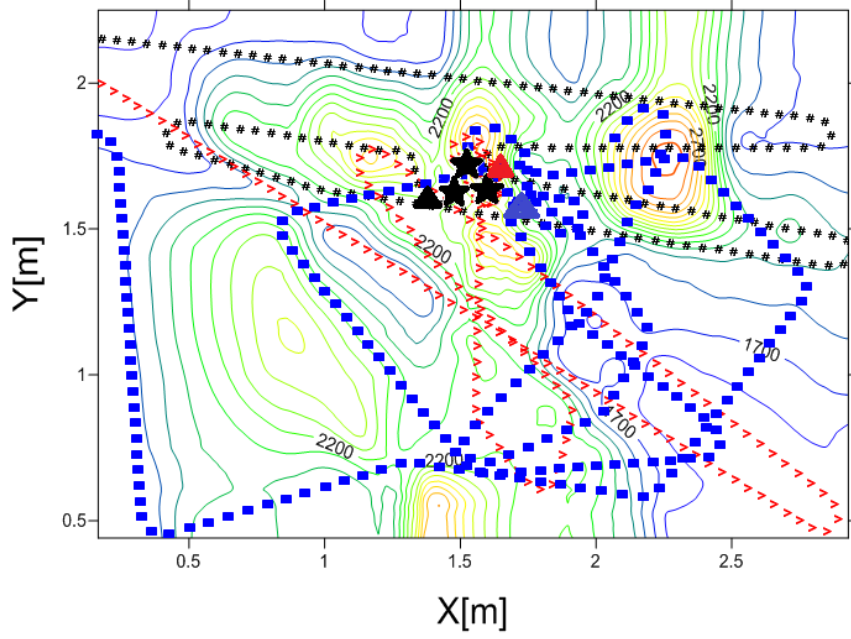
gibi kendi aralarında TCP/IP protokolu ile kablosuz ağ üzerinde kimyasal algılayıcı ile elde ettiği verileri ve kendi konumlarını paylaşmaktadırlar. Üstelik robotlar kendi konumlarını ve kimyasal algılayıcılarından ölçtükleri değerleri her adımda kumanda merkezine göndermektedirler. İlk adımdan sonra robotlar Eşzamansız PSO yöntemini üst seviye güzergah planlaması olarak kullanarak alanı aramayı başlarlar. Bir sonraki gideceği noktaları Eşzamansız PSO yöntemini kullanarak robotlar kendi bilgilerini/ölçümlerini ve robotlar arası paylaşılan bilgileri/ölçümleri göz önünde bulundurarak hesaplanmıştır. İki nokta arası yolu kat ederken robotların engellerden kaçınması için yapay potansiyel fonksiyonlar kullanılmıştır. Hatta robotlar gönderdiği verileri toplayıp gerçek zamanlı üç boyutlu kimyasal gaz yoğunluğu haritasının görüntülemek için Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi kumanda merkezi olarak uzaktaki bir bilgisayar kullanılmıştır. Matlab ve *Golden Surfer9* yazılımının deneme sürümünü kumanda merkezinin ana işleme ve görselleştirme araçları olarak kullanılmıştır.

### 3.3. Uygulama Sonuçları

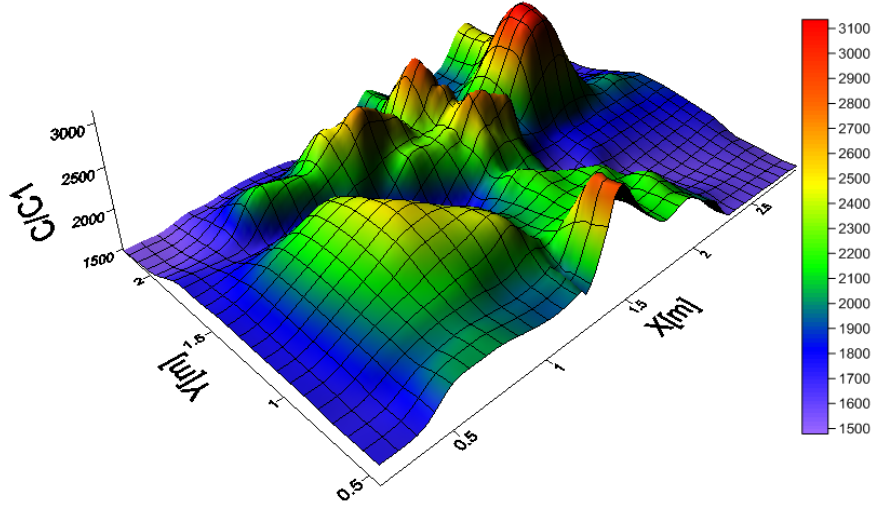
Bu bölümde uygulama ortamında var olan kimyasal gazın haritalandırılması ve gaz kaynaklarının bulunması problemi ele alınmıştır. Problemin gezgin robotlar yardımı ile Dağıtık ve Eşzamansız PSO ve Temel PSO yöntemi kullanarak çözülmesi beklenmiştir. Bölümde deney uygulanmasından elde edilen sonuçlar tartışılacak ve karşılaştırılacaktır. Uygulamada 3 adet Khepera III robotları kullanılmıştır.

Sunulan Eşzamansız ve Dağıtık PSO yönteminin performans açısından daha verimli ve haberleşme problemleri ya da donanımsal oluşan problemlere karşı gürbüz ve dayanıklı olduğunu denemek amacı ile aynı deneysel düzenek üzerinde Temel PSO yöntemi de uygulanmıştır. Deney sürecinde robotlar algıladığı ortamın gaz yoğunluğunu ve kendi konumlarını kesintisiz bir biçimde kumanda merkezine göndermektedirler. Kumanda merkezinde robotlardan toplanan veriler birleştirilerek ve filtre edilerek gerçek zamanlı gaz yoğunluğu haritası elde edilmiştir. Deneyde verilerin işlenip harita hale getirilmesinde *kriging* tahmin yöntemi ve  $[5, 5]$  boyutundaki *Gauss* süzgeçi kullanılmıştır. İki deneyde de aynı konumdaki kaynaklar ve aynı koşullar sağlanmıştır. Birinci uygulama olarak Eşzamansız ve Dağıtık PSO yöntemi ele alınmıştır. Alanın içerisinde Şekil 3.2.(a)'da kaynaklar (1.45, 1.6), (1.5, 1.7), ve (1.55, 1.6) kordinatlarda yerleştirilmiştir. Şekil 3.2.(a)'da robotların güzergahları alanın elde edildiği kontür çizgesinde gösterilmiştir ve kalın yıldız şekilleri de kaynakların konumlarını göstermek için kullanılmıştır. Renkli üçgen şekilleri ise robotların deney sonundaki son konumlarıdır. Hatta robot güzergahları bir birinden farklı biçimde farklı çeşitteki çizgileri kullanarak gösterilmiştir. Deney sonunda elde edilen kapalı ve bilinmeyen bir ortamın 3 boyutlu kimyasal gaz yoğunluğu haritası Şekil 3.2.(b)'de gösterilmiştir. Robotlar Şekil 3.2.(a)'da ve Şekil 3.2.(b)'de gösterildiği gibi kimyasal gazın yüksek olduğu bölgenin yakınına toplanmıştır. Ortamın kimyasal gaz yoğunluğunun yüksek olduğu bölgeler gazın kaynak konumlarının yakınından yer almaktadırlar bundan dolayı deney sonunda elde edilen 3 gaz yoğunluğu haritası gerçekçi olduğu düşünülmektedir.

İkinci yöntem olarak Temel Parçacık Sürü Eniyileme yöntemi ele alınmıştır ve sonuçları Şekil 3.3.(a)'da ve Şekil 3.3.(b)'de gösterilmiştir. Bu deneyde robotların konum güncellemesi eşzamanlı biçimde gerçekleşmektedir ve robotlar kendilerinin PSO tabanlı konumunu güncelledikten sonra diğer robotların konumlarını güncellemesini beklemektedirler. Böylece Temel PSO kimyasal gaz kaynaklarının yakınına toplandığına rağmen deneyin çok uzun süre sürdüğü tespit edilmiştir. Örneğin Eşzamansız PSO yöntemi ile haritalama 12 dakida sürer iken Temel PSO yönteminde ise haritalama 23 dakika sürmüştür. Temel Parçacık Sürü Eniyileme yöntemin çoklu robot arama görevinde uygulandığı zaman yöntemin eşzamanlı veri değişme ve haberleşmesi yöntemi daha yavaş hale getirdiği gözlenmektedir. Önceden bahsedildiği gibi Temel PSO yönteminde robot bulunduğu konumundan bir sonraki gideceği konumuna ulaştığında diğer robotların da bir sonraki noktalarına ulaşmasını beklemektedir. Bu olgunun bir alanı aramada büyük dezavantaj olduğu ve problemlere yol açtığı Şekil 3.4.(a)'da ve Şekil 3.4.(b)'de yansıtılmıştır. Üçüncü deneyde ise Temel PSO yönteminin gerçek kimyasal bulunan bir ortamda çoklu



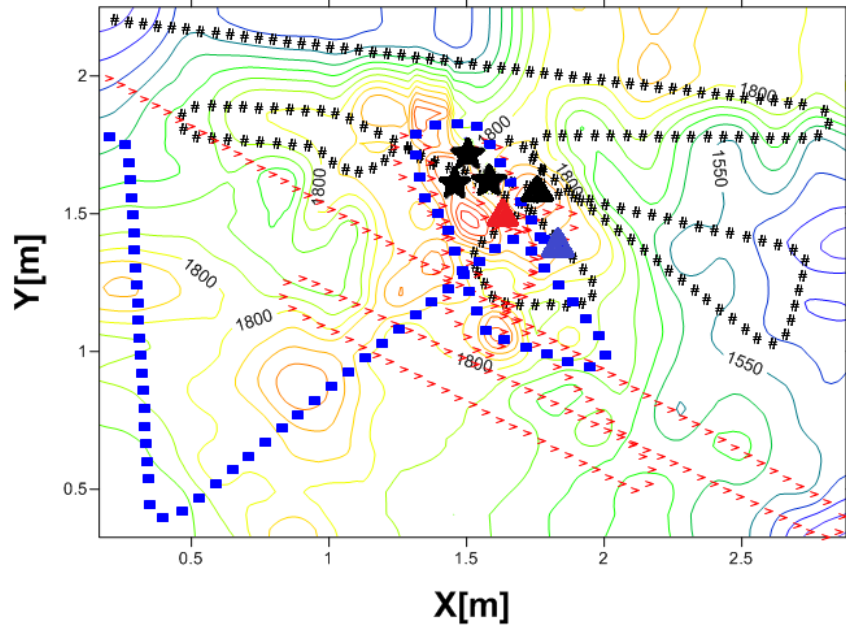
(a) Gezgin robotların güzergahları.



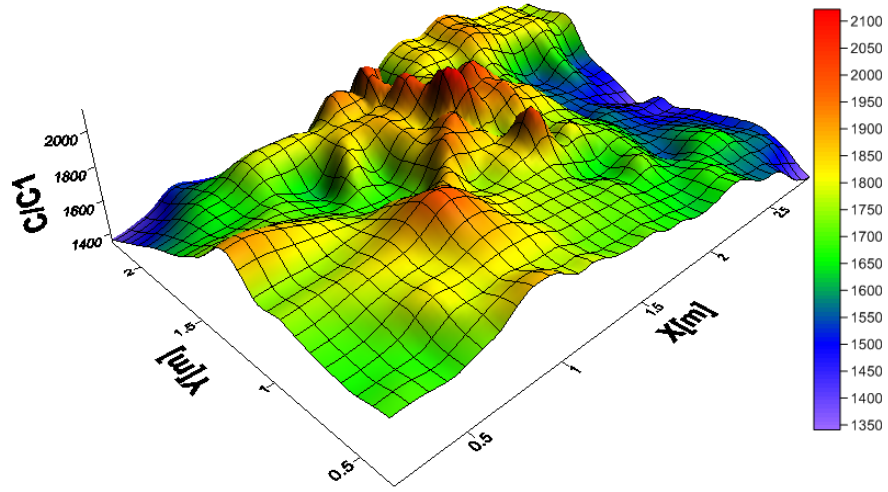
(b) Kimyasal gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.

Şekil 3.2. Eşzamansız ve Dağıtık Parçacık Sürü Eniyileme yöntemi ile haritalama.

robot arama uygulamasında başarısız olduğunu tespit edilmiştir. Bu deneyin arama süresinde bir robot istemli bir şekilde bozulmuş ve diğer robotlar ile haberleşmesi kesilmiştir. Sonuç olarak diğer robotlar bir sonraki ara noktalarına ulaşmışlardır ve bu noktada sonra gezinmelerine devam edememişlerdir çünkü haberleşmeyi kesen robot tarafından gönderilecek konumunu güncellediği ve elde ettiği bilgiler hakkında güncelleme beklemektedirler. Böylece arama tamamlanamamıştır ve



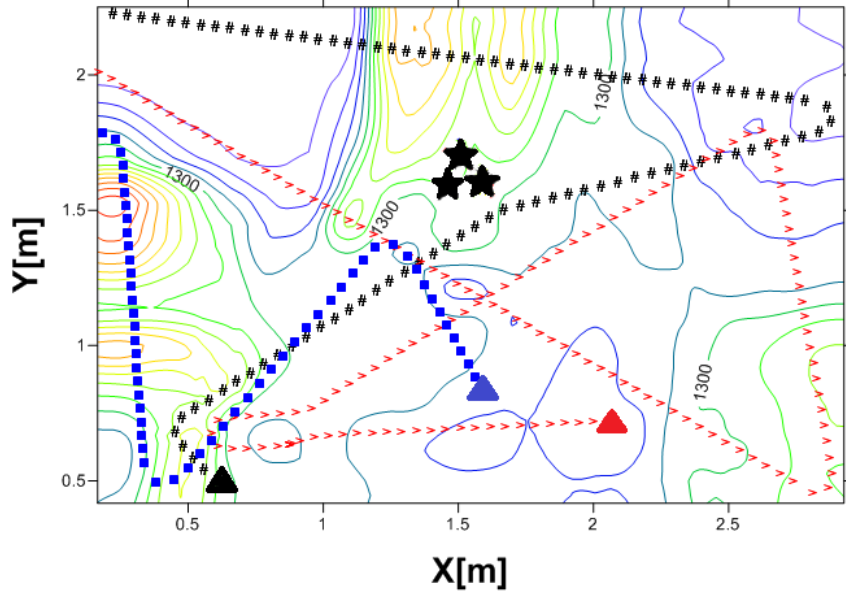
(a) Gezin robotların güzergahları.



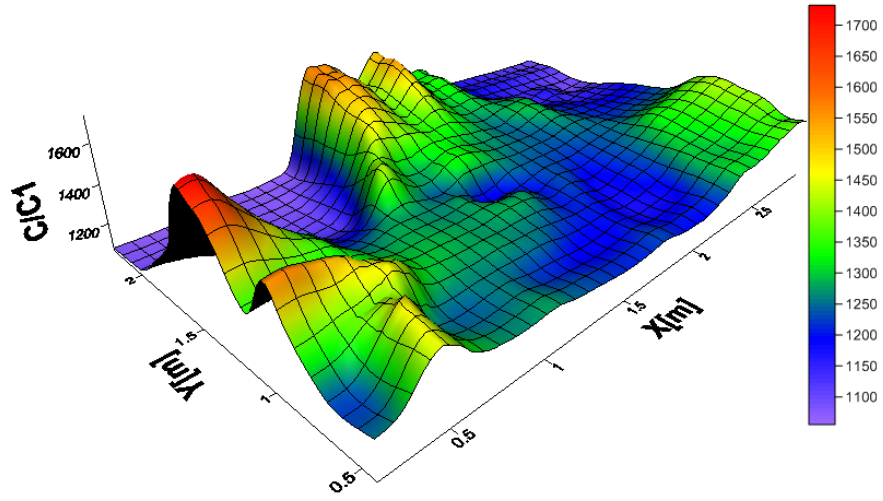
(b) Kimyasal gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.

Şekil 3.3. Temel Parçacık Süürü Eniyileme yöntemi ile haritalama.

ortamın kimyasal gaz yoğunluğu haritası eksik ve gerçektışı biçimde elde edilmiştir. Robotların güzergahı Şekil 3.4.(a)'da ve 3 boyutlu harita ise Şekil 3.4.(b)'de gösterilmiştir. Üstelik Eşzamansız ve Dağıttık PSO yöntemin de aynı koşullarda bir robotun istenerek haberleşmesini keserek deneyi başarılı biçimde tamamladığını gözlemlenmiştir. Şekil 3.5.(a)'da gösterildiği gibi robot haberleşmesini kesmiş ve hareketsiz hale getirilmiştir, yöntem eşzamansız gerçekleştiğinden dolayı diğer



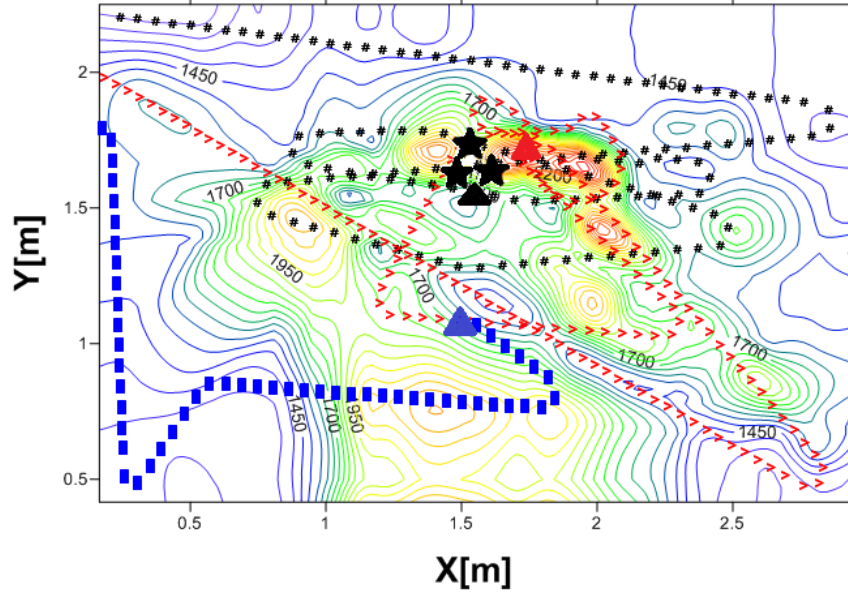
(a) Gezin robotların güzergahları.



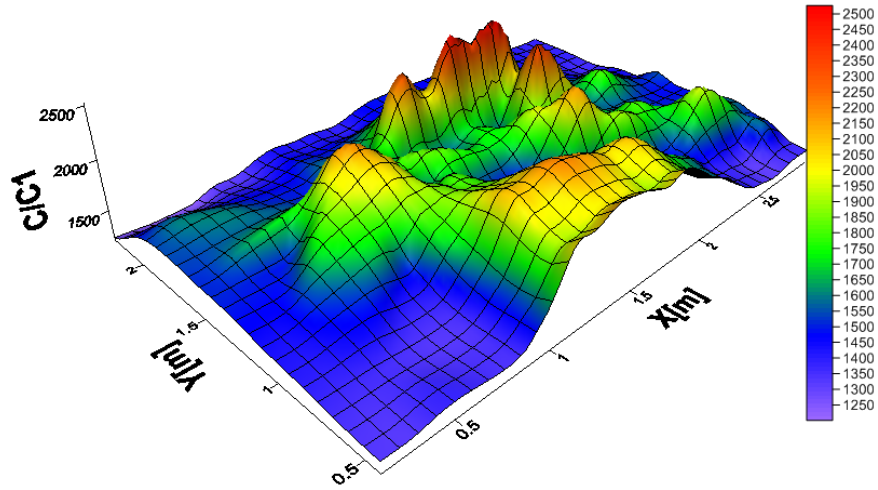
(b) Kimyasal gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.

Şekil 3.4.: Temel Parçacık Sürü Eniyileme yöntemi ile bir robotun diğer robotlar ile haberleşemediği durumdaki haritalama.

robotlar bozulan robotu beklemeden aralarında paylaşılan bilgilere ve kendilerinin eski değerlerini kullanarak bir sonraki gideceği konumu güncellemektedirler. Böylece Şekil 3.5.(b)'de gösterildiği gibi elde edildiği ortamın kimyasal gaz yoğunluğu daha gerçekçi biçimde olmuştur.



(a) Gezgin robotların güzergahları.



(b) Kimyasal gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.

Şekil 3.5.: Eşzamansız ve Dağıtık Parçacık Süürü Eniyileme yöntemi ile bir robotun diğer robotlar ile haberleşemediği durumdaki haritalama.

Çizelge 3.2.: Eşzamansız ve Dağıtık Parçacık Sürü Eniyileme Yöntemin Sözde Kodu.

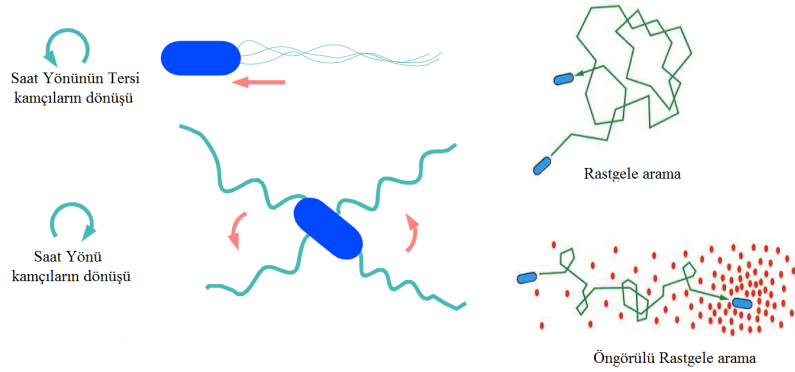
```
Değişkenlerin ilklendirilmesi
İlk hareket noktasını ata
while (Robot belirlenen noktasına ulaşmadı) do
    Çevredeki gaz yoğunluğunu algıla
    Algılanan verileri kumanda merkezine gönder
end while
İkinci hareket noktasını rastgele belirle
while (Robot belirlenen noktasına ulaşmadı) do
    Çevredeki gaz yoğunluğunu algıla
    Algılanan verileri kumanda merkezine gönder
end while
while (Aramayı durdurma koşulu sağlanmadı ise) do
    while (Robot belirlenen noktasına ulaşmadı) do
        Gitmek istenilen noktaya git
        Çevredeki gaz yoğunluğunu algıla
         $S(b_i)$ 'yi güncelle
        Başka robotlardan veri al
        Algılanan verileri kumanda merkezine gönder
        if (Robotlar arası mesafe çarpışma mesafesinden küçük ise) then
            Öncelik tabanlı çarpışmadan kaçınma hareketini uygula
        end if
    end while
    Kendi  $S(b_i)$  en iyi değerini yayınla
    if ( $S(b_{i\_diger}) > S(g_i)$  veya  $S(b_i) > S(g_i)$ ) then
         $S(g_i)$  evrensel en iyi değerini güncelle
    else
        Bir önceki  $S(g_i)$  evrensel en iyi değeri kullan
    end if
    Bir sonraki gideceği konumu Denklem (3.1)'ye göre hesapla
end while
```

## BÖLÜM 4

### 4. BAKTERİ BESLENMESİ TABANLI ENİYİLEME YÖNTEMİ İLE KİMYASAL GAZ YOĞUNLUĞU HARİTALANMASI

#### 4.1. Bakteri Beslenmesi Tabanlı Eniyileme Yönteminin Genel Özellikleri

Bu bölümde Kevin M. Passino tarafından ortaya atılan [77] Bakteri Beslenmesi Eniyileme yöntemi anlatılacaktır. Bakteri Beslenmesi Eniyileme yöntemi doğadaki *E.coli* bakterilerinin besin arama davranışlarından esinlenmiştir. Bakterilerin besin arama davranışları bulunduğu ortamın besin yönünden zengin olduğuna ya da ortamın zehirli ortam olduğuna göre değişmektedir. Bakterilerin kemotaksi hareketleri iki farklı hareket olarak sınıflandırılır: Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi bakterinin kamçıların saat yönünde döndüğü zaman bakteri bulunduğu ortamda üç eksende takla atmaya<sup>1</sup> başlar ve kamçıların<sup>2</sup> saat yönü tersine döndüğü zaman bakteri besine doğru yüzmeye<sup>3</sup> başlar. Böylece ortamın kimyasal yoğunluğunun değişimi bakterilerin takla atmasını ya da yüzmesini belirler. Bakterilerin hareketi aralıklı yüzmesi ve yüzme sırasında kimyasal ortama göre takla atarak önyargılı rastgele yön değiştirmesi ile tanımlanır ve Şekil 4.1.'de gösterilmiştir. Bakterilerin kemotaktik davranışlarından



Şekil 4.1.: *E.coli* bakterisinin besin bulmak amacıyla yaptığı hareketlerinin göreselleştirilmesi.

esinlenerek Bakteri Beslenmesi Eniyileme yöntemi iki ana işlemi içerir, takla atma ve

<sup>1</sup>ing: Tumbling

<sup>2</sup>ing: Flagella

<sup>3</sup>ing: Swimming



yüzme hareketleri. Denklem (4.1)'de  $j_{nci}$  kemotaktik adımında  $i_{nci}$  bakterinin konum değiştirmesi gösterilmiştir [77]

$$\theta_i(j+1, r, l) = \theta_i(j, r, l) + C(i)\phi(j) \quad (4.1)$$

burada  $C(i) > 0, i = 1, \dots, N$  yüzme sırasında adım uzunluğu tanımlayan kemotaktik adım boyutudur;  $\theta_i(j, r, l)$  ise  $i_{nci}$  bakterinin  $r_{nci}$  üreme ve  $l_{nci}$  eleme ve dağılma<sup>4</sup> döngüsünün  $j_{nci}$  kemotaktik adımındaki konumunu belirtir ve  $\phi(j)$  ise bakterinin  $j_{nci}$  kemotaktik adımındaki  $[0, 2\pi]$  [82] aralığında üretilen rastgele yön birimini gösterir. Başka bir deyişle  $C(i)$  takla atma hareketi ile belirlenen önyargılı rastgele seçilen yönünde her kemotaktik adımında yüzme mesafesini belirtir. Bakteri  $\theta_i(j+1, r, l)$  konumundaki hesapladığı uygunluk değeri ile bir önceki  $\theta_i(j, r, l)$  konumundaki hesapladığı uygunluk değeri ile karşılaştırır ve bir sonraki kemotaktik adım için karar verir. Eğer  $\theta_i(j+1, r, l)$  konumundaki uygunluk değeri bir önceki  $\theta_i(j, r, l)$  değerinden daha iyi ise (problemin içeriğine göre değişebilmektedir: minimize problemi ise daha küçük bir değer, maksimize problemi ise daha büyük bir değer) bakteri yön değiştirmeden arama işlemine devam etmektedir. Bir önceki  $C(i)$  adımında seçtiği yönü  $\phi(j)$  değiştirmeden yüzme hareketi gerçekleştirerek önceden belirlenmiş en büyük  $N_s$  yüzme adımına ulaşana kadar aramasını devam ettirmektedir. Tersine eğer  $\theta_i(j+1, r, l)$  konumundaki hesapladığı uygunluk değeri bir önceki değerinden daha kötü ise bakteri takla atarak yönünü yeni bir önyargılı rastgele yöne  $\phi(j+1)$  değiştirerek arama işlemine devam etmektedir.

Bakteri Beslenmesi Eniyileme yöntemine kemotaktik adımının önceden belirlenen  $N_c$  sayısına ulaşması yöntemin *üreme*<sup>5</sup> adlı adımına yol açar. Bu adımda yöntem bakterilerin tüm arama sürecinde topladıkları tüm uygunluk değerlerini küçükten büyüğe göre sıralamaktadır. Bu sıralama işlemi sağlıklı bakteriler ile hasta bakterileri bir birinden ayırmak için kullanılmıştır [77]. Sonra tüm bakteri popülasyonunun yarısı elenir ve kalan yarısı ise üreme adımında her biri ikiye bölünerek (kendi kopyasını yaratarak) ilk popülasyon sayısının tekrar tamamlamaktadırlar.

Doğada dış dinamikler, tahmin edilemeyen çevresel değişimler ve hayvanlar, zorla bakterilerin bir yerden farklı bir yere göç etmesine neden olmaktadır. Bu durumu bakteri sürüsü uygulamalarında benzetmek için Passino eleme ve dağılma  $N_{ed}$  işlemini öne sürmüştür [77]. Eleme ve dağılma adımı bakterilerin evrensel en iyi uygunluk değerine ulaşması için belli bir sayı üreme adımından sonra uygulanmaktadır. Daha

<sup>4</sup>ing: Elimination and Dispersion

<sup>5</sup>ing: Reproduction

fazla bilgi [77] çalışmasında bulunabilir. *E.coli* bakterisi hakkında daha fazla bilgi [78–80]’daki çalışmalarda mevcuttur.

#### 4.2. Bakteri Beslenmesi Eniyileme Yönteminin Robotlar Üzerinde Uygulanması

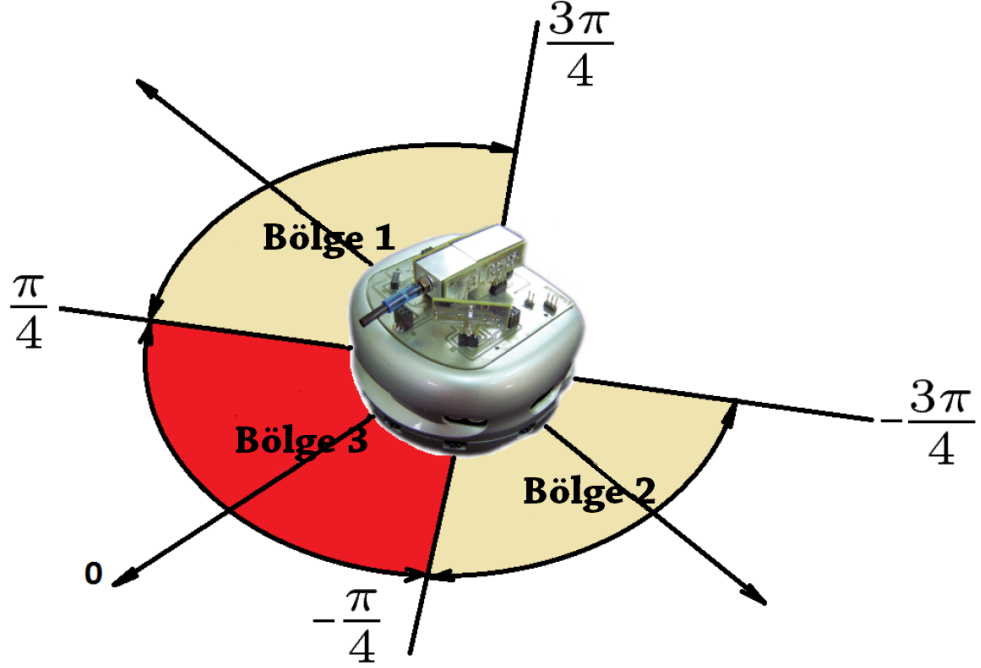
Bu bölümde Bakteri Beslenmesi Eniyileme Yönteminin Khepera III gezgin robotlar yardımı ile kullanılarak ortamın kimyasal gaz yoğunluğunun haritalanması anlatılacaktır. Uygulamada kullanılan yöntem Passino [77] tarafından geliştirilen ana yöntemden bir miktar farklıdır. Fark olarak uygulamada üreme adımı ve eleme-dağılma adımları fiziksel açıdan robotları uygulanamayacağından kullanılmamaktadır. Robotların hareketleri bakterilerin besin arama davranışlarını esas olarak kullanılmaktadır. Başka bir deyişle robotlar bir sonraki gideceği noktayı Bakteri Beslenmesi Eniyileme yöntemindeki bakterilerin kemotaktik davranışlarından esinlenerek hesaplamaktadırlar. Robotlar her bir kemotaktik adımda bulunduğu ara konumundan bir sonraki ara konumuna gittiğinde sürekli biçimde kimyasal algılayıcıdan çevrenin kimyasal gaz yoğunluğunu algılamakatadır ve iki ara nokta arası tüm ölçümlerin ortalamasını hesaplamaktadır. Bir sonraki gideceği konumuna ulaştığı zaman elde ettiği kimyasal gaz yoğunluğunun ortalama değeri ile bulunduğu konumdaki kimyasal algılayıcıdan ölçtüğü değer ile karşılaştırmaktadır. Algılayıcıdan ölçtüğü ve karşılaştırdığı değerlere dayanarak robot üç farklı davranışı gerçekleştirmektedir.

İlk olarak, robotların kimyasal algılayıcıları ile bulunduğu ortamda (konumda) ölçtüğü bulunduğu konumdaki değeri  $S(simd_i)$  ile bir önceki elde ettiği kimyasal gaz yoğunluğunun ortalama değerinin  $S(oncort_i)$  farkının mutlak değerini hesaplamaktadır. Eğer farkı alındıktan sonra elde edilen değer önceden belirlenen sabit (*Eşikdeğeri*=20) değerinden küçük ise robotlar kendi yönlerini Şekil 4.2.’ye göre 1, 2, ve 3 bölgelerinde rastgele  $-\frac{3\pi}{4}$  ve  $\frac{3\pi}{4}$  açılar arasında değiştirmektedir. Başka bir deyişle yönleme göre robot bulunduğu konumundan bir sonraki konumuna ulaştığında eğer iki konum arası çok küçük değişim var ise robotların bulunduğu ortam homojen ortam demektir ve robotlar için o bölge büyük bir önem taşımamaktadır. Böylece robot eşyaygın<sup>6</sup> çevrede bakteri davranışı gibi büyük bir takla atarak büyük bir açıyla yönünü değiştirerek o bölgeden çıkmaya çalışmaktadır.

Tersine eğer  $S(simd_i)$  ve  $S(oncort_i)$  arasındaki farkının mutlak değeri bahsedilen *Eşikdeğerden* büyük ise robotlar bulunduğu konumdaki ortamın kimyasal gaz

---

<sup>6</sup>ing: Homogeneous



Şekil 4.2.: Robotların Bakteri Beslenmesi Eniyileme yönteminde yön seçme göreselleştirilmesi.

yoğunluğunun algılayıcı ile ölçtüğü değeri  $S(simd_i)$  ile o konuma ulaşmadan bir önceki konumdan şimdiki bulunan konuma kadar algıladığı ölçümlerin ortalaması  $S(ortonc_i)$  ile karşılaştırılır. Eğer bulunduğu konumdaki gaz yoğunluğu  $S(simd_i)$  ortalama değerden  $S(ortonc_i)$  büyük ise robot Şekil 4.2.'de gösterildiği gibi 3'ncü bölgede  $-\frac{\pi}{4}$  ve  $\frac{\pi}{4}$  açıları arasında yönünü rastgele değiştirmektedir ve yüzme mesafesini 0.2 ve 0.3 metre arasında rastgele atamaktadır. Bu davranış robotların *E.coli* bakterisinin besin bakımından zengin bölgelerdeki davranışını taklid etmektedir. Bu koşulun tersine eğer bulunduğu konumdaki algıladığı değer  $S(simd_i)$  ortalama değerden  $S(ortonc_i)$  küçük ise robot 1'nci  $(\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4})$  ve 2'nci  $(-\frac{\pi}{4}, -\frac{3\pi}{4})$  bölgelerinde rastgele yönünü değiştirir ve yüzme mesafesini seçilen yönde 0.15 ve 0.2 metreler arasında azaltmaktadır. Bu davranış *E.coli* bakterisinin besinin düşük oranda olduğu bölgedeki veya ortamın zehirli olduğu bölgedeki davranışını göstermektedir.

Bakteri Beslenmesi Eniyileme yönteminin çoklu robotlarda uygulamasının sözde kodu Çizelge 4.1.'de gösterilmiştir. Burada  $p_i$  olarak  $i_{nci}$  robotun konumu göstermektedir,  $S(simd_i)$  olarak  $i_{nci}$  robotun bulunduğu konumundaki kimyasal algılayıcısından elde ettiği ölçüm ve  $S(ortonc_i)$  ise  $i_{nci}$  robotun iki ara noktası arası algılayıcı ile yapılan ölçümlerin ortalamasıdır. Her robot tüm arama sürecinde gerçekleştirilen

kemotaktik adımımda kimyasal algılayıcısı ile ölçtüğü değerleri sürekli biçimde kumanda merkezine göndermektedir. Deney 50 kemotaktik adıma ulaşınca kadar devam etmektedir. İki ara nokta arası yüzme hareketini gerçekleştiren yöntemin sözde kodu Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir.

#### Çizelge 4.1. Bakteri Beslenmesi Eniyileme Yönteminin Sözde Kodu.

```
Değişkenlerin tanımlanması
İlk hareket noktasını bir birilerinden uzak konumda ata
Yüzme hareketi (ilk gideceği ara nokta)
İkinci gideceği ara noktasını rastgele belirle
Yüzme hareketi (ikinci gideceği ara nokta)
while (Kemotaktik sayısına  $N_c$  ulaşmadı ise) do
  if ( $abs(S(simd_i) - S(oncort_i)) < Eşik\ değeri\ 1$ ) then
    Tüm alanlarda (1, 2, 3) takla at  $rastgele(-\frac{3\pi}{4}, \frac{3\pi}{4})$ 
    Yüzme mesafesini 0.1 metre olarak belirle
    Bir sonraki gideceği noktayı hesapla
    Yüzme hareketi (bir sonraki ara nokta)
  else
    if ( $S(simd_i) > S(oncort_i)$ ) then
      Bölge 3'te takla at  $rand(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4})$ 
      Yüzme mesafesini  $rastgele(0.2, 0.3)$  metreler arasında belirle
      Bir sonraki gideceği noktayı hesapla
      Yüzme hareketi (bir sonraki ara nokta)
    else
      Bölge 1 veya Bölge 2 (rastgele seç)
      Yüzme mesafesini  $rastgele(0.15, 0.2)$  metreler arasında belirle
      Bir sonraki gideceği noktayı hesapla
      Yüzme hareketi (bir sonraki ara nokta)
    end if
  end if
end while
```

### 4.3. Uygulama Sonuçları

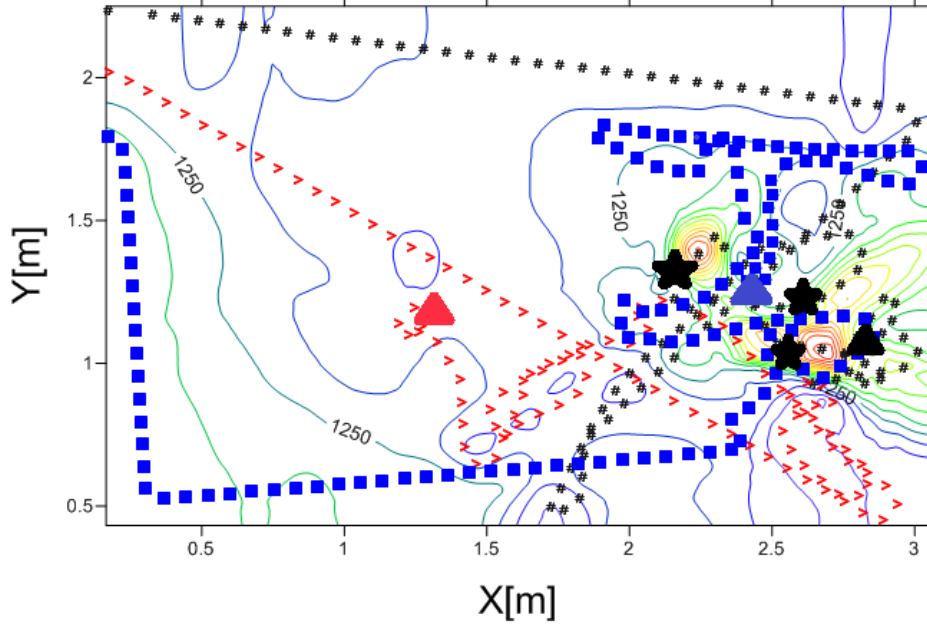
Bu bölümde uygulama ortamında var olan kimyasal gazın haritalandırılması ve gaz kaynaklarının bulunması problemine karşı gezgin robotlar yardımı ile Bakteri Beslenmesi Eniyileme yöntemi uygulanmasından elde edilen sonuçlar tartışılacak ve gerçek zamanlı elde edilen harita kareleri gösterilecektir. Önceki bölümde Eşzamansız ve Dağıtık Parçacık Sürü Eniyileme yöntemi ile kimyasal gaz yoğunluğu haritalamasında 3. Bölümdeki kullanılan aynı deneysel düzenek ve aynı robotlar aynı koşullar altında kullanılmaktadır. Deneyde farklı konumlarda bulunan birden fazla

#### Çizelge 4.2. Yüzme Fonksiyonunun Sözde Kodu.

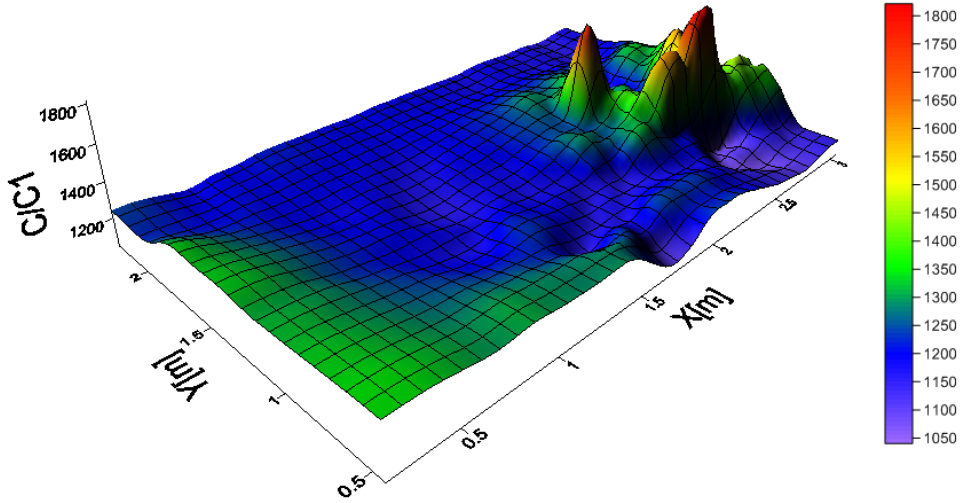
```
yüzme hareketi(ara nokta)
while (Robot belirlenen noktasına ulaşmadı) do
  Gitmek istenilen noktaya doğru git
  Çevredeki gaz yoğunluğunu algıla
  Algılanan verileri kumanda merkezine gönder
if (Diğer robotlarla çarpışma mesafesinde ise) then
  Öncelik tabanlı engelden kaçınma işlemini uygula
end if
end while
```

kaynaktan yayılan etanol gazı kullanılmıştır. Uygulamada 3 adet Khepera III robotu kullanılmıştır. Birinci deneyde Şekil 4.3.(a)'da ve Şekil 4.3.(b)'de gösterildiği gibi 3 farklı kaynak alanda (2.2, 1.3), (2.6, 1.25), ve (2.55, 1) konumlarında yerleştirilmiştir.

Şekil 4.3.(a)'da robotların güzergahları elde edildiği ortamın kimyasal gaz yoğunluğunun kontür çizgesinde gösterilmiştir ve yıldız şekilleri de kaynakların konumlarını temsil etmektedir. Renkli üçgen şekilleri ise robotların aldığı deney sonundaki son konumlardır. Bunlara ek olarak, robot güzergahları bir birinden farklı biçimde farklı tipteki çizgileri kullanarak gösterilmiştir. Şekil 4.3.(a)'da gösterildiği gibi uygulamanın sonunda iki tane robot kaynakların yerleştirildiği konuma çok yakın konumlara yerleşmiş durumdadır. Bu konumlarda Şekil 4.3.(b)'de gözüktüğü gibi ortamın kimyasal gaz yoğunluğunun en yüksek olduğu bölgelerdir. Ortamın kimyasal gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası beklendiği gibi kaynaklara yakın konumlarda Şekil 4.3.(b)'de gösterildiği gibi en yüksek olan tepeliklerle betimlenmiştir. Bir sonraki deneyde ise ortamdaki gaz kaynakları bir birinden bir miktar uzak mesafede yerleştirilmiştir. Şekil 4.4.(a)'da gösterildiği gibi yıldız sembolü ile kaynak konumları betimlenmiştir ve gaz kaynakların konumları (2.4, 1.7), (2.45, 1.3), ve (2.3, 1.15) kordinatlarda yer almıştır. Uygulama sonunda ise her seferinde robotlar farklı konumlarda yer almıştır. Şekil 4.4.(a)'da gösterildiği gibi iki tane robot bir birinden uzak ama kaynağa yakın konumda işlemini tamamlamıştır ve diğer robot ise kaynaklardan çok uzak olan uygulamanın amacına göre hatalı konumda kendi arama görevini durdurmuştur. Deneyin başarılı olduğu Şekil 4.4.(b)'de gösterilmiştir çünkü bir birinden farklı konumlarda yerleştirilen gaz kaynaklarının konumlarına yakın mesafede robotlar toplanmış ve kaynakların olduğu konum ortamın kimyasal gaz yoğunluğunun en yüksek olan bölgeleri olarak tespit edilmiştir.



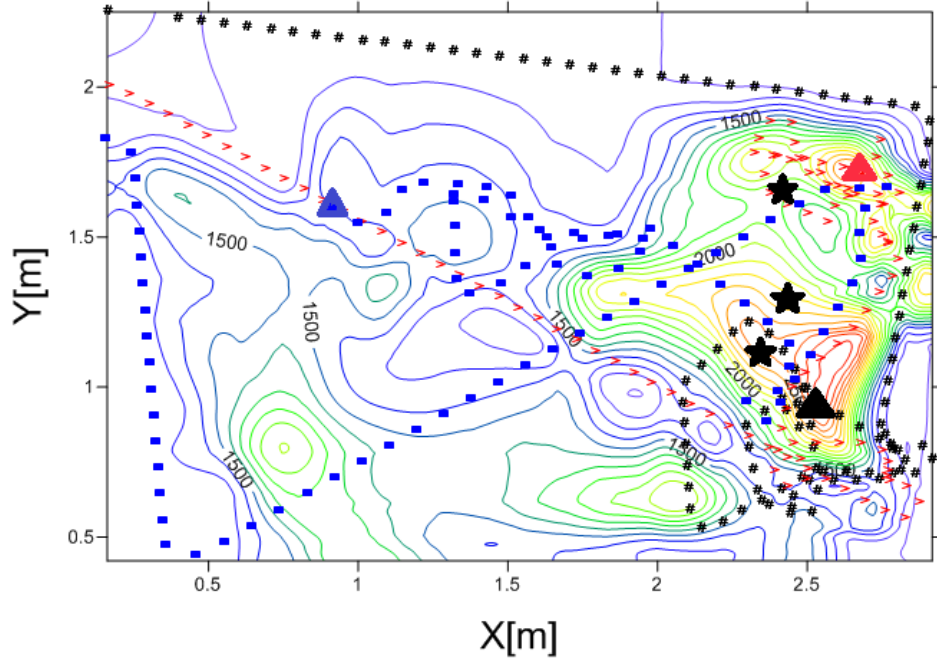
(a) Gezgin robotların güzergahları.



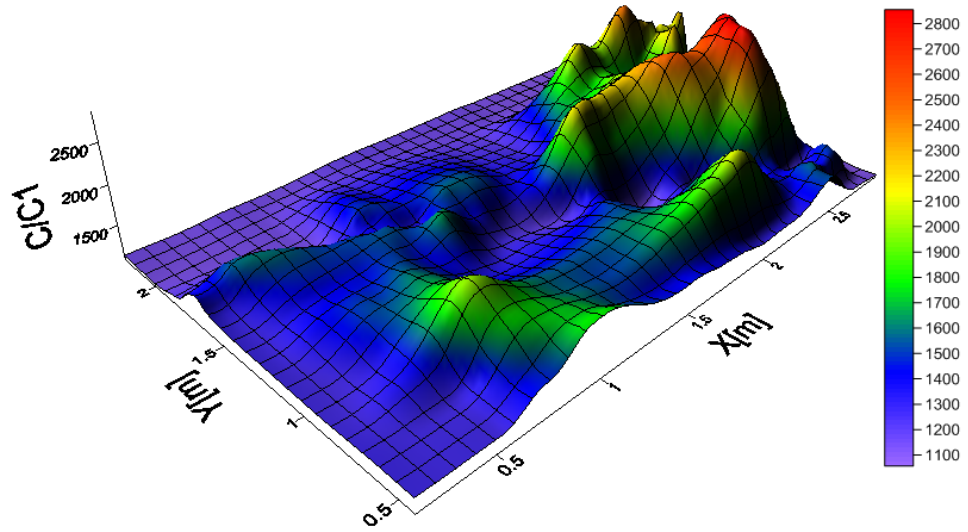
(b) Kimyasal gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.

Şekil 4.3.: Bir birine yakın olan üç farklı kaynaktan yayılan gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.

Uygulanan Bakteri Beslenmesi Eniyileme yöntemin performansın daha iyi bir şekilde denemek için son deneyde etanol gaz kaynakları bir birinden çok uzak mesafede (1.2, 0.8), (2.4, 0.55), ve (2.5, 1.7) konumlarda yerleştirmiştir ve deney sonuçları Şekil 4.5.(a)'da ve Şekil 4.5.(b)'de gösterilmiştir. Şekil 4.5.(a)'da gösterildiği gibi iki tane robot (2.4, 0.55) konumundaki kaynağa yakın mesafede görevini



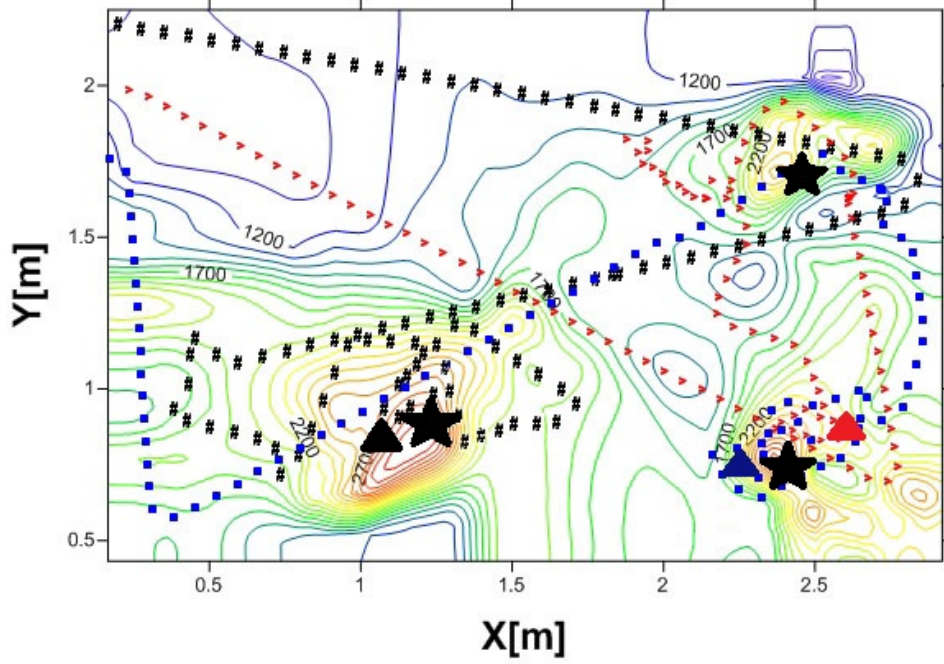
(a) Gezin robotların güzergahları.



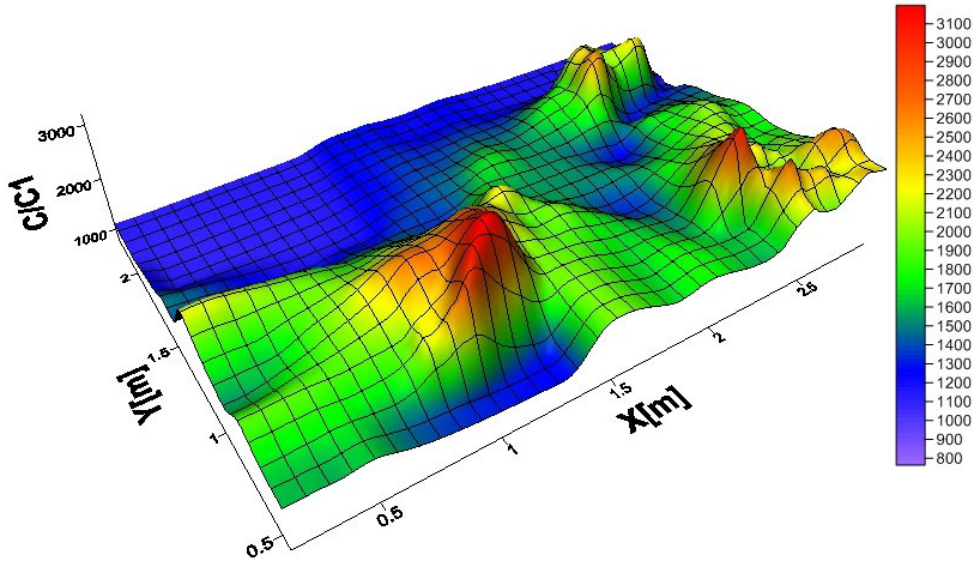
(b) Kimyasal gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.

Şekil 4.4.: Bir birine yakın olan üç farklı kaynaktan yayılan gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.

tamamlamışlardır ve diğer bir robot ise bu kaynaktan uzak mesafede yerleştirilen diğer kaynağın konumuna yakın yerde görevini tamamlamış durumdadır. Deneyden beklendiği gibi Şekil 4.5.(b)'de gösterilen kimyasal gaz yoğunluğu haritası elde edilmiştir. Başarılı olarak tanımlandığı sebepler: 1. Kaynakların konumlarına çok



(a) Gezin robotların güzergahları.



(b) Kimyasal gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.

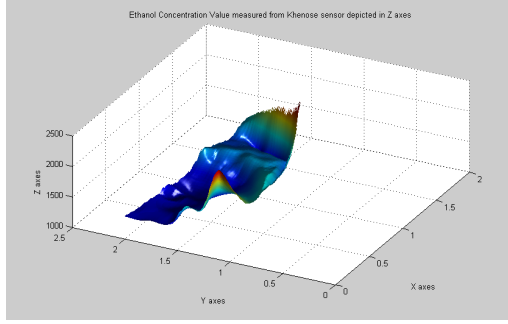
Şekil 4.5.: Bir birinden uzakta olan üç farklı kaynaktan yayılan gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.

yakın mesafede bulunan bölge kimyasal gaz yoğunluğunun yüksek olduğu bölge olarak tespit edilmiştir; 2. Robotlar en son işlemlerini kaynakların en az ikisinin konumuna yakın konumda tamamlamıştır. Her bir deney süresi yaklaşık 12-15

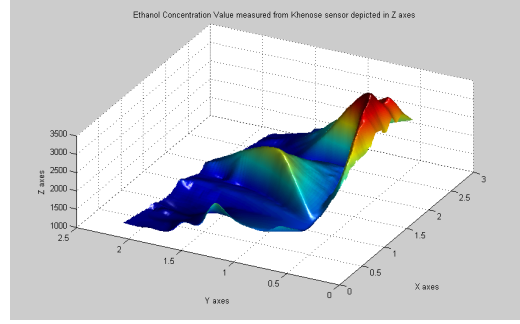


dakikadır. Deneysel süresinin ve adım sayısının artırılması durumunda tüm robotların kaynakların yakınına gitmesi beklenmektedir.

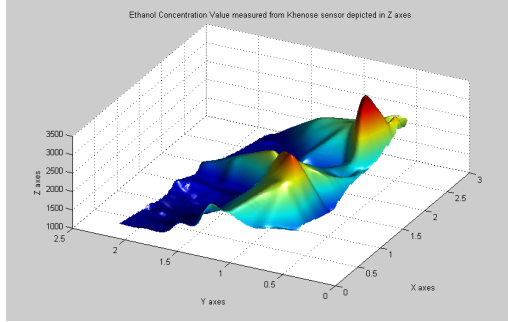
Son olarak Şekil 4.6.'da yukarıda bahsedilen son deneyin ( Şekil 4.5.(a)'daki ve Şekil 4.5.(b)'deki) sonuçları Matlab'dan gerçek zamanlı elde edilen ortamın gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritaları farklı zamanlarda kare şeklinde gösterilmiştir. Kareler sıralı biçimde 3'ncü, 6'ncı, 9'ncü ve 12'nci dakikalarda robotlar tarafından gönderilen verileri kumanda merkezinde elde edilen veriler işlenip periyodik bir biçimde yansıtılmıştır. Matlabda elde edilen verilere dışdeğerleme işlemi uygulanmamıştır ve robotlar ziyaret etmediği bölgeler boş olarak gösterilmiştir. Dışdeğerleme problemi Surfer9 yazılımının deneme sürümü ile çözülmüştür. Surfer9



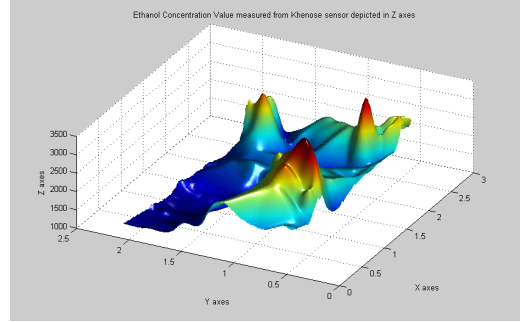
(a) 3. dakikadaki Matlab'dan alınan ortamın 3 boyutlu haritası.



(b) 6. dakikadaki Matlab'dan alınan ortamın 3 boyutlu haritası.



(c) 9. dakikadaki Matlab'dan alınan ortamın 3 boyutlu haritası.



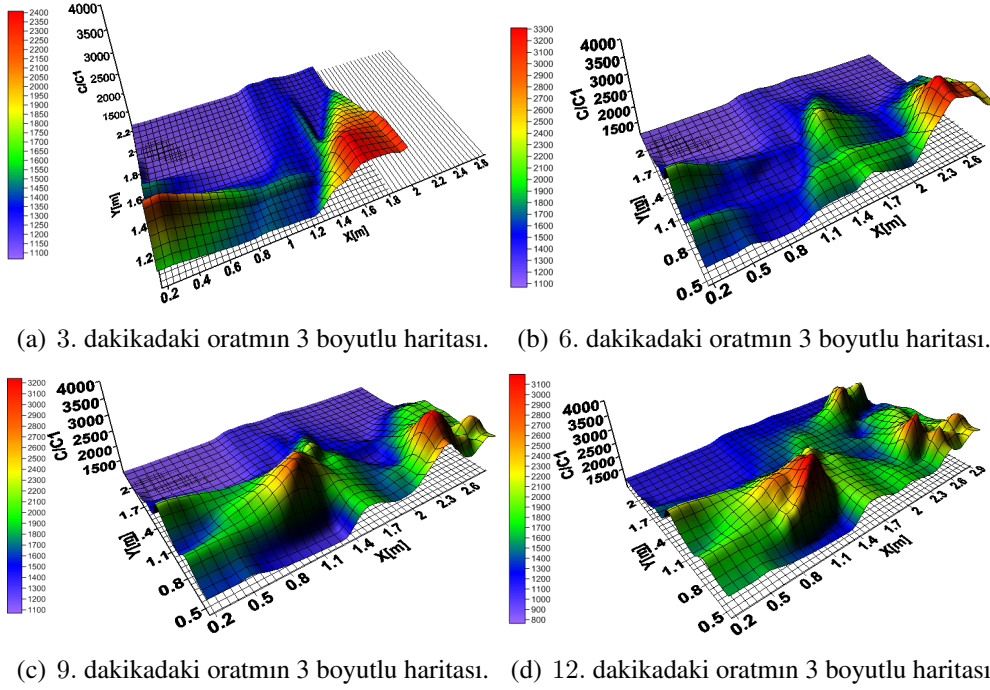
(d) 12. dakikadaki Matlab'dan alınan ortamın 3 boyutlu haritası.

Şekil 4.6.: Matlab yazılımı ile gerçek zamanlı elde edilen 3 boyutlu ara zamanlarda kimyasal gaz yoğunluğu haritası.

yazılımı ile elde edilen deneyin 3'ncü, 6'ncı, 9'ncü ve 12'nci gerçek zamanlı sonuçları Şekil 4.7.'de ve Şekil 4.8.'de gösterilmiştir. Şekil 4.7.'de robotların kimyasal algılayıcılarından ölçülen veriler ile elde edilen 3 boyutlu gaz yoğunluğu haritaları gösterilirken Şekil 4.8.'de kimyasal gaz ortamın kontur çizesi betimlenmiştir. Son

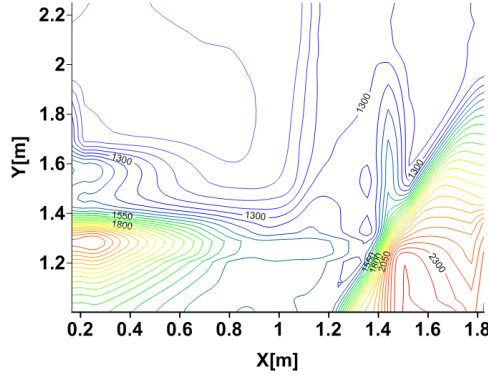
deney toplam 13 dakika sürmüştür. Şekillerden görüldüğü gibi robotların taradığı alan büyüyünce elde edilen 3 boyutlu haritanın da daha belirgin hale gelmesi gerçekleşmiştir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen uygulamada donanım yetersizliğinden kaynaklanan 3 adet “KheNose” kimyasal algılayıcıları ile donatılan 3 adet robot kullanılmıştır. Üçten fazla robot kullanarak da daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Fakat uygulamadaki kullanılan alanın boyutu yeterince büyük olmadığından robot sayısını artırılması arama performansını olumsuz yönden etkileyebileceği durumu da söz konusudur. 3. Bölümde uygulamadaki gaz yoğunluğu haritalama problemi ele

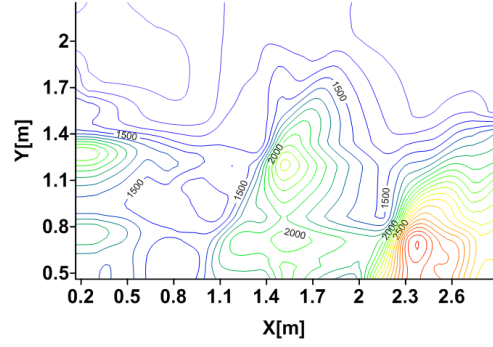


Şekil 4.7.: Ortamın Golden Surfer9 yazılımı ile gerçek zamanlı elde edilen 3 boyutlu ara zamanlarda kimyasal gaz yoğunluğu haritası.

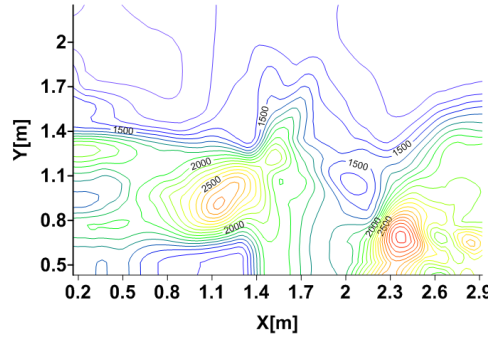
alınmıştır ve Eşzamansız Parçacık Sürü Eniyileme yöntemi ile haritalama uygulaması gerçekleştirilmiştir. Orada Dağıtık ve Eşzamansız PSO yönteminde erkinler kendilerinin en yüksek algıladığı değerleri aralarında paylaşarak gaz yoğunluğu haritasını elde etmişlerdir. Fakat Bakteri Beslenmesi Eniyileme yönteminde ise her bir robot sadece kendisi elde ettiği değerlere göre uygulamayı tamamlamıştır. Böylece Eşzamansız PSO yönteminde robotlar ortamın gaz yoğunluğunun en yüksek olduğu bölgeye toplanmışlardır. Genelde bu bölge gaz yoğunluğunun yerel en yüksek olduğu



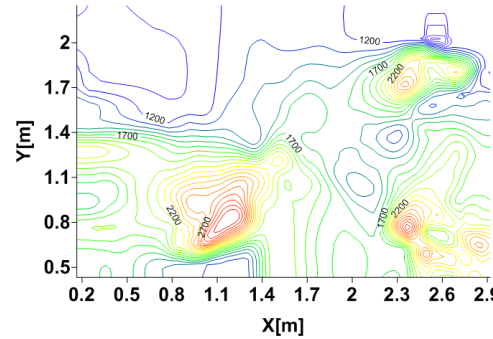
(a) 3. dakikadaki oratmın kontür çizgesi.



(b) 6. dakikadaki oratmın kontür çizgesi.



(c) 9. dakikadaki oratmın kontür çizgesi.



(d) 12. dakikadaki oratmın kontür çizgesi.

Şekil 4.8.: Ortamın Golden Surfer9 yazılımı ile gerçek zamanlı elde edilen ara zamanlarda kimyasal gaz yoğunluğu kontür haritası.

bölgesi olmaktadır. Fakat bazı uygulamalarda farklı konumdaki kaynak sızıntılarını tespit edilmesi gerekmektedir. Bu bölümde uygulanan yöntemin sonuçlarına bakıldığında robotların bir birinden farklı konumlarda ve farklı kaynakların yakın konumlarda görevlerini tamamladığını tespit edilmiştir. Böylece Bakteri Beslenmesi Eniyileme yöntemi ile kimyasal gaz yoğunluğunun haritalanması birden fazla gaz kaynağından yayılan bir ortamın tek bir kaynağın etrafına toplanıp ilgili kaynağı tespit etmek yerine birden fazla kaynağın konumu aranması ve aynı zamanda belirlenmesi görevinde başarılı olabileceği düşünülmektedir.

## BÖLÜM 5

### 5. KARINCA KOLONİSİ BESLENMESİ TABANLI ENİYİLEME YÖNTEMİ İLE KİMYASAL GAZ YOĞUNLUĞU HARİTALANMASI

#### 5.1. Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı Eniyileme Alogritmasının Genel Özellikleri

Bu bölümde Dorigo [56] tarafından geliştirilen Karınca Kolonisi Eniyileme yönteminin yapılan çalışmalarda kullanılan iyileştirilmiş sürümlerinden bahsedilecektir. Dorigo tarafından ortaya atılan Karınca Kolonisi Eniyileme yöntemi gezgin satıcı ve en kısa yol problemlerinin çözümü için uygundur. Daha sonra [63, 64]'da yapılan çalışmalarda bu yöntemden esinlenilerek Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı robot arama yöntemi uyarlanmıştır. Uyarlanan bu yöntemde gezgin robotlar, karıncalar arasındaki hiyerarşiye benzetilerek *arayıcı*<sup>1</sup> ve *yerleşik*<sup>2</sup> robotlar olarak iki kısma ayrılmıştır. Bu yöntemde başlangıçta tüm robotlar ortamdaki gaz yoğunluğunun yüksek olduğu kaynakları birbirleri ile haberleşerek arayan *arayıcı* robot statüsünde başlar ve gaz kaynaklarının yakınında sahip olduğu konumu koruyan *yerleşik* robot durumuna geçer. Robotlar, *yerleşik* robot statüsüne geçmek için sırası ile yerel arama, genel arama ve feromon<sup>3</sup> güncellenmesi adımlarını gerçekleştirir. [63, 64]'da yapılan çalışmalarda *arayıcı* gezgin robotlar her iterasyonun başlangıcında yerel arama yapar. Yerel arama sırasında elde ettikleri en yüksek gaz yoğunluğuna sahip bölgelerde son konumlarını alarak yerel arama adımını sonlandırıp genel arama adımına geçerler. Genel arama sırasında yerel aramada elde edilen yüksek gaz yoğunluğu değeri önceden belirlenen *eşik değeri* ile kıyaslanır. Elde edilen değer *eşik değeri*'nden düşük ise *arayıcı* gezgin robot rastgele konum değiştirme yapar. Ters durumda ise

$$P_{ij} = \frac{\tau_j(t)^\alpha \eta_{ij}(t)^\beta}{\sum_{j=1}^m \tau_j(t)^\alpha \eta_{ij}(t)^\beta} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (5.1)$$

ifadesini kullanarak *yerleşik* olmayan tüm robotlar için olasılık hesabı yapar ve hesaplanan olasılık değeri en yüksek robota doğru hareket eder. Bu denklemde  $n$  uygulamada kullanılan gezgin robot sayısını ve  $\tau_j(t)$  değeri  $j_{nci}$  arayıcı gezgin robotun

---

<sup>1</sup>ing: Searchers

<sup>2</sup>ing: Residents

<sup>3</sup>ing: Pheromone

feromon miktarını,  $\eta_{ij}(t)$  değeri seçilen metasezgisel fonksiyonu,  $\alpha$  ve  $\beta$  parametreleri uygulandıkları değerlerin ağırlıklarını belirlemek için kullanılmıştır. Denklemden yer alan  $\eta_{ij}(t)$  metasezgisel fonksiyon için [64]'de üç adet metasezgisel fonksiyon benzetim ortamında uygulanmış ve yapılan performans değerine göre kıyaslamada en verimli sonuçlar

$$\eta_{ij}(t) = \begin{cases} e^{C_{ij}(t)}, & j \neq i, j \in \text{Arayıcı}, \\ e^{C_i(t)}, & j=i, j \in \text{Arayıcı}, \\ 0, & j \notin \text{Arayıcı}. \end{cases} \quad (5.2)$$

uygulandığında elde edildiği gözlemlenmiştir [64]. Fonksiyonda yer alan  $C_i(t)$  değeri  $i_{nci}$  arayıcı gezgin robotunun gaz yoğunluk ölçümünü,  $C_{ij}(t) = C_i(t) - C_j(t)$  değeri ise  $i_{nci}$  ve  $j_{nci}$  arayıcı gezgin robotlarının gaz yoğunluk ölçüm değerleri arasındaki farkı belirtmek için kullanılmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan denklemlerde, Dorigo ve arkadaşları tarafından yapılan [56]'teki çalışmada yer alan denklemler esas alınmıştır.  $i_{nci}$  arayıcı gezgin robotun Denklem (5.1)'e göre hesaplanan olasılık değerlerinin en yükseğine sahip olan robota doğru

$$S = RD_{ij}(t) \quad (5.3)$$

denklemden elde edilen yaklaşma adımına göre hareket ederek olasılıksal konum değiştirme adımını gerçekleştirir. Denklemden  $R$  değeri  $0 < R < 1$  aralığında üretilen rastgele bir sayıyı  $D_{ij}(t)$  ise iki gezgin robot arasındaki Öklid uzaklığını belirtmek için kullanılmıştır.

Rastgele veya olasılıksal konum değiştirme adımını gerçekleştiren arayıcı gezgin robotlar genel aramayı bitirmiş olur. Genel arama sonunda arayıcı gezgin robotlar

$$\tau_i(t+1) = (1 - \rho)\tau_i(t) + \sum_{j=1}^k \Delta C_j(t) \quad (5.4)$$

denklemine göre sahip olduğu feromon miktarını günceller. Denklemden yer alan  $\tau_i(t)$  gezgin robotun sahip olduğu feromon miktarını,  $\Delta C_j(t)$ ,  $i_{nci}$  arayıcı gezgin robotun bulunduğu konuma doğru yaklaşan  $j_{nci}$  arayıcı robotunun gaz yoğunluğu ölçümündeki artışı ve  $\rho$  feromonun buharlaşma miktarını belirten  $0 < \rho < 1$  aralığında olan sabit sayıyı belirtmek için kullanılmıştır.

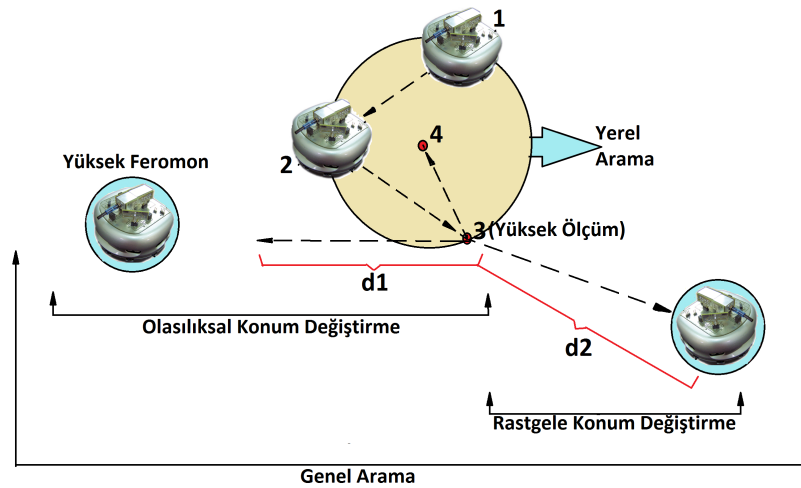
Feromon güncellenmesi adımından sonra, robotlar önceden belirlenmiş kimyasal gaz kaynağının eşik değerinin üstünde gaz yoğunluğu ölçümü yaptığında veya belirli bir

iterasyon değeri kadar yüksek gaz ölçümünü tekrarlandığında, gezgin robot arayıcı konumdan yerleşik konuma geçer ve diğer robotlarla iletişimi keser. Böylece başka arayıcı robotun aynı kimyasal gaz kaynağının yakınında konum alması engellenmeye çalışılmıştır.

## 5.2. Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı Eniyileme Yönteminin Çok Robotlu Arama Sisteminde Uygulanması

Bu bölümde uygulamada kullanılan Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı Eniyileme yönteminin Khepera III gezgin robotları üzerinde kullanılarak kimyasal alanın haritalanması ve gezgin robotların kimyasal kaynakların yakınında konumlandırılması anlatılacaktır.

Uygulamanın başlangıç aşamasında robotlar uygulama alanının giriş kısmında konumlandırılmış ve hareket edecekleri ilk noktalar önceki bölümlerde anlatılan uygulamalarda olduğu gibi birbirinden uzak olacak şekilde seçilmiştir. Robotların hareket edeceği bir sonraki noktalar (ikinci yol noktaları) ise rastgele belirlenmiştir. İlk iki hareket noktalarının seçimi robotların alana en etkin biçimde dağılması ve kimyasal gaz yoğunluğunun haritalanması için Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı Eniyileme yönteminin daha iyi sonuçlar üretmesi için yapılmıştır. Robotlar uygulamanın her aşamasında konum bilgileri ve algılayıcı okumalarında elde ettikleri verileri kablosuz ağ üzerinden kumanda merkezi ile paylaşmışlardır. Rastgele üretilen konumlara



Şekil 5.1. Karınca Kolonisi Beslenmesi Yönteminin Görselleştirilmesi.

(ikinci yol noktalarına) ulaşılmasının ardından Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı

Çizelge 5.1. Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı Eniyileme Yöntemin Sözde Kodu.

```
Değişkenlerin tanımlanması
İlk hareket noktasını ata
while (Robot belirlenen noktasına ulaşmadı) do
    Çevredeki gaz yoğunluğunu algıla
    Algılanan verileri kumanda merkezine gönder
end while
İkinci hareket noktasını rastgele belirle
while (Robot belirlenen noktasına ulaşmadı) do
    Çevredeki gaz yoğunluğunu algıla
    Algılanan verileri kumanda merkezine gönder
end while
while (Maksimum iter sayısına ulaşılmadı veya Yerleşik durumuna geçmedi ise) do
    // Yerel arama
    Belirlenmiş örüntü (üçgen köşeleri ve ağırlık merkezi) noktalarına git ve ölçümü
    al
    Algılanmış en yüksek  $C_{yüksek}(i)$  noktaya git
    Algılanan verileri kumanda merkezine gönder
    // Genel arama
    Algılayıcı verilerini oku  $C_{güncel}(i)$ 
    Algılanan verileri kumanda merkezine gönder
    if ( $C_{yüksek}(i) < C_{ort}$ ) ve ( $q > q_0$ ) Denklem (5.5)'a göre then
        Rastgele konum değiştir
        Algılanan verileri kumanda merkezine gönder
    else
        Denklem (5.1)'e göre konumu Olasılıksal olarak değiştir
        Algılanan verileri kumanda merkezine gönder
    end if
    Feromon miktarını Denklem (5.4)'e göre güncelle
    if (Yerleşik duruma geçme koşulu sağlandı ise) then
        Yerleşik duruma geç ve haberleşmeyi kes
    end if
end while
```

Eniyileme yönteminin uygulanmasına geçilmiştir. Gezgin robotlar Şekil 5.1.'de görselleştirildiği gibi yerel arama adımını gerçekleştirmek için kenar uzunluğu önceden belirlenen eşkenar üçgenin köşelerinde ve üçgenin ağırlık merkezinde (Şekil 5.1.'de görülen 1,2,3 ve 4 ile numaralandırılmış nokta) gaz yoğunluğu ölçümü yapmaktadır. Böylece ölçülen gaz yoğunluğu değerlerinin kıyaslamasını yaparak en yüksek gaz yoğunluğunun algılandığı noktayı son hareket edeceği nokta olarak belirleyip ve ölçüm değerini diğer gezgin robotlar arasında paylaşarak yerel arama aşamasını tamamlamaktadır.

Genel arama bölümünde gezgin robotlardan edindikleri ölçüm değerlerini kullanarak gaz yoğunluğunun aritmetik ortalamasını  $C_{ort}$  kendi yaptığı ölçümle kıyaslayarak

$$C_i < C_{ort} \text{ ve } q > q_0 \quad (5.5)$$

koşulunun sağlanması durumunda Şekil 5.1.'de görselleştirildiği gibi rastgele  $d2$  mesafesini alarak konum değiştirme, sağlanmaması durumunda ise Denklem (5.1)'ten elde ettiği en yüksek değere sahip olan gezgin robota doğru Denklem (5.3) ile elde edilen değere ( Şekil 5.1.'de görülen  $d1$  mesafesi) göre konumunu günceller. Uygulama düzeneğinde var olan gaz yoğunluğu dinamik yapıya sahip olduğundan belirli bir eşik değeri kadar fark olması durumunda hesaplanan ortalama değerinin güncellenmesi sağlanmıştır. Genel arama adımını tamamlayan gezgin robotlar feromon değerlerini Denklem (5.4)'e göre güncelleyerek sahip olduğu gaz yoğunluğu ölçüm değerlerindeki iyileştirmeyi diğer gezgin robotlar arasında paylaşılması sağlanmıştır.

Ölçüm yapılan alanda gezgin robot okuduğu değeri  $C_i$ , okunan değerlerin ortalaması  $C_{ort}$ ,  $q_0 \in ]0,1[$  sabit sayıyı,  $q$  ise aynı aralıkta üretilen rastgele sayıyı ifade etmek için kullanılmıştır [63]. Uygulanan yöntemin sözde kodu Çizelge 5.1.'de gösterilmiştir.

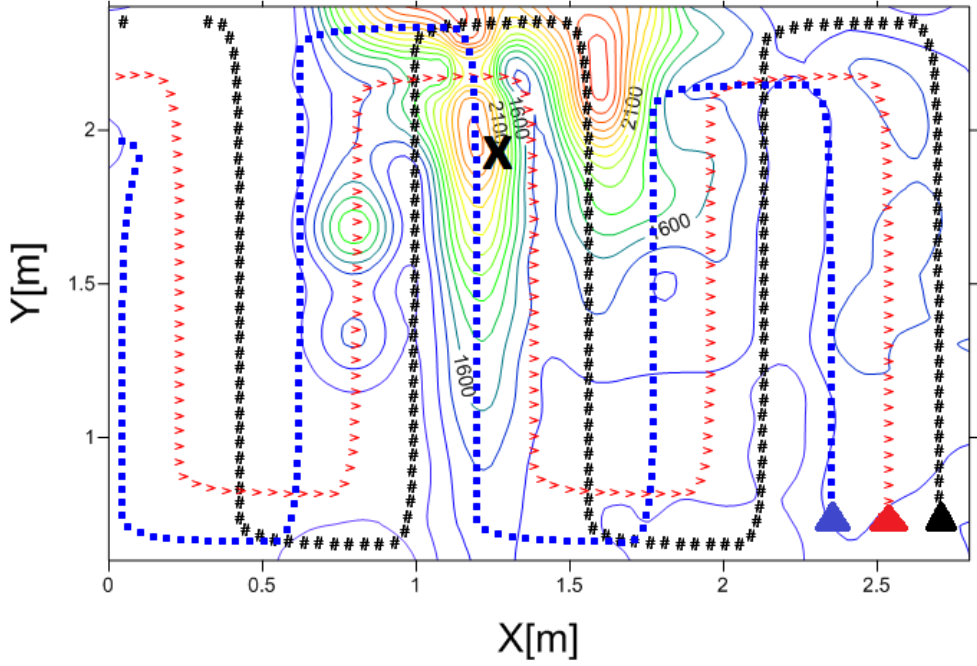
Genel arama kısmını tamamlayan robotlar buldukları bölgelerden algıladıkları gaz yoğunluğu farkları eşik değerinin üstünde ise ve belirli bir iterasyon değeri kadar tekrarlanan ölçümler yaptıkları takdirde, **arayıcı** gezgin robot bulunduğu kimyasal gaz kaynağının yakınında son konumunu korur ve diğer robotlarla olan iletişimi keserek **yerleşik** robot statüsüne geçer. Yapılan deneylerde iterasyon sayısı aşıldığında gezgin robotlardan en az birinin kimyasal gaz kaynağının yakınında konum almış ve uygulama ortamında var olan gazın kimyasal haritalandırılması gerçekleşmiştir.

### 5.3. Uygulama Sonuçları ve Tartışma

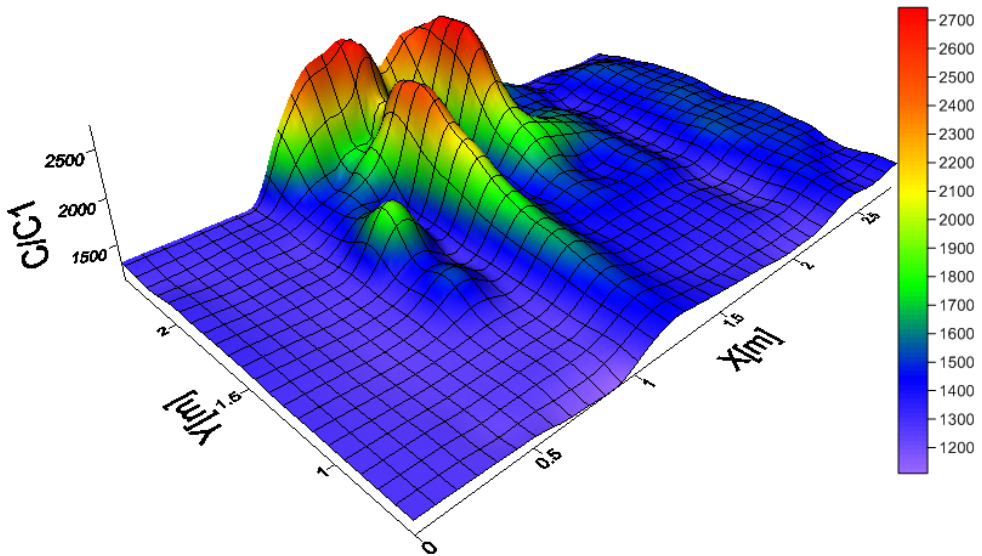
Bu bölümde uygulama ortamında var olan kimyasal gazın haritalandırılması ve gaz kaynaklarının bulunması problemine karşı gezgin robotlar yardımı ile Karınca Kolonisi Beslenmesi yönteminin uygulanmasından elde edilen sonuçlar tartışılacak ve sonuçların iyileştirilmesi için uygulanması gereken olası çözümlere yer verilecektir.

Uygulama sonunda elde edilen haritanın tutarlılığı hakkında kıyaslama yapmak için gezgin robotların Şekil 5.2.(a)'da robot güzergahlarının görüldüğü biçiminde alanı düzgün tarayarak Şekil 5.2.(b)'se görülen tek kaynaktan yayılan kimyasal gazın yoğunluğunun haritalandırılması yapılmıştır. Gösterilen güzergah ve gaz yoğunluğu





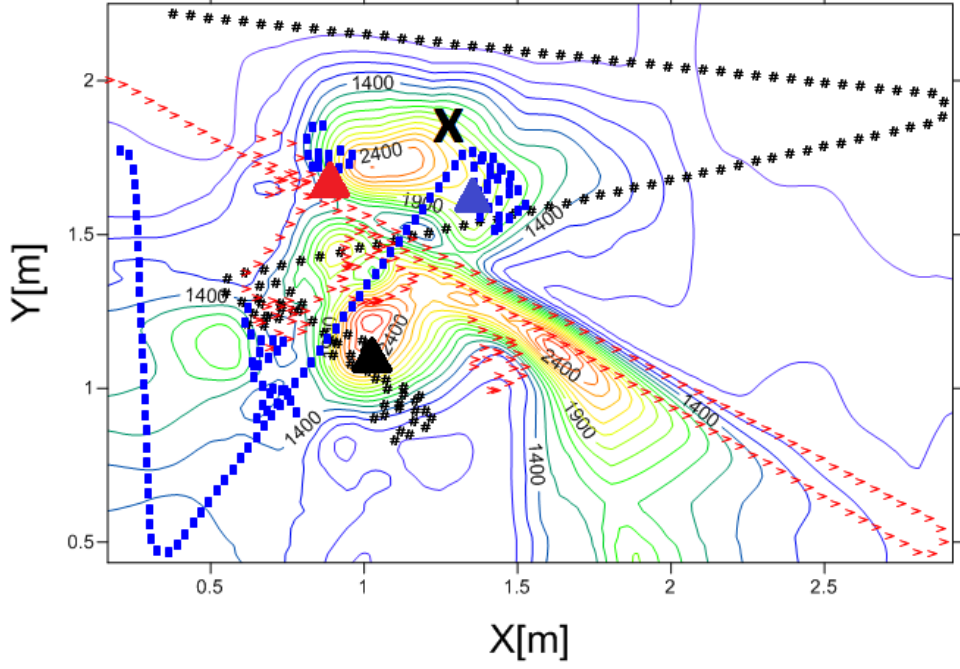
(a) Gezgin robotların güzergahı.



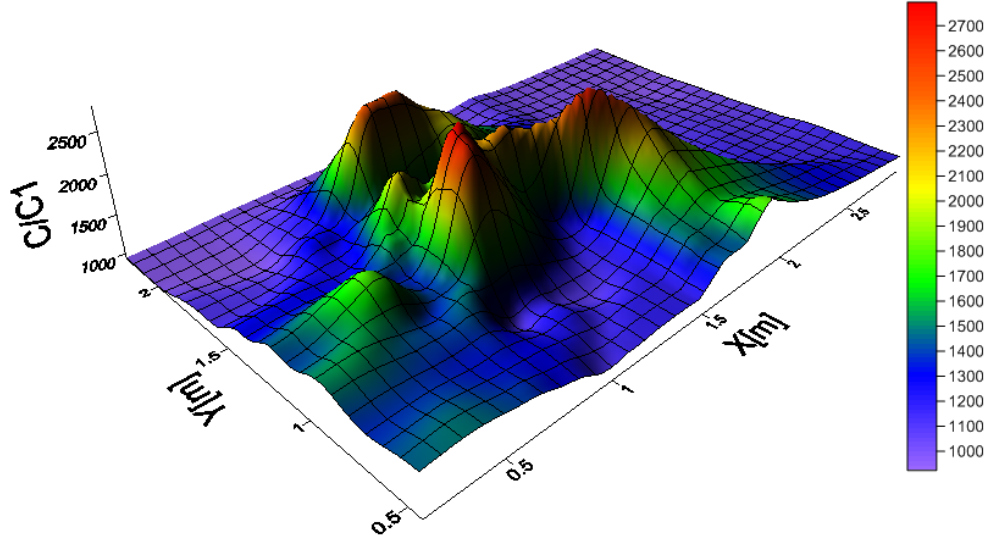
(b) Tek kaynaktan yayılan gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.

Şekil 5.2. Sweeping yöntemi ile kimyasal gaz yoğunluğu haritalanması.

haritalarında gezgin robotların aldığı son konumlar  $\Delta$  ile kimyasal gaz kaynaklarının konumu ise  $X$  sembolü ile gösterilmiştir.



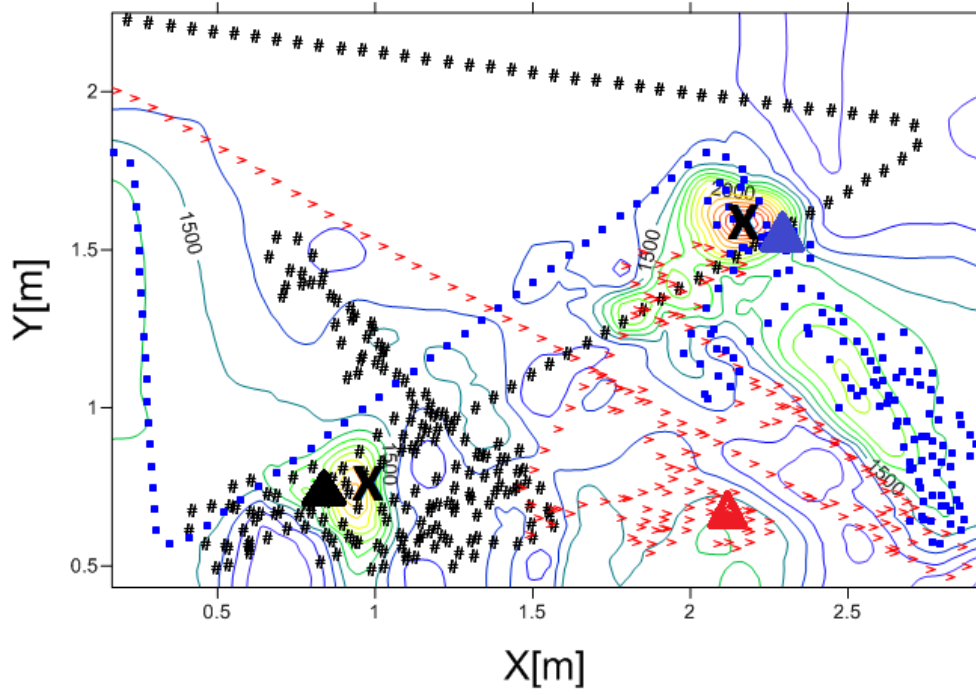
(a) Gezgin robotların güzergahı.



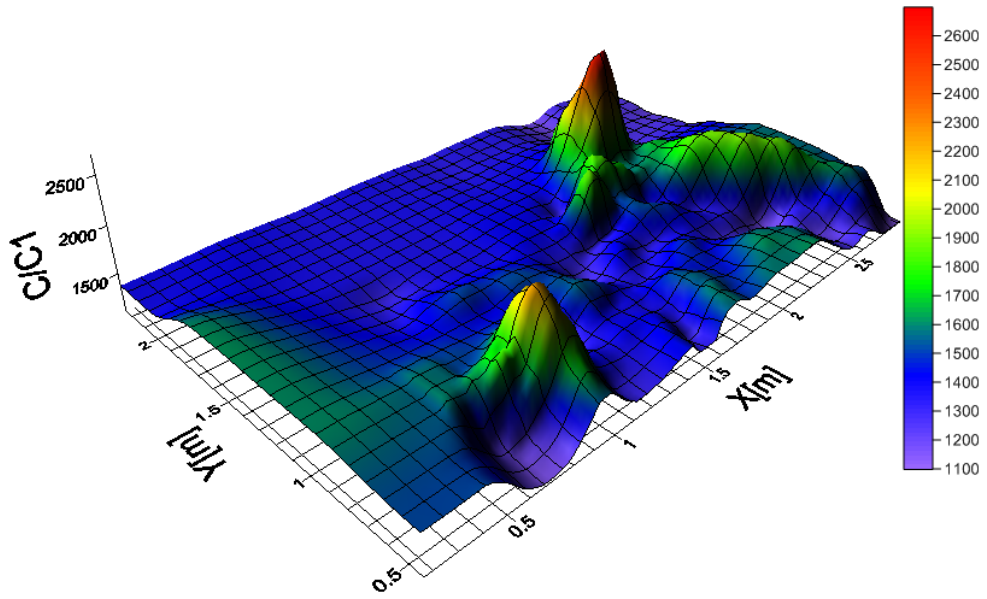
(b) Tek kaynaktan yayılan gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.

Şekil 5.3.: Karınca Kolonisi Eniyileme yöntemi ile kimyasal gaz yoğunluğu haritalanması.

Uygulama alanının taranarak elde edilen kimyasal gaz yoğunluğunun haritalanması işleminden sonra Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı Eniyileme yönteminin gezgin robotlar yardımı ile tek kaynaktan yayılan kimyasal gazın haritalanması Şekil



(a) Gezgin robotların güzergahı.



(b) İki kaynaktan yayılan gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritası.

Şekil 5.4.: Karınca Kolonisi Eniyileme yöntemi ile kimyasal gaz yoğunluğu haritalanması.

5.3.(b)'de gerçekleştirilmiş ve gezgin robotlar Şekil 5.3.(a)'da görünen güzergahları izleyip gaz kaynağına yakın yerlerde son konumlarını almışlardır.

Elde edilen haritalar arasında büyük benzerliklerin var olduğu gözlemlenmiştir. Haritalar arasında var olan farkların yapılan uygulamada gerçek gazın kullanımı ve uygulamanın sonucunu etkileyen koşulların dinamik yapıda olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kullanılan gezgin robot sayısının artması ve gaz akışkanlığını etkileyen basınç ve sıcaklık benzeri dinamik etmenler kontrol altında tutulduğu ve iterasyon sayısının artırıldığı uygulamalarda çıkarılan haritalar arasındaki farkların azalacağı düşünülmektedir. Yapılan bir başka deneyde ortama gaz akışı sağlayan iki kaynak kullanılmış ve gezgin robotların Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı Eniyileme yöntemi ile farklı kaynakların yakın yerlerinde konumlandıkları gözlemlenmiştir. Şekil 5.4.(a)'da elde edilen haritanın kontur çizgileri üzerinde robotların güzergahları ve son konumları kaynakların konumları ile birlikte gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi robotların ikisi aramasını kaynakların çok yakınında bitirmiştir. Bu deneyde elde edilen üç boyutlu harita Şekil 5.4.(b)'de gösterilmiştir. Gaz kaynaklarının konumları göz önünde bulundurularak elde edilen haritalar gerçekçi görünmektedir.

## BÖLÜM 6

### 6. SONUÇ

#### 6.1. Yorumlar

Bu tez çalışmasında biyolojik tabanlı eniyileme yöntemleri ile bilinmeyen bir ortamın kimyasal gaz yoğunluğunun 3 boyutlu haritalaması çoklu robotlar yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bilinmeyen bir ortamın aranmasında birden fazla gezgin robot kimyasal gaz bulunan bir ortamın gaz yoğunluk haritasını çıkartmışlardır. Arama görevini yerine getirmek için robotlar algılayıcı verilerini ve konum bilgilerini *TCP/IP* protokolü üzerinden kablosuz *tasarsız* ağı aracılığıyla kendi aralarında ve kumanda merkezi ile paylaşmaktadırlar. Kumanda merkezinde robotlardan elde edilen veriler *MATLAB* ve *Golden Surfer9* yazılımının deneme sürümü ile işlenerek kimyasal gaz yoğunluğunun gerçek zamanlı 3 boyutlu haritası çıkarılmıştır ve gerçek zamanlı olarak operatöre sağlanmıştır. Belirlenen görevin içeriğine göre bilinmeyen ortamın kimyasal gaz yoğunluğunun haritalanması sırasında özerk gezgin robotların güzergahlarının planlanması ve gaz yoğunluğunun en yüksek veya en düşük noktalarına hareket etmesi Eşzamansız Parçacık Sürü Eniyileme, Bakteri Beslenmesi Tabanlı Eniyileme ve Karınca Kolonsi Beslenmesi Tabanlı Eniyileme yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir.

Arama ve haritalama görevinde uygulanan Eşzamansız ve Dağıtık PSO yönteminin performans açısından daha verimli ve haberleşme problemleri ya da donanımsal problemlere karşı gürbüz ve dayanıklı olduğunu denemek amacı ile aynı deneysel düzenek üzerinde Temel PSO yöntemi de uygulanmıştır. Temel Parçacık Sürü Eniyileme yöntemi uygulamada robotların konum güncellemesi eşzamanlı biçimde gerçekleşmiştir ve robotlar kendilerinin PSO tabanlı konumunu güncelledikten sonra diğer robotların konumlarını güncellemesini beklemişlerdir. Böylece Temel PSO kimyasal gaz kaynaklarının yakınına toplanmasına rağmen deneyin çok uzun süre sürdüğü tespit edilmiştir. Temel Parçacık Sürü Eniyileme yöntemin çoklu robot arama görevinde uygulandığı zaman yöntemin eşzamanlı veri değişme ve haberleşmesi özelliği yöntemin arama performansını düşürmüştür. Üstelik eşzamanlı veri değişmesi çoklu robot haritalaması sırasında yapay biçimde tek bir robotun üzerinde uygulanan haberleşme hasarından dolayı robotların görevi tamamlayamadan ortamın kimyasal gaz yoğunluğu haritası eksik ve gerçekdışı biçimde elde etmiştir. Fakat uygulanan Eşzamansız ve Dağıtık PSO yönteminde ise Temel PSO yönteminde kullanılan

aynı koşullarda bir robotun kasten haberleşmesini keserek deneyi başarılı biçimde tamamladığı gözlemlenmiştir. Tek bir robot diğer robotlar ile haberleşmesini koparırsa ve hareketsiz kalsa bile yöntem eşzamansız gerçekteştiğinden dolayı diğer robotlar bozulan robotu beklemeden aralarında paylaşılan bilgilere ve kendilerinin eski değerlerini kullanarak bir sonraki gideceği konumu güncellemişlerdir. Böylece elde edilen ortamın kimyasal gaz yoğunluğu haritası gerçekteci biçimde elde edilmiştir.

Eşzamansız Parçacık Sürü Eniyileme yöntemi parçacıklar/robotlar arası bilgi paylaşımından dolayı yardımlaşmalı bir yöntemdir. Fakat Bakteri Beslenmesi Eniyileme yönteminde ise her bir robot sadece kendileri elde ettiği değerlere göre uygulamayı tamamlamışlardır. Robotların hareketleri bakterilerin besin arama davranışlarını esas olarak kullanmışlardır. Başka bir değişle robotlar bir sonraki gideceği noktayı Bakteri Beslenmesi Eniyileme yöntemindeki bakterilerin kemotaktik davranışlarını taklit ederek hesaplamışlardır. Bakteri Beslenmesi Eniyileme yöntemi ile elde edilen sonuçlara bakıldığında robotların bir birinden farklı konumlarda ve farklı kaynakların yakın konumlarda görevlerini tamamladığı ve böylece aynı zamanda birden fazla kaynağı bulabildiği tespit edilmiştir. Böylece Bakteri Beslenmesi Eniyileme yöntemi ile kimyasal gaz yoğunluğunun haritalanması farklı kaynaklardan yayılan bir ortamın kaynak konumu aranması görevinde başarılı olmuştur. PSO'da ise genellikle robotlar aynı kaynak etrafında kümelenmişlerdir ve bu şekilde ortamda birden fazla kaynak olsa dahi sadece birini tespit etmişlerdir.

En son olarak bu tez çalışmasında Karınca Kolonisi Beslenmesi Tabanlı Eniyileme yöntemi çoklu robotlar arama ve kimyasal gaz yoğunluğu haritalamasında kullanılmıştır. Bu yöntemde başlangıçta tüm robotlar ortamdaki gaz yoğunluğunun yüksek olduğu kaynakları birbirleri ile haberleşerek arayan *arayıcı* robot statüsünde başlamıştır ve gaz kaynakları bulunduğu anda kaynağın yakınında sahip olduğu konumu koruyan *yerleşik* robot durumuna geçmiştir. Robotlar, *yerleşik* robot statüsüne geçmek için sırası ile yerel arama, genel arama ve feromon güncellenmesi adımlarını gerçekteşirmiştir. Arama ve haritalama sırasında robotlar pozisyon bilgilerini, algılayıcı verilerini ve bu veriler kullanılarak hesaplanan feromon miktarlarını diğer robotlar ile paylaşmış ve kumanda merkezine kablosuz ağ üzerinden eř zamanlı olarak aktarmışlardır. Uygulanan yöntemde çeşitli konumlardan yayılan gaz sızıntıları kullanılmıştır. Yöntemin tutarlığını denemek amacı ile aynı koşullarda Süpürme<sup>1</sup> yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen haritalar arasında büyük benzerliklerin var olduğu gözlemlenmiştir. Haritalar arasında var olan farkların yapılan diğer uygulamalardan

---

<sup>1</sup>ing: Sweeping

farklı olarak uygulamada gerçek gazın kullanımı ve uygulamanın sonucunu etkileyen koşulların dinamik bir yapıda olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kullanılan gezgin robot sayısının artması ve gaz akışkanlığını etkileyen basınç ve sıcaklık benzeri dinamik etmenler kontrol altında tutulduğu ve iterasyon sayısının artırıldığı uygulamalarda çıkarılan haritalar arasındaki farkların azalacağı düşünülmüştür.

Son olarak bu tez çalışmasında biyolojik tabanlı eniyileme yöntemleri çok robotlu sistemlerin bilinmeyen bir ortamdaki arama görevinde kullanılması yöntemlerin farklı bir uygulama alanında kullanılmasına örnek teşkil etmektedir. Uygulanan yöntemler çoklu robot arama görevleri için bazı değişimler ve geliştirmeler yapılarak uyarlanmıştır ve yöntemlerdeki erkinlerin çalışma prensipleri çok robotlu sistemlerdeki robotların çalışma özellikleri ile uygunluk göstermişlerdir. Gerçekleştirilen uygulamalar sonucunda robotların gaz yoğunluğunun en yüksek olduğu bölgeye yakınsadığı gözlemlenmiştir. Bu anlamda tez çalışması amacına ulaşmıştır.

## **6.2. Gelecek Çalışmalar**

Her çalışmada olduğu gibi bu tez çalışmasının da geliştirilmesi mümkün olan veya gelecekte çalışılabilecek konular bulunmaktadır. Bu çalışmada biyolojik tabanlı eniyileme yöntemleri ile çoklu robotları kullanarak kimyasal gaz ortamın üç boyutlu haritası çıkartılmıştır. Uygulanan yöntemlerin verimliliğini ve elde edilen ortamın üç boyutlu kimyasal haritasının gerçekçi olup olmadığını denetlemek amacı ile farklı yöntemler de kullanılabilir. Örneğin arama yapılacak ortama ızgara şeklinde tüm alanı kapsayan sabit bir konuma algılayıcılar dizisi yerleştirilebilir ve algılayıcılardan alınan veriler kumanda merkezinde işlenip yansıtılabilir. Bu işlem çoklu robotların arama ve haritalama işlemleri ile eşzamanlı gerçekleştirilebilir. Böylece robotların algılayıcılarından elde edilen veriler ile ortamda yerleştirilen algılayıcılardan elde edilen veriler işlenip çıkartılan kimyasal haritanın gerçekçi olup olmadığı daha iyi gözlemlenebilir.

Bu çalışmada sınırlı sayıda robot kullanılmıştır ve ortamın boyutu robotların sayısına göre uygun olarak şekilde seçilmiştir. Dahası uygulamalarda engelsiz bir ortam kullanılmıştır. Uygulanan biyolojik tabanlı eniyileme yöntemlerin tutarlı çalışıp çalışmadığını denemek için robot sayısı arttırılabilir ve robot sayısına orantılı biçimde ortamın boyutu da farklı seçilebilir. Üstelik ortamı daha gerçekçi bir ortama benzetmek için ortama rastgele biçimde engeller yerleştirilebilir.

Çalışmada kullanılan robotların *KheNose* algılayıcı arayüz kartının sadece alkol algılama özelliği kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda arayüz kartının başka özellikleri de kullanılıp, çalışmada uygulanan yöntemler arayüz kartının başka algılama özelliklerine göre uyarlanarak kullanılabilir. Örneğin algılayıcı arayüzünde yerleştirilen rüzgar hızı ölçme algılayıcısı<sup>2</sup> ile ortamın gaz yalıtımına ortamdaki belli bir miktar turbulans olgusunun etkisi de ölçülebilir.

---

<sup>2</sup>ing: Anemometer



## KAYNAKLAR

- [1] Beni, G., Wang, J., Swarm intelligence in cellular robotic systems, Proceedings of NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems, 26-30, Tuscany, Italy, Mayıs 1989.
- [2] Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G., Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. *Oxford University Press*, New York, 1999.
- [3] Reynolds, C.W., Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model, *Comp. Graph.*, 21, 25–34, 1987.
- [4] Resnick, M., Turtles, termites, and traffic jams: explorations in massively parallel microworlds. *MIT Press*, Cambridge, MA, ABD, 1994.
- [5] LaValle, S., Lin, D., Guibas, L., Latombe, J., Motwani, R., Finding an unpredictable target in a workspace with obstacles, *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, 737–742, 1997.
- [6] Lakemeyer, G., Sklar, E., Sorrenti, D.G., Takahashi, T., eds., *RoboCup 2006: Robot Soccer World Cup X, Lecture Notes in Computer Science*, 4434, Springer, 2007.
- [7] Kube, R.C., Bonabeau, E., Cooperative transport by ants and robots, *Robotics and Autonomous Systems*, 30, 85–101, ISSN: 0921-8890, 2000
- [8] Yamaguchi, H., A cooperative hunting behavior by mobile-robot troops, *The International Journal of Robotics Research*, 18, 931–940, Eylül 1999.
- [9] Fowler, J., D'Andrea, R., A formation flight experiment, *IEEE Control Systems Magazine*, 23, 35–43, Ekim 2003.
- [10] Nardi, R.D., Holland, O., Ultraswarm: A further step towards a flock of miniature helicopters, *Swarm Robotics*, 116–128, Springer, 2006.
- [11] Uzol, O., Yavrucuk, İ., Sürü halinde uçan mikro hava araçları için akışkanlar mekaniği tabanlı güzergah belirleme yöntemi, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, (İstanbul, Sabancı Üniversitesi), 242–246, Eylül 2007.
- [12] Cortes, J., Martinez, S., Karatas, T., Bullo, F., Coverage control for mobile sensing networks, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 20, 243–255, 2004.
- [13] Nomdedeu, L., Sales, J., Cervera, E., Alemany, J., Sebastia, R., Penders, J., Gazi, V., An experiment on squad navigation of human and robots, *Proceedings of the EURON/IARP International Workshop on Robotics for Risky Interventions and Surveillance of the Environment*, (Benicassim, Spain), Ocak 2008.

- [14] Smith, R.S., Hadaegh, F.Y., Control of deep-space formation-flying spacecraft; relative sensing and switched information, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 28, 106–114, Ocak-Şubat 2005.
- [15] Somaraju, R., Schill, F., A communication module and TDMA scheduling for a swarm of small submarines, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 15, 283–306, Temmuz 2007.
- [16] Rothermich, J.A., Ecemis, M.I., Gaudiano, P., Distributed localization and mapping with a robotic swarm, *Swarm Robotics* (E. Sahin and W. M. Spears, eds.), 3342, 58–69, Springer, 2004.
- [17] Spears, W.M., Hamann, J.C., Maxim, P.M., Kunkel, T., Heil, R., Zarzhitsky, D., Spears, D.F., Karlsson, C., Where are you?, *Swarm Robotics* (E. Sahin, W. M. Spears, and A. F. T. Winfield, eds.), 4433, 129–143, Springer, 2006.
- [18] Dorigo, M., Tuci, E., Gross, R., Trianni, V., Labella, T.H., Nouyan, S., Ampatzis, C., Deneubourg, J.-L., Baldassarre, G., Nolfi, S., Mondada, F., Floreano, D., Gambardella, L.M., The SWARM-BOTS project, *Swarm Robotics - SAB 2004 International Workshop* (E. Şahin and W. M. Spears, eds.), 3342, 31–44, 2005.
- [19] Seyfried, J., Szymanski, M., Bender, N., Estaña, R., Thiel, M., Wörn, H., The I-SWARM project: Intelligent small world autonomous robots for micro-manipulation, *Swarm Robotics*, 70–83, 2004.
- [20] Winter, G., Périaux, J., Galán, M., Cuesta, P., *Genetic algorithms in engineering and computer science. John Wiley and Sons*, 1995.
- [21] Kennedy, J., Eberhart, R.C., Shi, Y., *Swarm Intelligence. Morgan Kaufmann Publishers*, San Francisco, CA, 2001.
- [22] Dorigo, M., Stützle, T., *Ant Colony Optimization. MIT Press*, Cambridge, MA, 2004.
- [23] Pham, D.T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., Zaidi, M., The Bees Algorithm - A Novel Tool for Complex Optimisation Problems, *Proceedings of IPROMS Conference*, 454-461, 2006.
- [24] Yang, L., Passino, K.M., *Swarm Intelligence: Literature Survey. Ohio State University*, Mart 2000.
- [25] Sahin, E., *Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application*, *Swarm Robotics: State-of-the-art Survey*, (E. Sahin and W. Spears, Eds.), *Lecture Notes in Computer Science (LNCS 3342)*, 10-20, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005.
- [26] “Swarm-bots: Swarms of self-assembling artifacts.” erişim adresi: <http://www.swarm-bots.org>, erişim tarihi: 11 Şubat 2009.

- [27] “Swarmanoid Project.” erişim adresi: <http://www.swarmanoid.org>, erişim tarihi: 11 Şubat 2009.
- [28] “Guardians: Group of unmanned assistant robots deployed in aggregative navigation supported by scent detection.” erişim adresi: <http://www.guardians-project.eu>, erişim tarihi: 11 Şubat 2009.
- [29] “Viewfinder EU Project.” erişim adresi: <http://view-finder-project.eu>, erişim tarihi: 11 Şubat 2009.
- [30] Koren, Y., Borenstein, J., Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation, Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation, 1398-1404, Sacramento, California, Nisan 1991.
- [31] McFetridge, L., Ibrahim, Y.M., New technique of mobile robot navigation using a hybrid adaptive fuzzy potential field approach, Computers and Industrial Engineering, 35(4), 471-474, Aralık 1998.
- [32] Ge, S.S., Cui, Y.J., New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 16(5), 615-620, Ekim 2000.
- [33] Kennedy, J., Eberhart, R.C., A new optimizer using particle swarm theory, Proceedings of the Sixth International Symposium on Micromachine and Human Science, 39-43, Nagoya, Japonya, Ekim 1995.
- [34] Kennedy, J., Eberhart, R.C., Particle swarm optimization, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN), 1942-1948, Perth, WA, Avustralya, Kasım 1995.
- [35] Fan, H., Shi, Y., Study on Vmax of particle swarm optimization, Proceedings of IEEE Swarm Intelligence Symposium (SIS), 193-197, Indianapolis, Indiana, ABD, 2003.
- [36] Shi, Y., Eberhart, R.C., Parameter selection in particle swarm optimization, Proceedings of IEEE Conference on Evolutionary Computation, 591-600, San Diego, ABD, Mart 1998.
- [37] Shi, Y., Eberhart, R.C., A modified particle swarm optimizer, Proceedings of IEEE Conference on Evolutionary Computation, 69-73, Indianapolis, Indiana, ABD, Mayıs 1998.
- [38] Zheng, Y., Ma, L., Zhang, L., Qian, J., On the convergence analysis and parameter selection in particle swarm optimization, Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 1802-1807, Hangzhou, Çin, Kasım 2003.
- [39] Shi, Y., Eberhart, R.C., Fuzzy adaptive particle swarm optimization, Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), (1), 101-106, Seoul, Kore, Mayıs 2001.

- [40] Ratnaweera, A., Halgamuge, S.K., Watson, H.C., Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time varying acceleration coefficients, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8(3), 240-255, Mayıs 2004.
- [41] Clerc, M., Kennedy, J., The particle swarm optimization: explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6, 58-73, Aralık 2002.
- [42] Clerc, M., The swarm and the queen towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 1951-1957, Washington, DC, ABD, Ekim 1999.
- [43] Eberhart, R.C., Shi, Y., Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, (1), 84-88, La Jolla, CA, ABD, Temmuz 2000.
- [44] Carlisle, A., Dozier, G., An off-the shelf PSO, *Proceedings of Workshop on Particle Swarm Optimization*, Indianapolis, Indiana, ABD, Nisan 2001.
- [45] Bratton, D., Kennedy, J., Defining a standard for particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE Swarm Intelligence Symposium (SIS)*, Indianapolis, Indiana, ABD, Nisan 2007.
- [46] Trelea, I.C., The particle swarm optimization algorithm: Convergence analysis and parameter selection, *Information Processing Letters*, 85(9), 317-325, 2003.
- [47] Angeline, P.J., Using selection to improve particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 84-89, Anchorage, AK, ABD, Mayıs 1998.
- [48] Eberhart, R.C., Shi, Y., Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE Conference on Evolutionary Programming*, 611-616, San Diego, California, ABD, Mayıs 1998.
- [49] Shi, Y., Eberhart, R.C., An Empirical Study of Particle Swarm Optimization, *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computing (CEC)*, 1945-1949, Washington, DC, ABD, Mayıs 1999.
- [50] Angeline, P.J., Evolutionary optimization versus particle swarm optimization: philosophy and performance differences, *Proceedings of IEEE Conference on Evolutionary Programming*, 601-610, San Diego, California, ABD, Mayıs 1998.
- [51] Kennedy, J., Small worlds and mega minds: Effects of neighborhood topology on particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, (3), 1931-1938, Washington DC, ABD, Haziran 1999.
- [52] Kennedy, J., Mendes, R., Population structure and particle swarm performance, *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, (2), 1671-1676, Honolulu, HI, ABD, 2002.

- [53] Kennedy, J., Mendes, R., The fully informed particle swarm: Simpler, maybe better, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8(3), 204-210, Haziran, 2004.
- [54] M. Dorigo and T. Stützle, *Ant Colony Optimization*. MIT Press, 2004.
- [55] V. S. Hernandez and A. Weitzenfeld, “Ant colony algorithm for swarm systems,” *Robotics Symposium*, sf. 74 – 79, Ocak 2006.
- [56] M. Dorigo, M. Birattari, and T. Stützle, “Ant colony optimization artificial ants as a computational intelligence technique,” *IEEE Computational Intelligence Magazine*, cilt. 1, sayı. 4, sf. 28–39, Kasım 2006.
- [57] M. Turduev, Y. Atas, P. Sousa, V. Gazi, and L. Marques, “Cooperative chemical concentration map building using decentralized asynchronous particle swarm optimization based search algorithm by mobile robots,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS*, Taipei, Taiwan, 2010 (yayına kabul edildi).
- [58] M. Turduev, M. Kırtay, P. Sousa, V. Gazi, and L. Marques, “Chemical concentration map building through bacterial foraging optimization based search algorithm by mobile robots,” in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics SMC*, Istanbul, Turkey, 2010 (yayına kabul edildi).
- [59] W. Jatmiko, K. Sekiyama and T. Fukuda “A PSO-based Mobile Sensor Network for Odor Source Localization in Dynamic Environment: Theory, Simulation and Measurement,” in *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, sf. 1036–1043, Vancouver, BC, Temmuz 2006.
- [60] A. Loutfi, S. Goradeschim, A. J. Lilienthal, and J. Gonzales, “Gas distribution mapping of multiple odour sources using a mobile robot,” *Robotica*, cilt. 27, sf. 311–319, Mart 2009.
- [61] A. T. Hayes, A. Martinoli, and R. M. Goodman, “Swarm robotic odor localization,” in *IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems*, sf. 1073–1078, Maui, ABD, Kasım 2001.
- [62] —, “Distributed odor source localization,” *IEEE Sensor Journal*, cilt. 2, sayı. 3, sf. 260–271, Temmuz 2002.
- [63] Q.-H. Meng, J.-C. Li, F. Li, and M. Zeng, “Mobile robots odor localization with an improved ant colony algorithm,” in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, sf. 959–964, 2006.
- [64] Y. Zou, D. Luo, and W. Chen, “Swarm robotic odor source localization using ant colony algorithm,” in *Control and Automation*, Christchurch, sf. 792–796, Aralık 2009.

- [65] J. Oyekan, H. Hu, and D. Gu, "Proceeding of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics," in *Exploiting Bacteria Swarms for Pollution Mapping*, sf. 39–44, Guilin, Çin, Aralık 2009,
- [66] C. A. Sierakowsk and L. dos S. Coelho, "Path planning optimization for mobile robots based on bacteria colony approach," *Applied Soft Computing Technologies: The Challenge of Complexity*, cilt. 34, sf. 187–198, Ağustos 2006.
- [67] C. Wu, N. Zhang, J. Yang, and Y. Liang, "Improved bacterial foraging algorithms and their applications to job shop scheduling problems," *Adaptive and Natural Computing Algorithms*, cilt. 4431, sf. 562–569, Temmuz 2007.
- [68] T. D. A. Lilienthal, "Building gas concentration gridmaps with mobile robot," *Robotic and Autonomous Systems*, cilt. 48, sayı. 1, sf. 3–16, Mayıs 2004.
- [69] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *IEEE International Conference on Neural Network*, sf. 1942–1948, 1995.
- [70] L. Marques, U. Nunes, and A. T. de Almedia, "Finding odours across large search spaces: A particle swarm-based approach," in *Climbing and Walking Robots: Proc. of the 7th Int. Conf. CLAWAR*, sf. 419–426, 2005.
- [71] —, "Particle swarm-based olfactory guided search," *Autonomous Robots*, cilt. 20, sayı. 3, sf. 277–287, Haziran 2006.
- [72] J. Pugh and A. Martinoli, "Inspiring and modeling multi-robot search with particle swarm optimization," in *4th IEEE Swarm Intelligence Symposium*, Honolulu, HI, ABD, Nisan 2007.
- [73] —, "Distributed adaptation in multi-robot search using particle swarm optimization," in *10th International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior*, sf. 393–402, 2008.
- [74] J. M. Hereford, "A distributed particle swarm optimization algorithm for swarm robotics application," in *Congress on Evolutionary Computation*, sf. 6143–6149, Vancouver, BC, Temmuz 2006,
- [75] J. M. Hereford and M. Siebold, "Multi-robot search using a physically-embedded particle swarm optimization," *International Journal of Computational Intelligence Research*, cilt. 4, sf. 179–209, 2008.
- [76] S. Doctor, G. K. Venayagamoorthy, and V. G. Gudise, "Optimal pso for collective robotics search applications," in *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, sf. 1390–1395, Portland, OR, ABD, Haziran 2004
- [77] K. M. Passino, "Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control," *IEEE Control Systems Magazine*, cilt. 22, sayı. 3, sf.52–67, Haziran 2002.

- [78] H. Berg, *E. Coli in Motion*. New York: Springer-Verlag, 2004.
- [79] T. Kima, S. H. Jungb, and K. Cho, “Investigations into the design principles in the chemotactic behavior of escherichia coli,” *Biosystems*, cilt. 91, sayı. 1, sf. 171–182, Ocak 2008.
- [80] M. Eisenbach and S. R. Caplan, “Bacterial chemotaxis: Unsolved mystery of the flagellar switch,” *Current Biology*, cilt. 8, sayı. 13, sf. 444–446, Haziran 1998.
- [81] A. Dhariwal, G. S. Sukhatme, and A. A. Requicha, “Bacterium-inspired robots for environmental monitoring,” in *IEEE International conference on Robotics and Automation*, sf.1436–1443, New Orleans, Louisiana, ABD, Nisan 2004.
- [82] W. J. Tang, Q. H. Wu, and J. R. Saunders, “Bacterial foraging algorithm for dynamic environments,” in *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, sf. 1324–1330, BC, Canada, Temmuz 2006.
- [83] M. Kırtay, M. Turduev, P. Sousa, and L. Marques, “Chemical concentration map building through ant colony optimization based search algorithm,” in *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi 2010*, Gebze, Türkiye, Eylül 2010 (yayına kabul edildi).
- [84] S. B. Akat, V. Gazi, and L. Marques, “Asynchronous particle swarm optimization based search with a multi-robot system:simulation and implementation on real robotic system,” *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2010 (yayına kabul edildi).
- [85] J. Pascoal, P. Sousa, and L. Marques, “Khenose - a smart transducer for gas sensing,” in *1th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines CLAWAR2008*, Coimbra, Portugal, Eylül 2008.
- [86] N. Barsan and A. Tomescu, “Calibration procedure for sno2-based gas sensors,” *Thin Solid Films*, cilt. 259, sayı. 1, sf. 91–95, 1995.
- [87] M. Clerc and J. Kennedy, “The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, cilt. 6, sayı. 1, sf. 58–73, Şubat 2002.
- [88] S. B. Akat and V. Gazi, “Particle swarm optimization with dynamic neighbourhood topology:three neighborhood strategies and preliminary results,” in *IEEE Swarm Intelligence Symposium (SIS-2008)*, St. Louis, Missouri, ABD, Eylül 2008.
- [89] ———, “Decentralized asynchronous particle swarm optimization,” in *IEEE Swarm Intelligence Symposium (SIS-2008)*, St.Louis, Missouri, ABD, Eylül 2008.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : Mirbek Turduev  
Uyruğu : Kırgız Cumhuriyeti  
Doğum tarihi ve yeri : 14.04.1985 Kırgızistan  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 (312) 292 42 91  
Faks : 0 (312) 292 40 91  
e-mail : [mturduev@etu.edu.tr](mailto:mturduev@etu.edu.tr)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Kırgız Devlet Politeknik Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği	2006

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007-2010	TOBB ETÜ	Araştırma Görevlisi

### Yabancı Dil

İngilizce  
Rusça

### Yayınlar

M. Turduev, V. Gazi, J. Penders, ve E. Cervera, "Implementation of a Collision-Free Path Planning and Navigation Algorithm for Mobile Robots Using 2D-Voronoi Diagrams, the A\* Algorithm, and Potential Functions," in *Proceedings of the EURON/IARP International Workshop on Robotics for Risky Interventions and Surveillance of the Environment*, Brussels, Belçika, Ocak 2009.

M. Turduev, V. Gazi, J. Penders, ve E. Cervera, "2D-Voronoi Çizelgeleri, A\* Arama Yöntemi ve Yapay Potansiyel Fonksiyonlar Kullanılarak Carpışmasız Gezgin Robot Guzergah Planlama ve Gezinme Uygulaması", in *Proceeding of the TOK2009 (Turkish National Committee of Automatic Control) National Conference on Automatic Control 2009* İstanbul, Ocak 2009

M. Turduev, Y. Atas, P. Sousa, V. Gazi, ve L. Marques, "Cooperative chemical concentration map building using decentralized asynchronous particle swarm optimization based search algorithm by mobile robots," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS*, Taipei, Taiwan, 2010, yayına kabul edildi.

M. Turduev, M. Kirtay, P. Sousa, V. Gazi, ve L. Marques, "Chemical concentration map building through bacterial foraging optimization based search algorithm by mobile



robots,” in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics SMC*, Istanbul, Turkey, 2010, yayına kabul edildi.

M. Kirtay, M. Turduev, P. Sousa, ve L. Marques, “Chemical concentration map building through ant colony optimization based search algorithm,” in *TOK2010 (Turkish National Committee of Automatic Control) National Conference on Automatic Control 2010*, Gebze, Türkiye, Eylül 2010, yayına kabul edildi.